

博士論文

ドライバーが意のままと感じる
車両操舵応答特性に関する研究

田尾 光規

目次

第1章 序論	5
1.1 車両運動性能の発展	6
1.2 近年の車両運動性能の課題	13
1.3 車両運動性能に関する先行研究	15
1.3.1 車両操舵応答特性に関する先行研究	15
1.3.2 ドライバ操舵特性に関する先行研究	20
1.4 意のままと感じる車両操舵応答特性の仮説立案	25
1.4.1 修正操舵低減に関する研究	25
1.4.2 ドライバと車両のクローズドループの関係	27
1.4.3 ドライバが意のままと感じるために必要と考える2つの方法	28
1.4.4 ドライバが目標とした走行ラインを正確にトレースするための 車両特性の仮説	29
1.4.5 従来の研究に対する本研究の位置づけ	30
1.5 本研究の目的	32
1.6 本研究の前提条件	33
1.6.1 研究に用いた評価コース	33
1.6.2 研究の対象とした車両特性	33
1.6.3 研究に用いた評価車両	35
1.7 本論文の構成	37
第2章 ドライバ操舵特性の定量的把握	39
2.1 本章の目的	40
2.2 本研究で定義したドライバモデル	41
2.2.1 前方注視点誤差モデル	41
2.2.2 ロールフィードバックモデル	42
2.2.3 走行軌跡誤差モデル	43
2.2.4 ドライバ-車両モデルの定義	44

2.3	ドライビングシミュレータ実験環境の構築	45
2.3.1	操舵力特性の実車再現性向上	45
2.3.2	操舵応答特性の実車再現性向上	46
2.3.3	実験評価コース走行時の実車再現性確認	48
2.3.4	車両特性がドライバの操舵角に与える影響の確認	48
2.3.5	フロントウィンドの窓枠の有無の操舵角への影響確認	50
2.4	ドライバモデルパラメータの同定	51
2.4.1	ドライバモデルパラメータ同定のための実験と同定方法	51
2.4.2	ドライバモデルパラメータ同定結果	52
2.5	本章のまとめ	53
第3章	ドライバが意のままと感じる車両応答特性の算出	54
3.1	本章の目的	55
3.2	ドライバ操舵特性の考察による仮説特性算出方針の検討	56
3.3	車両応答特性違いの解析比較による仮説特性の絞り込み	57
3.4	カーブの進入でドライバが目標とした走行ラインを 正確にトレースできる操舵応答特性の算出	60
3.5	仮説検証仕様の選定	62
3.6	本章のまとめ	65
第4章	ドライバが意のままと感じる車両操舵応答特性のDS検証	66
4.1	本章の目的	67
4.2	DS実験検証	67
4.2.1	実験検証仕様	67
4.2.2	実験検証方法（走行軌跡計測と官能評価）	67
4.2.3	ドライバが意のままと感じる車両操舵応答特性のDS検証結果	68
4.3	本章のまとめ	72
第5章	ドライバが意のままと感じる車両操舵応答特性の実車検証	73
5.1	本章の目的	74

5.2	実車実験車両の仕様	74
5.3	仕様を実現する検証車両の設計・製作	75
5.3.1	従来2輪モデルによる操舵応答特性の向上	75
5.3.2	従来手法である等価CPによる性能向上代の明確化	77
5.3.3	タイヤの横剛性のモデル化による新たな車両モデルの構築と 目標特性を実現する具現化方策の仮説の立案	78
5.3.4	新たに構築した車両モデルの実車両を用いた検証	81
5.4	実車実験検証	83
5.4.1	実験検証方法	83
5.4.2	ドライバが意のままと感じる車両操舵応答特性の実験検証結果 ..	83
5.5	本章のまとめ	87
第6章	考察	88
6.1	本章の目的	89
6.2	ドライバが意のままと感じる車両の操舵応答特性	89
6.3	脳計測による官能評価の裏付け	91
6.3.1	fNIRS計測	91
6.3.2	脳波計測	93
6.4	車両運動性能のあるべき姿	97
第7章	結論	99
付録	研究に使用したドライビングシミュレータ	103
	参考文献	107
	謝辞	112

第 1 章

序 論

1.1 車両運動性能の発展

「走る」「曲がる」「止まる」といったクルマの基本性能を担う車両運動性能は、これまで数多くの研究や実際の量産車開発を通じて、飛躍的な進化を遂げてきた^{[1][2]}。

タイヤのコーナリングパワの向上やリアサスペンションの横剛性と横力トーイン特性の増加を中心とした車両スタビリティの向上、ロール剛性増加による車両ロール角の低減、そしてリアサスペンションによるスタビリティ向上に合わせたフロントサスペンションのアンダーステア角の低減やステアリング剛性向上、ステアリングギヤレシオのクイック化等による車両回頭性の向上等、車両運動性能のポテンシャルは大きく向上してきた。

これらは、車両を安全に走行させるというもっとも基本的な要件に加えて、ドライバが、思い通りに、意のままに、車両を操れることを目指して、研究者・技術者の方々が、長い年月をかけて取り組まれてきた結果と言える。現在量産されている車両では、ほとんどのユーザが通常の使い方において、不満を感じないレベルの性能が実現できているようになってきた。カーブを走行した時にロールの嫌味を感じることはほとんど無く、アンダーステアによる曲がりにくさ感じることもまずない。

これらについて、操縦安定性の基本性能を示すいくつかの定量指標を使って、その変遷を確認して見ると、1960年ごろから2000年ごろまでの約40年間で、車両質量は平均で約400kg増加してきているにも関わらず（図1-1）、その間に、ロール角は平均して5degから3degまで、40%も小さくなっており（図1-2）、また、ヨー共振周波数は1980年から2000年の約20年間で、やや高くなっていること等から、車両の安定性が向上してきていることが定量的にも確認できる（図1-3）。

操縦性の面でも、図1-4に示すように、アンダーステアの度合いを表す指標であるスタビリティファクタは、同じく40年間で、約 5×10^{-3} から $2 \times 10^{-3} \text{ s}^2/\text{m}^2$ まで、半分以下のレベルに抑えられてきており、また、図1-5に示すように、操舵力も明確に軽くなってきている等、より軽快な操縦ができる方向へと、性能の向上が行われてきた様子が確認できる。

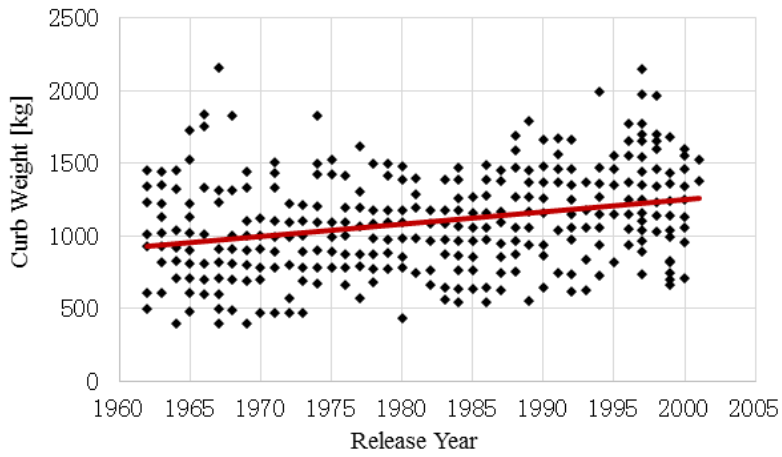


図 1-1 車両質量の変遷^[3]

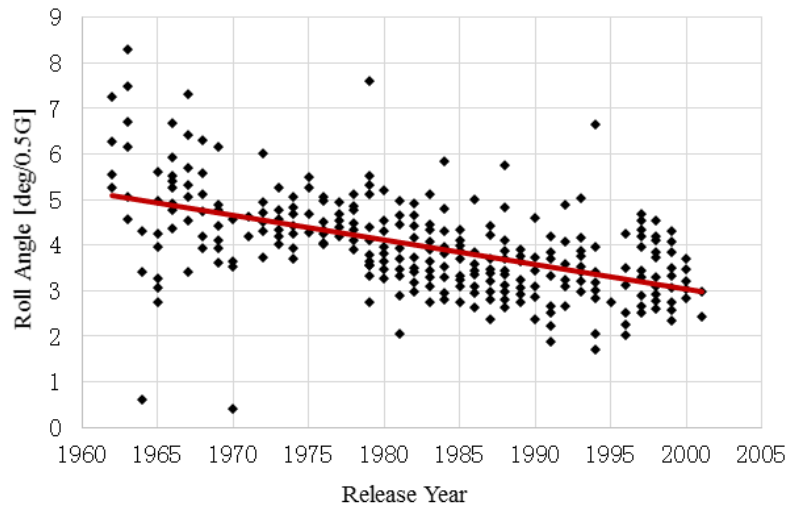


図 1-2 旋回時ロール角の変遷^[3]

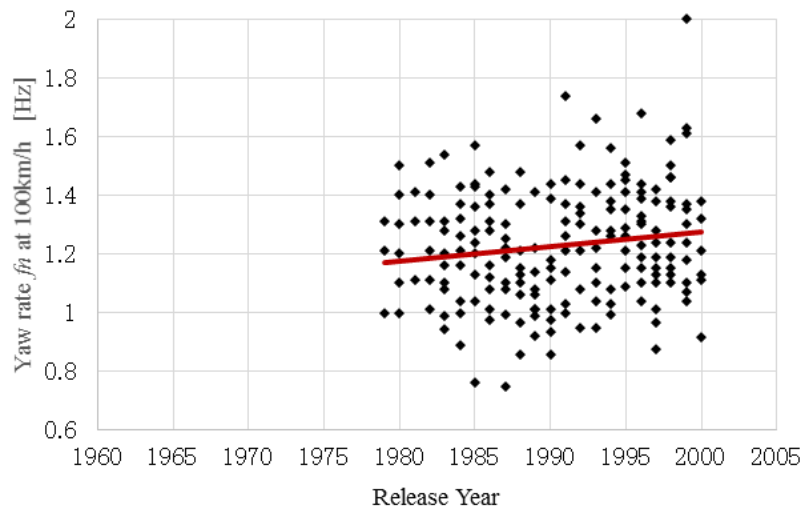


図 1-3 ヨー共振周波数の変遷^[3]

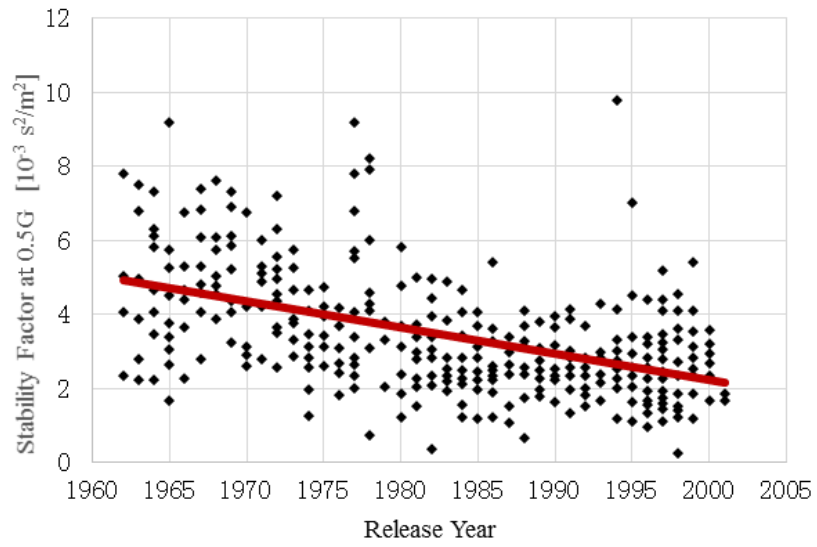


図 1-4 スタビリティファクタの変遷^[3]

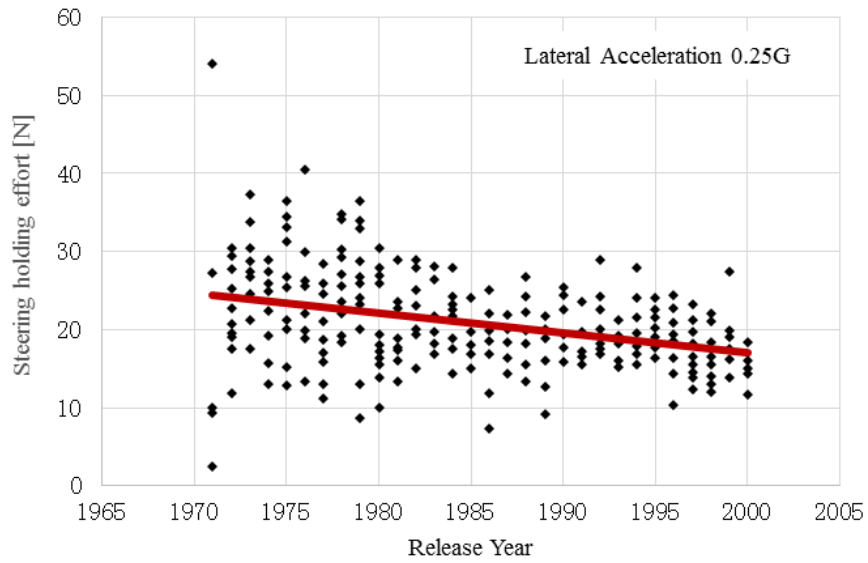


図 1-5 操舵力の変遷^[3]

これら操縦安定性能の向上は、サスペンション、ステアリング、タイヤなどのいわゆるシャシ性能の向上、それを支える様々な基盤技術開発の成果によってなされてきた。サスペンションジオメトリの最適化等によるトー変化特性の改善や剛性の向上、ステアリングラックやコラムのレイアウトの最適化、操舵力アシスト性能の効率向上等によるステアリングギヤレシオや剛性の向上、また、タイヤの構造やゴム材の改善によるコーナリングパワーやコーナリングフォースの向上などがあげられる。ここでは、その一例として、車両の操縦安定性に大きな寄与を持つリアサスペンションの性能向上、中でも横剛性、及び横力トーイン量が、時とともに大きく向上してきた様子をそれぞれ、図 1-6、図 1-7 に示した。

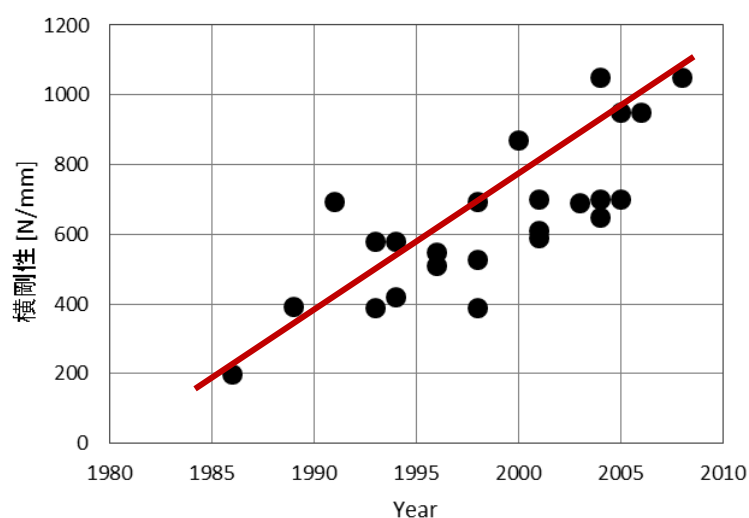


図 1-6 リアサスペンション横剛性向上の変化 (L クラスセダン)

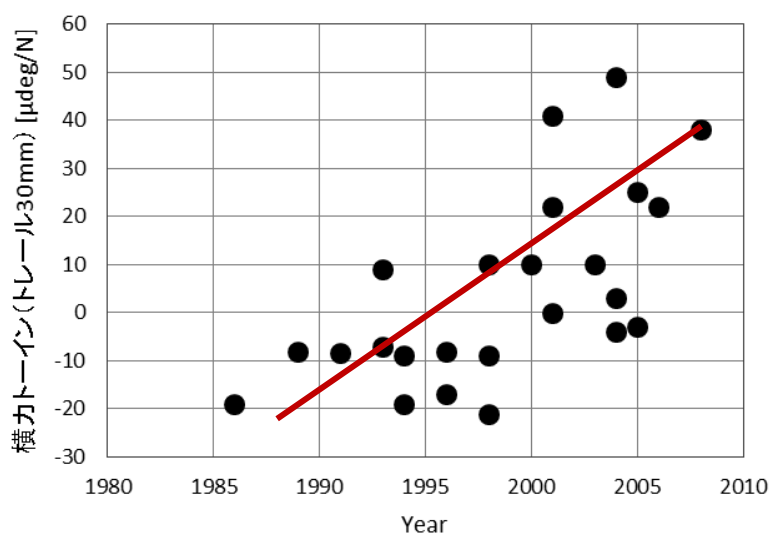


図 1-7 リアサスペンション横力トーイン量の変化 (L クラスセダン)

更に近年では、メカニカルな改良にとどまらず、電子制御ショックアブソーバーやアクティブステア等、電子制御デバイスによる更なる性能向上が盛んに実施されるようになってきている。それらの状況は、図 1-8 の操縦安定性制御技術全般の特許出願推移（特許庁総務部技術調査課まとめ）からも読み取ることができる。

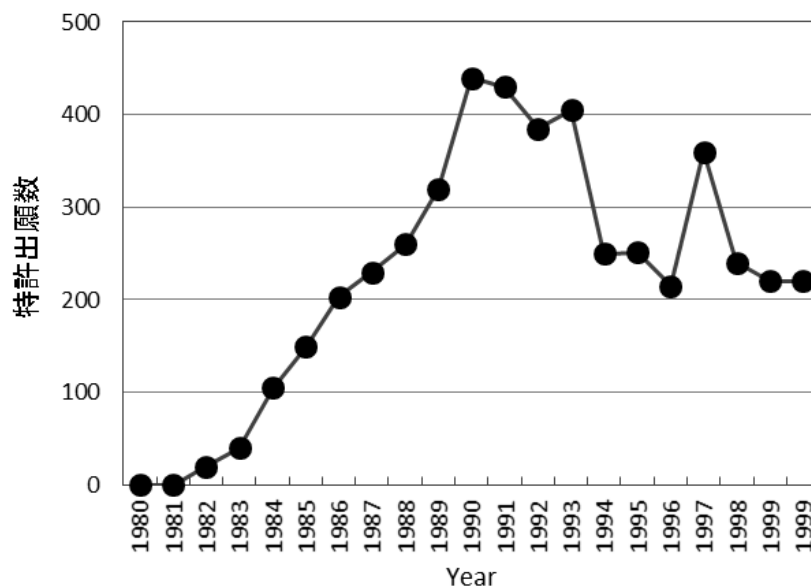


図 1-8 操縦安定性制御技術の特許出願数推移（日本）^[4]

また近年、自動運転技術が著しく発展しており、その技術を搭載した車両の市場への拡大が予測^[6]されている（図 1-9）。それに伴い、自動運転の分野から、車両運動性能への新たな要求が求められ始めている^{[4][5]}。ドライバーが任せて安心できる自動運転車を実現するためには、ドライバーに代わって車両を操縦する自動運転時の制御モデルの開発だけでは不十分であり、車両そのものの操縦安定性能の更なる進化、さらにはその制御モデルが操縦しやすい、制御性の優れた車両の開発が求められている。

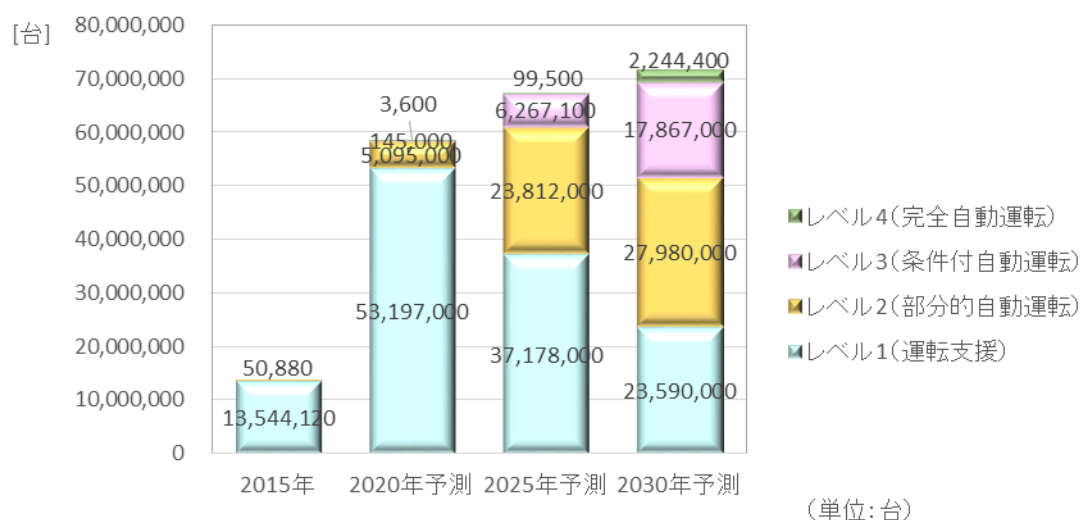


図 1-9 自動運転車の世界市場規模予測（台数）^[6]

最後に、これまで説明してきた車両運動性能の進化は、走る楽しさや快適性の追求だけを目指したものではない。それは、交通事故を防止するための重要な基盤技術の一つとして、大きな社会的役割を担っている。高い運動性能で衝突そのものを回避したり、日常の運転のし易さやその安定性で、ドライバーの負担や疲労を軽減し、事故を未然に防止することで、これまでの交通事故死者数の低減にも大きく貢献してきたと考えられる（図 1-10）。今後も車両運動性能は、自動運転技術と融合等も含めて、交通事故死者数“ゼロ”を目指して、着実に貢献していくことが求められている。

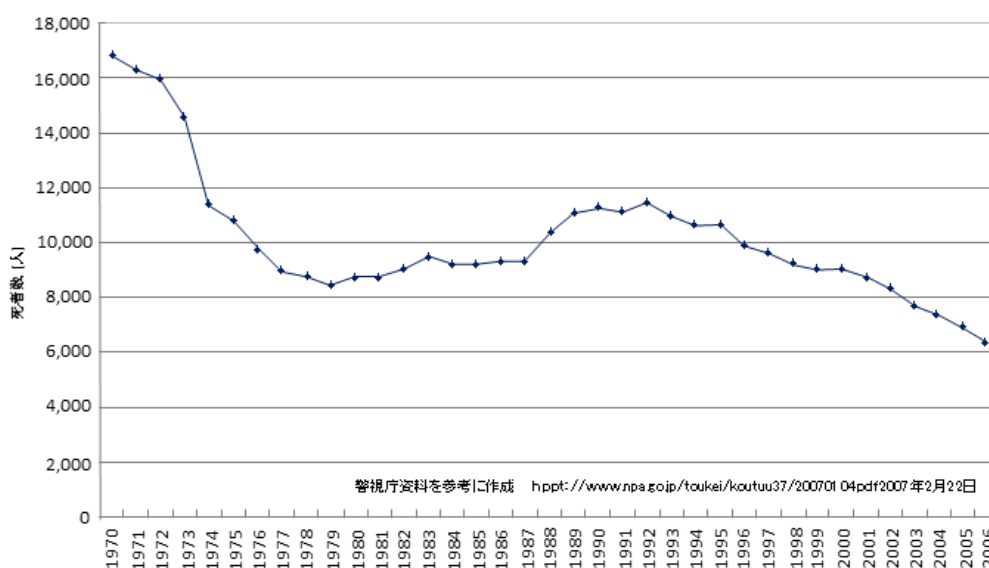


図 1-10 交通事故死者数推移^[7]

1.2 近年の車両運動性能の課題

このように、飛躍的な発展を遂げてきた運動性能であるが、今後更なる正常進化という課題に加えて、近年では特に、新たな2つの課題に直面している。

一つは、従来より存在する他性能とのトレードオフが、急速に増大しているという課題である。自動車は運動性能だけでなく、静粛性などの快適性能、燃費性能などの環境性能^[8]、衝突安全性能、デザイン性等、数多くの性能要求の中で成立している。昨今では特に、快適性能や環境性能に対する要求が著しく増加しており、サスペンションの低剛性化やタイヤの低転がり化^[9]等、それに伴う運動性能への跳ね返りも急増している。こういった状況の中で、更に運動性能を向上させていかねばならないという難課題がある。

もう一つは、人の意に合う車両運動性能の解明という課題である。クルマはその昔、馬に取って代わった乗り物となった時代から、人馬一体という比喻もある様に、ドライバが意のままに操れることが、運動性能分野での一つの目標とされてきた。また、近年の例でも、自動運転技術の普及に伴い、運転席に座っているドライバが、その運転をクルマに任せて安心できる、ドライバの意に合った動きの解明とその実現が求められている^{[4][5]}。このように、人の意に合う運動性能の解明への期待値は依然高い状態が続いているものの、ドライバの感覚と車両運動性能という、異なる2つの領域を定量的に組み合わせることが非常に難しいこと、また、これまでの運動性能分野では、その基本性能の向上に優先度を上げて取り組んできたことから、前者の期待値に対して十分に応えられているとは言えないのが現状である。

このような、人間の感じ方の領域に踏み込んだ研究は、人間工学、感性工学、ヒューマンセンタードデザインなどと呼ばれ、昨今その研究も盛んに行われるようになってきている^[10]。^[14] 使う側の事を考え抜いて作られた道具ということ考えると、例えば、参考文献からの引用であるが、江戸時代の職人さんが作る道具というのが、そうになっていたであろうことは、容易に想像ができる^[5]。これと比較すると、近年の自動車のように、高度に複雑化した道具を、多くのエンジニアがそれぞれの機能目標を分業して開発している状況においては、それが非常に困難な状況であることも容易に想像できる。車両の基本性能がある一定以上のレベルを実現できるようになってきた昨今において、ヒューマンセンタードの重要性が増加していることは、ごく自然の流れと言える。しかしそれを実現するのは簡単なことではない。ある自動車の開発では、この感性重視の車両を開発するために、開発メンバーによる、数多くのベンチマーク車両の試乗共有の実施、エンジン重心の変更を含む車両諸元及び基本骨格の見直し、細部にわたるグラム単位での軽量化、そして試作車両を使った400種類を超えるサスペンションダンパの確認等、通常の車両開発では簡単にはまねのできない、いくつもの手法が必要であったことが報告されている^[16]。

前者で述べた，トレードオフを解決しながら更に基本性能向上を追求していくことは非常に重要な課題であることは間違いないが，これまでの運動性能の発展により「走る」「曲がる」「止まる」の基本性能が，多くのユーザにとって概ね不満のないレベルにまで進化してきた現在においては，後者のドライバの意に合う車両運動性能の解明こそ，今後より優先度を上げて取り組むべき課題であるとともに，その解明によって，高度に発展させた基本性能を更に有効に活用できるものとする。

取り組むべき具体的なシーンとして，基本性能と同じように，「走る」「曲がる」「止まる」の3つの現象が考えられるが，中でも，ドライバの操舵入力に対する車両のヨーレイト，横加速度，ロール角等，多くの物理現象を考慮する必要があるために，そのメカニズムがより複雑な「曲がる」の解明が，もっとも期待されている現象である。

1.3 車両運動性能に関する先行研究

「曲がる」における、ドライバの意に合う車両運動性能の解明という課題を解決していくためには、車両運動性能に関する研究の中から、ドライバの操舵に対する車両応答特性に関する研究と、車両挙動や周辺環境に対するドライバの操舵特性に関する研究を、定量的に組み合わせることが必要である。ここでは、それらについてのこれまでの多くの先行研究の中から、筆者が参考にしたいいくつかの事例について紹介する。

1.3.1 車両操舵応答特性に関する先行研究

ここでは、車両の操舵応答特性に関するいくつかの研究事例を紹介する。

佐野、古川らは、「車両のヨー応答特性と横加速度応答特性が人間－自動車系の性能に及ぼす影響」^[7]の中で、図 1-11 のような、ヨーレイトと横加速度の応答特性を独立に変更できる車両台上ドラム回転設備を用いて、レーンチェンジ走行の正確さを評価する実験を行い、ヨーレイト、横加速度、それぞれの応答遅れとドライバの修正操舵の低減の関係を明確にした。

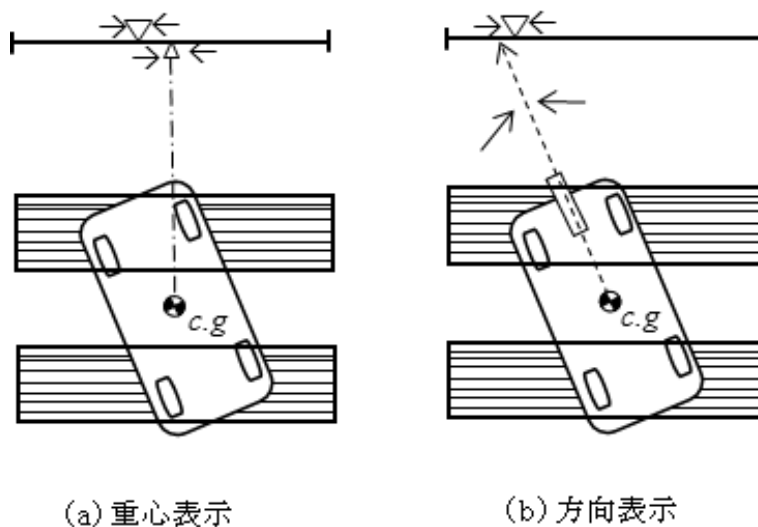
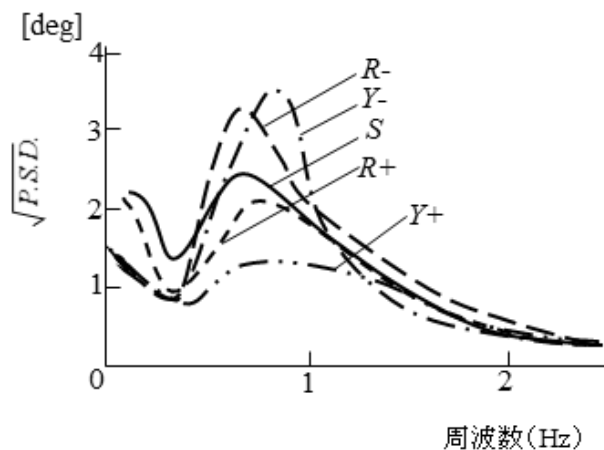


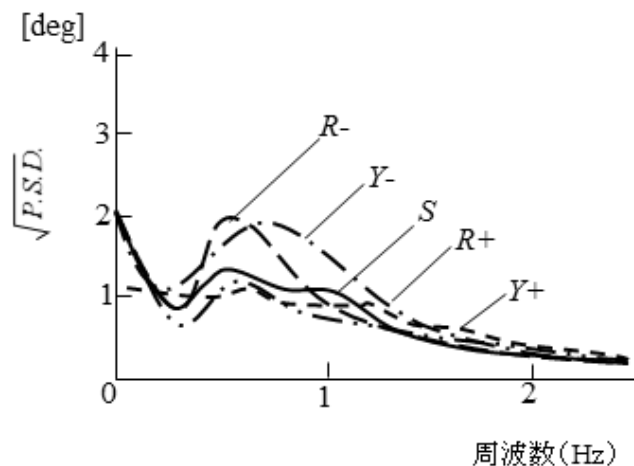
図 1-11 ドライバへの入力情報の与え方^[7]

図 1-12 のように、車両応答特性違いの修正操舵を、横軸を周波数、縦軸にそのレベルとして整理したものが示されている。基準の S に対して、ヨーレイトの位相遅れを小さくした R+ と、大きくした R-、横加速度の位相遅れを小さくした Y+ と、大きくした Y- で実験を行い、ヨーレイト、横加速度ともに、位相遅れを小さくすることによって、その修正操舵量が低減できることが、実験によって定量的に示されている。

更に、方向表示（ヨー方向）の修正操舵量よりも、重心表示（左右方向）の修正操舵量の方が、大きくなっていること、また、その左右方向の修正操舵量には、ヨーレイトの位相の感度よりも、横加速度の位相の感度の方が高くなっていることも合わせて示されている。



(a) 重心表示



(b) 方向表示

図 1-12 ドライバの操舵角のスペクトル密度^[17]

この研究から、ドライバーは、カーブの進入等での先を見たヨー方向の修正よりも、カーブに入った後の横方向の修正操舵のレベルの方が大きいこと、そしてその修正には横加速度の位相遅れを低減することが効果的であるということが読み取れる。

久岡，山本らは、「ドライバにとって望ましい車両応答と操舵トルクに関する研究」^[18]の中で，車両応答特性を自由に変更できる車両を用いて，それらの特性を変化させた時のドライバの官能評価を実施している．そこでは，図 1-13 に示すように，ドライバにとってフィーリングの良い車両応答特性の領域が定量的に示されている．また，図 1-14 のように，そのフィーリングの良い領域の車両では，車線変更時のドライバの修正操舵量が減少することが，合わせて示されている．

図 1-13 では，横軸に横加速度の応答遅れ，縦軸にヨーレイトの応答遅れとして，車両特性をさまざまに変更した時の，ドライバの官能評価結果やそのコメントが示されている．参考となるものとして，ヨーレイトの遅れを小さく，横加速度の遅れを大きくした場合には，車両のしっかり感が不足し，ぐにゃぐにゃとした収まりの悪いフィーリングとなり，逆にヨーレイトの遅れを大きく，横加速度の遅れを小さくすると，安定感は向上するが，車両の進行方向に違和感があり，曲がらないフィーリングになる．というコメントが示されている．そして，これらの関係には，ドライバの官能評価上バランスの取れた，フィーリングの良い領域があることが定量的に示されている．

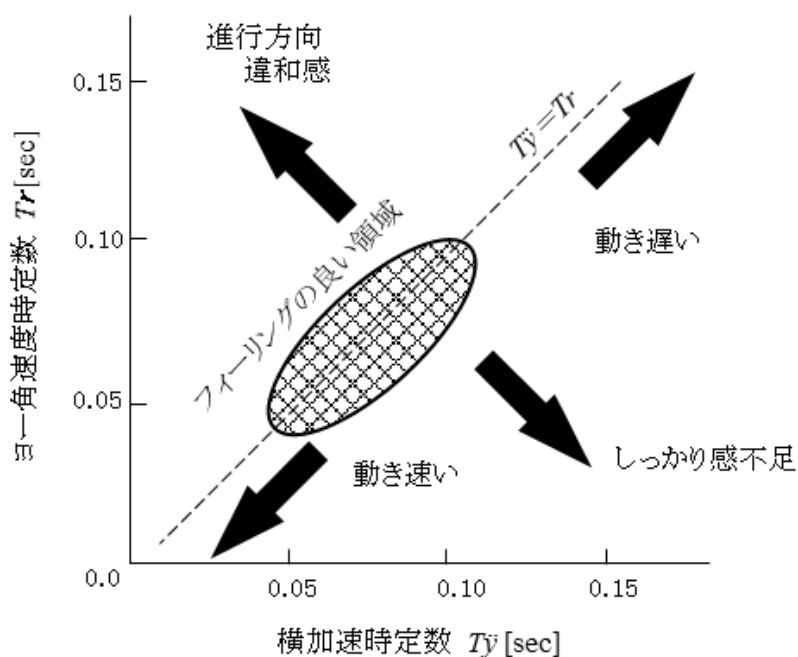


図 1-13 車両応答特性とフィーリング^[18]

図 1-14 は、そのフィーリングの良い領域の車両特性とした車両と、そうでない車両で、レーンチェンジをした場合の操舵角の時系列波形が示されており、フィーリングの良い車両では、操舵がより滑らかで、全体的に修正操舵が少なくなっていることが示されている。

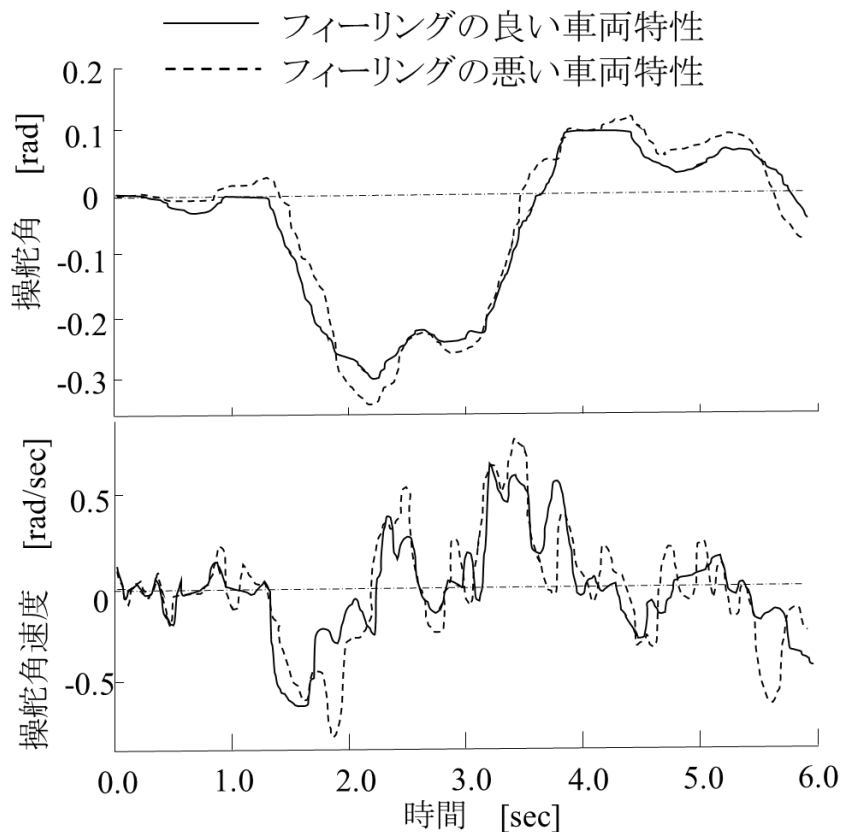


図 1-14 車両特性と操舵角速度波形^[18]

このデータを詳しく観察すると、特に、時間軸で約 1~2s に相当する、直進から第一操舵が完了するまでの領域において、その操舵の乱れが少なく、ほぼ一発で操舵を決められている様子が読み取れる。これらの気づきは、筆者が研究を実施する上で、特に参考にしたものであり、その詳細については、次節 1.4 にて述べる。

これらの先行研究以外にも、車両の操舵応答特性に関連した多くの研究事例があるが^{[19]~[29]}、いずれの場合も、今回の事例で示したように、車両の応答遅れを小さくすることによる修正操舵の低減や、フィーリング評価の改善、あるいは、ヨーレイトや横加速度の遅れの組合せによって、フィーリング上の改善を解明しているものが多い。

これらの研究成果をベースに、ドライバにとって好ましい走行状態を定義し、ドライバの操舵特性から、必要な車両特性を解明していくといった取り組みを組み合わせることによって、より効果的に、「ドライバが意のままと感じる」性能を実現していく研究が必要であると考えられる。

1.3.2 ドライバ操舵特性に関する先行研究

次に、ドライバの操舵特性に関する研究について、参考にしたいくつかの事例を紹介する。

井口は、「人間-機械系 -人による機械の制御-」^[30]の中で、現在、前方注視点誤差モデルと呼ばれ、もっとも一般的に使われているドライバの操舵モデルを定義している。まず、井口は、図 1-15 に示すようなもっともシンプルな操舵モデルを示している。ドライバはコースからの横方向のずれを読み取り、その量に応じたハンドル角を与えるとこのモデルである。しかし、このモデルではハンドル角と横変位の関係が 2 階の積分特性を持つために、コースに沿った走行が非常に難しくなることを述べ、図 1-16 のような、より現実的なモデルを合わせて示している。

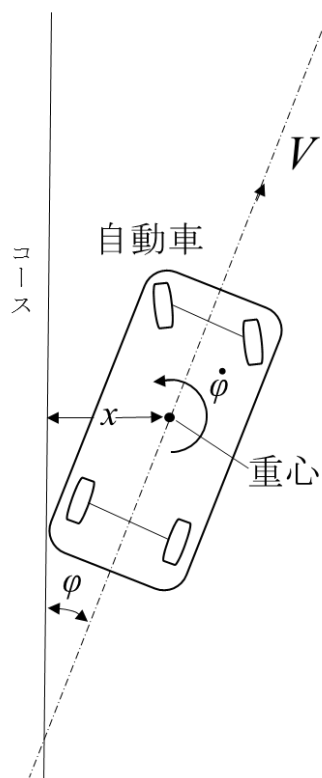


図 1-15 横方向のずれに対する操舵モデル^[30]

新たなモデルでは，ドライバは横方向のずれだけでなく，前方の情報を読み取って走行していることが示されている．前方 L の地点のコースからの横方向のずれを読みとり，それに比例した角度だけハンドル角を回転させるという操向方式をとることによって，ドライバは，コースに沿って安定した走行を可能としている，ということが説明されている．

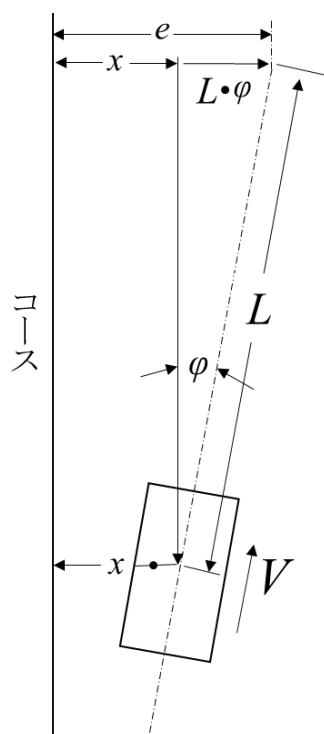


図 1-16 前方 L の点のずれに対する操舵モデル^[30]

このモデルは本研究の中でも，カーブを走行中のドライバの操舵角を精度よく再現するためのドライバモデルとして取り入れた．その内容については，第 2 章で詳しく述べる．

Salvucci らは、「A two-point visual control model of steering」^[31]の中で、ドライバは、今後やってくるカーブに向けて、予測的に操舵を行うための遠方の前方注視点と、カーブに入った後に、自分の車を車線の中央を正確に走行させるための極めて近い前方注視点の、2つの注視点を使って操舵を行っていることを、スリット入りの目隠し板を上下させるドライビングシミュレータ実験で明らかにした。図 1-17 は、実験でのスリットの設定条件違いを、図 1-18 には、移動させるスリットの下方角違いで、操舵の正確さを比較することによる、その裏付けが示されている。

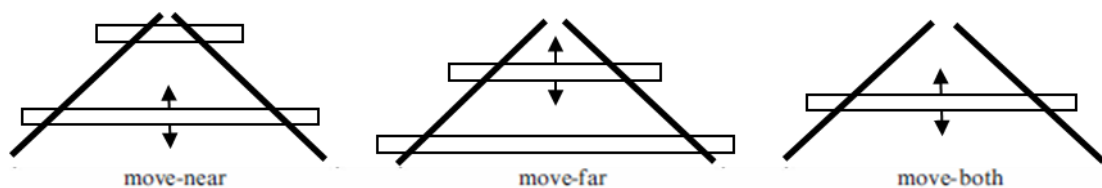


図 1-17 ドライビングシミュレータでの実験条件^[31]

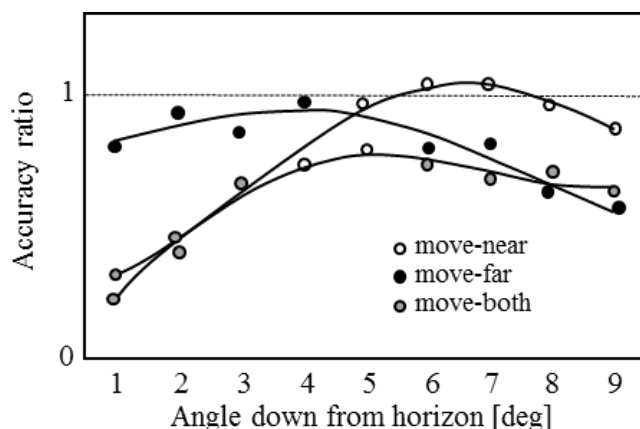
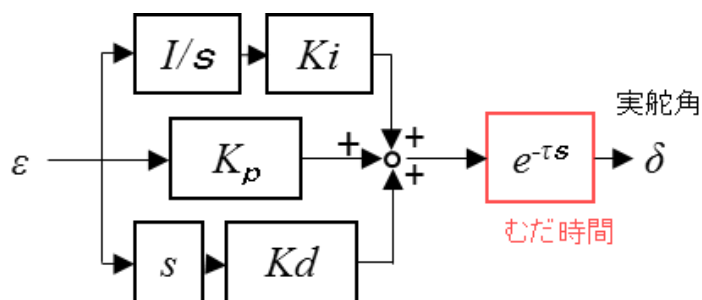


図 1-18 カーブに対するドライバの操舵の正確さ^[31]

本研究でも、ドライバはカーブの進入に向けた、前方の注視点を見据えた予測の操舵と、カーブに入った後に、結果としての車両の横方向のずれを調整するための、極めて近い注視点による調整の操舵を行いながら走行していると考え、これら2つの注視点のモデルを活用した。

景山，栗谷川らは，「自動車におけるドライバ特性の活用－機械工学からの課題と展望－」他 [32]～[38] の中で，図 1-19 に示した，前方注視点誤差モデルとして，PID 制御とむだ時間を合わせたモデルを定義し，その伝達関数を定義している．



(a)ブロック線図

$$H(s) = \overset{\text{ゲイン}}{\boxed{K_p}} \left[\boxed{1} + \overset{\text{微分項 (I)}}{\boxed{T_D s}} + \overset{\text{積分項 (O)}}{\boxed{\frac{1}{T_I s}}} \right] \overset{\text{むだ時間項}}{\boxed{e^{-\tau s}}}$$

(b)伝達関数

図 1-19 前方注視点誤差モデルの PID とむだ時間のブロック線図と伝達関数^[38]

このように，ドライバの操舵特性を伝達特性で表現することによって，操舵に対する車両の応答伝達特性と定量的に組み合わせることを可能としている．本研究でも，先行研究にある PID とむだ時間で表されるドライバモデルを活用した．詳細は第 2 章で述べるが，実際にカーブを走行しているドライバの操舵パターンを分析し，PID の各パラメータとむだ時間を同定することによって，ドライバと同様の操舵をシミュレーション上で再現できるドライバモデルの構築に取り組む．

これらの先行研究以外にも、ドライバの操舵特性に関連した多くの研究事例があるが、いずれの場合にも今回の事例で示したように、走行中のドライバの操舵角波形を精度よく予測するための方法の解明^{[39]~[44]}や、モデルのパラメータ同定手法に関するもの^{[45]~[47]}に加え、そのモデルのパラメータから車両の良し悪しを評価しているもの^{[48]~[53]}や、ドライバの操舵のパターンからその運転技量や運転の特徴を分析した事例^{[54]~[57]}が多い。

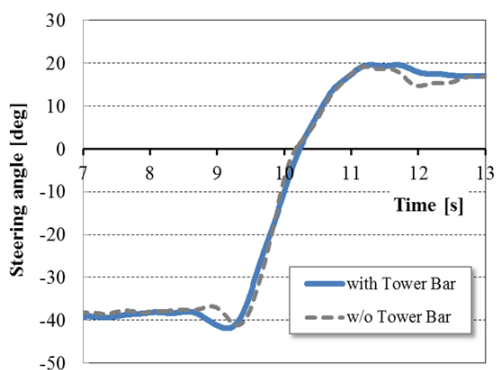
今後、これらドライバの操舵特性に関する先行研究をベースに、先に述べた操舵に対する車両応答特性の研究と組み合わせ、ドライバにとって好ましい走行状態を定義し、ドライバの操舵モデルと車両モデルと組み合わせることによって、従来の研究に見られる修正操舵の低減と合わせて、ドライバが意のままに操縦できる車両を、更に効果的に実現できる手法の研究を進めていく必要があると考える。

1.4 意のままと感じる車両操舵応答特性の仮説立案

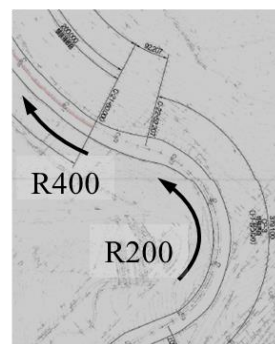
ここでは、1.3で紹介した先行研究の考察と、これまで実施してきた自身の研究や知見を組み合わせて、本研究で取り組む「ドライバが意のままと感じる車両特性」の仮説を立案する。

1.4.1 修正操舵低減に関する研究

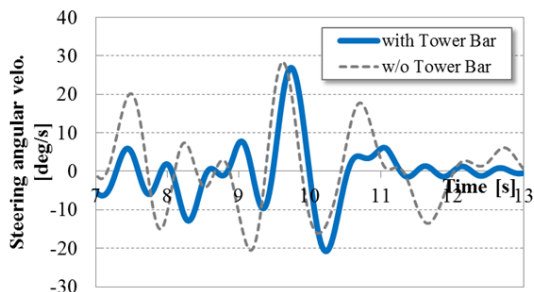
「修正操舵を低減する車両剛性に関する研究」^[58]の中で実施した修正操舵の分析と、その低減事例について述べる。図 1-20(a)は、ある実験車両にて、(b)のような 200R,400R で構成される走行コースを、80kph 一定速でカーブに沿って走行した時の、操舵角の時系列波形を示している。その操舵角波形には、ギザギザとした操舵角の時間に対する乱れが観測され、これを修正操舵と定義した。定量的には図 1-20(c)のように、操舵角を時間で微分した、時間に対する操舵角速度の評価区間の平均値を修正操舵量と定義した。また、図 1-20(d)は、この操舵角速度を周波数に分解した結果を示しており、1Hz 弱にある操舵の主成分に対して、修正操舵は 4~5Hz 付近でもその 30~40%と、1Hz 以上の周波数領域に、広く存在していることを明らかにした。



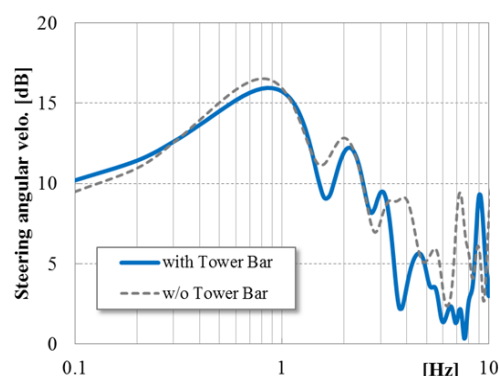
(a) 操舵角の時系列波形



(b) 走行コース



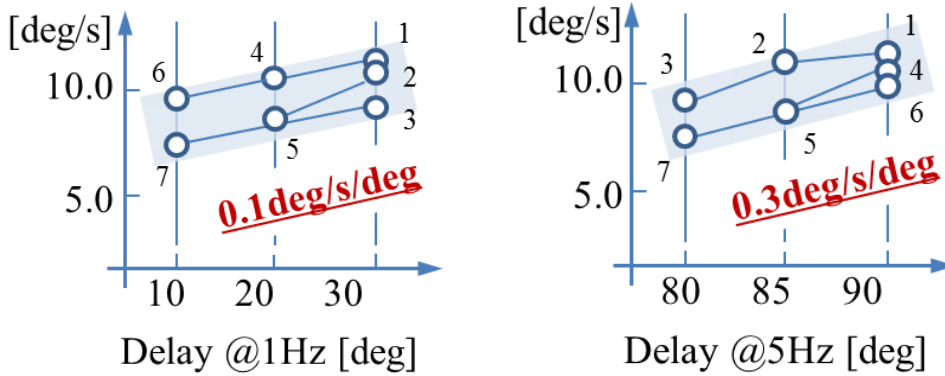
(c) 操舵角速度の時系列波形



(d) 周波数分析結果

図 1-20 カーブを走行中のドライバの修正操舵の分析結果^[58]

また、図 1-21 のように、シミュレータ実験により、操舵に対するヨーレイトの位相遅れと、図 1-20(b)を走行した時の修正操舵量の関係を明確にし、図 1-22 のように操舵に対するヨーレイトや横加速度の位相遅れを小さくすることによって、図 1-23 のように、修正操舵量を低減できることを実車で確認した。



(a) 1Hz の遅れの感度 (b) 5Hz の遅れの感度

図 1-21 ヨーレイトの位相遅れに対する修正操舵量の感度^[58]

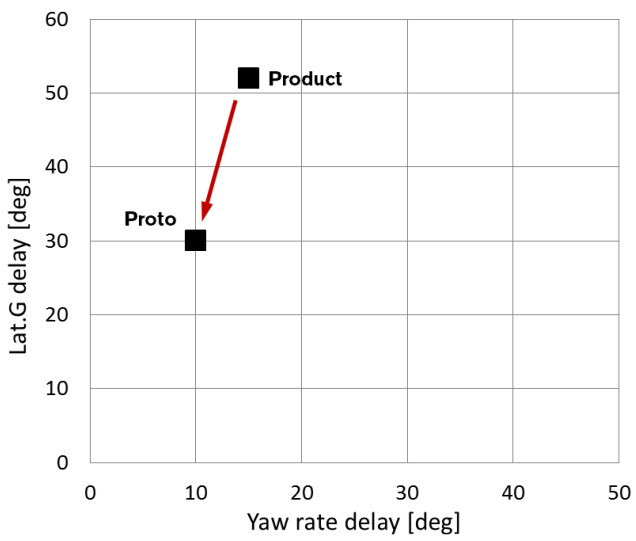


図 1-22 操舵に対する車両応答遅れの改善^[58]

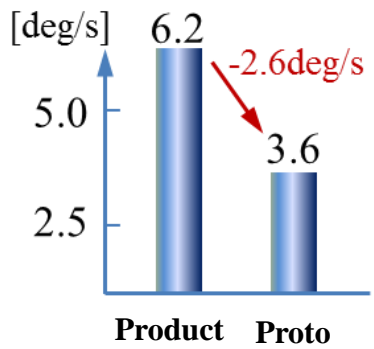


図 1-23 修正操舵量の改善値^[58]

ここでも、他の先行研究事例と同様に、操舵に対する車両の応答遅れを低減することによって、修正操舵量が低減し、ドライバーの官能評価が向上することを示しているが、一方新たな知見として、修正操舵の周波数成分が、1Hz 以上の高い領域まで存在することを定量的に示した。

1.4.2 ドライバと車両のクローズドループの関係

現在の車両の開発では、これまで紹介してきた先行研究にあるように、操舵に対する車両の応答遅れを低減することによって、修正操舵を低減し、ドライバが意のままと感じる車両を目指した開発が一般的に行われている。この手法では、応答遅れを小さくすればするほど良い、そしてその究極の目標として、応答遅れを”ゼロ”にすることが求められる。しかし、車両の応答遅れを”ゼロ”にすることは、物理的な制約や他性能とのトレードオフ要件から、現実的に極めて困難であるという課題があり、より効果的な方法が必要となっている。

車両の走行は、図 1-24 に概念的に示した通り、現在の車両の走行状態から、次にドライバが目標とした走行状態（走行ライン）に対するドライバの操舵特性による車両への操舵入力と、車両の操舵応答特性による車両挙動と走行状態の変化、そしてまたその次の走行状態に対する次の操舵、これらの繰り返しによって作られていく。

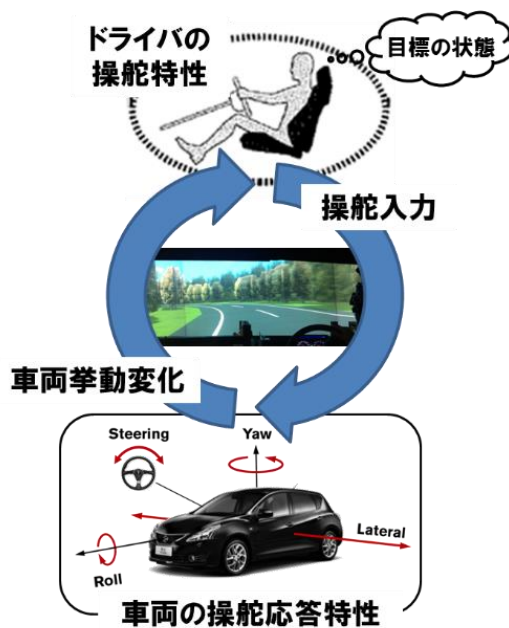


図 1-24 走行時のドライバと車両の入出力の概念図

よって、本先行研究や、これまでの車両開発で一般的に使われているドライバから車両への操舵入力に対する車両の応答遅れを低減するという、いわゆるオープンループでの特性による改善に加えて、カーブを走行中のドライバと車両のクローズドループで交わされる入出力の様子を分析し、そのループの中でドライバが意のままと感じる走行状態や、それを実現できる車両特性の要素を抽出し、具現化していくことによって、より効果的に、またより現実的な方法で、ドライバが意のままと感じる性能を向上できるようになるものと考えられる。

1.4.3 ドライバが意のままと感ずるために必要と考える2つの方法

先行研究では、ドライバの修正操舵が、1Hz以上の高い周波数領域に及ぶことが示されたが、これを1.4.2で説明したクローズドループでの走行状態での現象と照らし合わせて考察してみる。ドライバは前方に見える目標走行ラインに対して、いきなり1Hz以上の高い周波数の操舵を入れるとは考えにくい。目標とする走行ラインに対して、概ね1Hz以下のゆっくりとした操舵でその走行ラインに進入していくものと考えられる。そして、車両が目標ラインからずれるようになった場合や、ずれてしまった場合に初めて、その”ずれ”をできるだけ早く修復するために、早い操舵、1Hz以上の高い周波数の操舵が行われると考えられる。

よって、ドライバが意のままと感ずるためには、①”ずれ”を修正しようとするドライバの早い操舵に対して、車両が遅れ無く応答し、その修正を素早く完了すること、そして、②カーブの進入に向けたゆっくりとした操舵で、ドライバが目標とした走行ラインから、車両がずれることなく、それを正確にトレースできるようにすること。この2つが必要であると考えられる。

①に対応した、操舵に対する車両応答の遅れを少なくする取り組みは、これまで盛んに行われているものである。”ずれ”の修復をできるだけ早く完了させるためには、操舵に対する車両の応答を素早くすることが必要であり、多くの研究でその関係が定量的に示され、実際の車両開発でも従来から適用されている手法である。

一方、図1-25にイメージで示した、②のカーブの進入に向けたゆっくりとした操舵で、ドライバが目標とした走行ラインから、車両がずれることなく、それを正確にトレースできるようにすることについては、図1-13に代表される先行研究「ドライバにとって望ましい車両応答と操舵トルクに関する研究」が非常に近い事例ではあるが、その他の先行研究も含めて、そのメカニズムを定量的に分析した報告事例は見当たらない。この領域の解明に取り組むことによって、①の応答遅れを低減する従来の手法と組み合わせて、より効果的に、「ドライバが意のままと感ずる」性能を実現していくことに貢献できるものと考えられる。

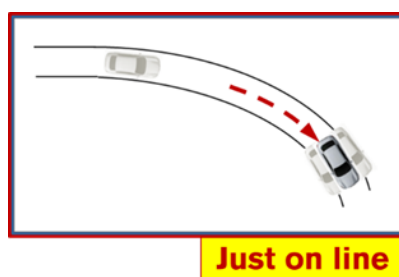


図1-25 ドライバが目標とした走行ラインを正確にトレースできる状態のイメージ図

1.4.4 ドライバが目標とした走行ラインを正確にトレースするための車両特性の仮説

本研究で取り組む、ドライバーが目標とした走行ラインを正確にトレースするための車両特性の仮説を検討する上で、関連性の高い先行研究「ドライバーにとって望ましい車両応答と操舵トルクに関する研究」について、更なる考察を行った。

本先行研究では、ヨーレイトと横加速度の応答遅れの関係に、フィーリング上良いと感じられるバランスが存在することが示されている。これは、運動性能の研究者やエンジニアの多くが定性的に認識してきたことと思われる。例えば、リアサスペンションのコーナリングパワーを意図的に下げる等によって、回答性を向上した車両は、カーブの進入などで、ヨー方向だけが変わり、横加速度の発生が遅れ、車両が内側に入って行かない（外側に膨らむ）動きになる。一方、直進性を重視するために、逆のことをした車両は、旋回時に車両のヨーレイトが発生しないまま、横加速度が先行し、走行軌跡だけが内側に入って行く、違和感のある動きになる。

ここから導かれる仮説として、図 1-26 に示したように、操舵に対するヨーレイトと横加速度の応答遅れをバランス良く設定することで、本研究の目的である、②カーブの進入に向けたゆっくりとした操舵で、ドライバーが目標とした走行ラインを正確にトレースできる、そのような車両特性が存在すると考えられる。

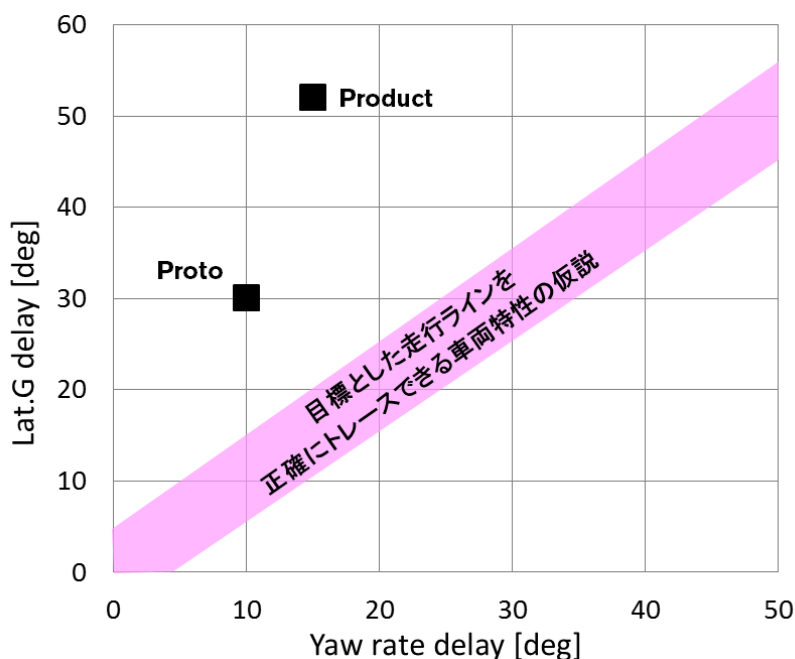




図 1-26 目標とした走行ラインを正確にトレースできる車両応答特性の仮説

1.4.5 従来の研究に対する本研究の位置づけ

従来の研究に対する、本研究の位置づけを、両者を比較する形で表 1-1 に示す。

表 1-1 従来研究に対する本研究の位置づけ

	従来研究	本研究
狙いの性能	ドライバーが目標とした走行ラインに対して、意のままに走行ができる。(共通)	
評価現象	<p>ドライバーが狙った走行ラインに対して、車両が“ずれ”そうになった場合や、“ずれ”てしまった場合に、その“ずれ”を素早く、容易に修正できる。</p> 	<p>ドライバーが狙った走行ラインに対して、少ない“ずれ”で、正確に、トレースできる。</p> 
操舵周波数	概ね1Hz以上の速い操舵	概ね1Hz以下のゆっくりとした操舵
評価指標	修正操舵量, 官能評価	走行軌跡乖離量, 官能評価
性能を向上する車両特性	操舵に対する車両応答, ヨーレイトや横加速度などの遅れを小さくする	操舵に対する車両応答, ヨーレイトや横加速度などの遅れをバランス良く設定する(仮説)
ドライバー操舵特性把握の要否	不要 ドライバー特性に関わらず車両の遅れは小さい方が良いと想定	必要 ドライバーの操舵特性を把握した上で、それに合わせた車両特性を設定

従来研究, 本研究ともに, ドライバが目標とした走行ラインに対して, 意のままに走行ができることを狙ったものである。

従来研究では, ドライバが目標とした走行ラインに対して, 車両がずれそうになった場合や, ずれてしまった場合に, 概ね 1Hz 以上の早い操舵によって, その“ずれ”を, 素早く容易に修正できることを評価している。官能評価と並行し, 定量的な評価指標として修正操舵量を設定し, その修正操舵量を低減するために, 操舵に対する車両のヨーレイトや横加速度などの遅れを小さくする取り組みがなされている。その応答遅れは望小特性であるため, 必ずしもドライバーの操舵特性を明確にする必要はない。

一方, 本研究では, ドライバが目標とした走行ラインに対して, 概ね 1Hz 以下のゆっくりとした操舵で, それを正確にトレースできることを評価する。定量的な評価指標はカーブでの目標軌跡に対する走行軌跡の乖離量を設定し, その乖離量を小さくするための仮説として, 操舵に対する車両応答, ヨーレイトや横加速度などの遅れをバランス良く設定することに取り組

む. 目標とした走行ラインに対する車両の走行軌跡は, 1.4.2 で説明したドライバと車両のクロ
ーズドループによって決まるため, ここでは, ドライバの操舵特性を把握する必要がある.

今回, 従来研究のように, 単に操舵に対する車両の応答遅れを低減するだけでなく, 本研究
で立案する, 操舵に対する車両のヨーレートや横加速度などの遅れの適切なバランスを保ちな
がらその応答遅れを低減することによって, より効果的に, 「ドライバが意のままと感じる」性
能を実現できる車両の操舵応答特性を明確にすることを目標とする.

1.5 本研究の目的

意のままに操れる車両は、ドライバに走る楽しさや快適性を提供するだけでなく、走行中のふらつきや運転の負担と疲労を軽減し、事故を未然に防ぐことにも貢献できる。そういった車両を実現するためには、車両そのものの性能を向上させるだけでは不十分であり、ドライバの操作特性を把握した上で、それに合わせた車両の特性としていく必要がある。

本研究では、車両の基本的な運動である「走る」「曲がる」「止まる」の中で、ドライバの操舵入力に対する車両のヨーレイト、横加速度、ロール角等、多くの物理現象を考慮する必要があるために、そのメカニズムがより複雑であり、解明が期待されている「曲がる」に着目し、「ドライバが意のままと感じる車両の操舵応答特性」について新たな仮説を解明する。

具体的なシーンとして、それら複雑なメカニズムの要素が含まれた上で、最もシンプルなシーンとなる、「フラットな路面を、一定速走行で、直進から一定半径のカーブへ進入するシーン」を設定、従来の研究手法である操舵に対する車両のヨーレイトや横加速度の遅れ低減による性能向上に対して、それを更に効果的なものとする、ヨーレイトや横加速度等の遅れの適切な相互関係のバランスを、定量的に解明することを目的とする。

また、従来研究では、ドライバが目標とした走行ラインに対する“ずれ”を、素早く修正することが目的であり、操舵に対する車両の応答遅れを可能な限り小さくすることが望ましいと考えられるため、必ずしもドライバの操舵特性を把握する必要はなかった。しかし、本研究では、カーブの進入でドライバが目標とした走行ラインを正確にトレースできる車両特性を特定するために、ドライバと車両のクローズドループで交わされる入出力の様子を正確に把握する必要がある。そのためには、カーブを走行中のドライバの操舵角波形を精度よく予測できるドライバの操舵特性を定量的に把握する必要がある。

以上、本研究の目的を以下に整理する。

- カーブを走行中のドライバの操舵角を精度よく予測できるドライバ操舵特性を把握する。
- ドライバが目標とした走行ラインを正確にトレースできる車両応答特性、操舵に対するヨーレイト、横加速度などの遅れの適切な相互関係のバランスを、定量的に解明する。
- 上記の車両特性とすることで、従来手法である車両応答の遅れの低減と合わせて、より効果的に「ドライバが意のままと感じる」性能を向上できることを検証する。

1.6 本研究の前提条件

1.6.1 研究に用いた評価コース

図 1-27 で示す，欧州郊外路を模した車両開発専用の評価コース（以下，「実験評価コース」と呼ぶ）を使用し，80kph 一定速走行での評価を行う．中でも，ドライバが目標とした走行ラインのトレース性評価として，スタートライン通過後の，直進から最初の右カーブ（70R）へ進入するシーンに着目する．

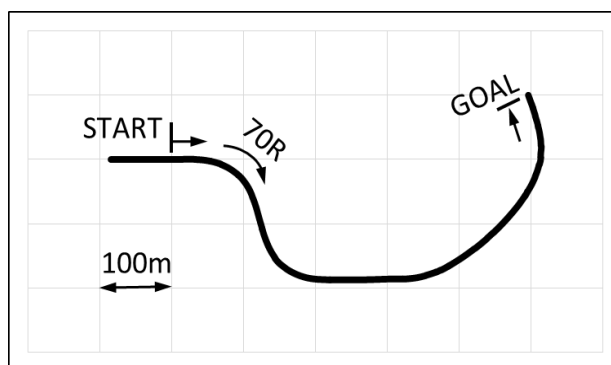


図 1-27 研究の対象とした評価コース

1.6.2 研究の対象とした車両特性

操舵に対する車両応答特性の対象として，図 1-28 で示した，従来の研究でも通常取り扱われている車両の平面運動であるヨーレイト，横加速度，そして旋回中に発生する車両挙動として，ドライバの操舵特性に影響を及ぼすと考えられるロール角を加えた，3つの操舵応答特性を取り扱う．操舵応答特性には，操舵に対する応答ゲインと応答遅れの2つがあるが，応答遅れが，これまでの多くの先行研究でも，ドライバの性能評価に大きな影響を及ぼすことが報告されている^{[19][21][23]}ことから，本研究では図 1-29 に示したような3つの特性の操舵に対する応答遅れ（1Hz 位相遅れ角）に着目することとする．

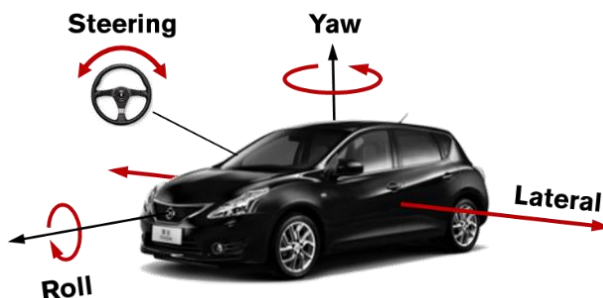


図 1-28 対象とする車両挙動

操舵周波数応答特性 (位相遅れ[deg])

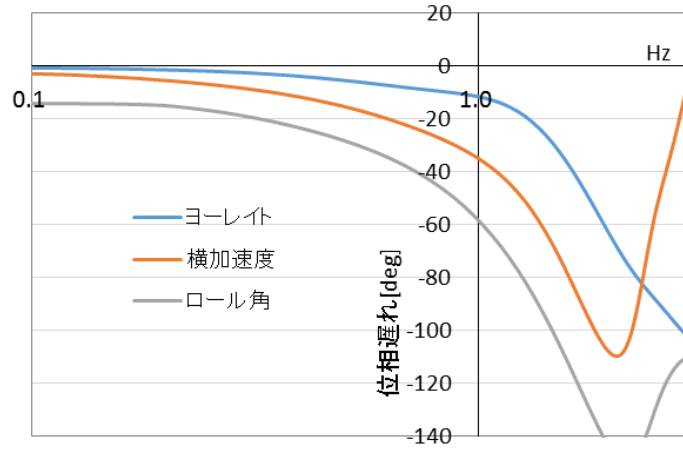


図 1-29 対象とする応答特性

また、車速の 80kph というのは、欧州郊外路での一般的な車速であるということに加えて、図 1-30 に示したように、服部らの先行研究、「人間の感受性を考慮した 4 輪アクティブステア制御」^[59] の中で解明されている、走行中のヨー方向と横方向の車両挙動が、ドライバの感度として同程度の割合で発生し得るという意味で、現象がより複雑になると考えられる車速帯という観点も合わせて選定したものである。

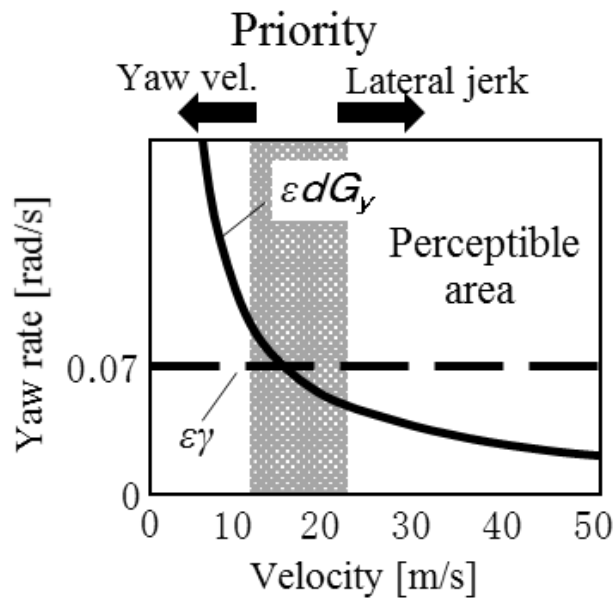


図 1-30 感度の優先度^[59]

1.6.3 研究に用いた評価車両

研究における仮説を検討する上での性能の基準車，そして新たに立てる仮説を検証する車両として，これまで，Cセグメントハッチバック車を使って，基本性能の追求という従来手法によって，その性能をセグメントトップレベルまで向上させてきた試作車両を用いる．以降，本研究の中では，この従来手法による性能向上試作車両を「ベース仕様」と呼ぶ．

このベース仕様の量産車からの性能向上のメカニズムや仕様については，5.3「仕様を実現する検証車両の設計・製作」でその詳細について述べるが，概して言うと，図 1-31 のように，フロントとリアの等価 CP を大幅に向上させることによって，図 1-32 のように，操舵に対するヨーレイトと横加速度の応答遅れを低減し，その結果として図 1-33 に示したように，修正操舵量を低減し，官能評価の向上を実施してきたものである．

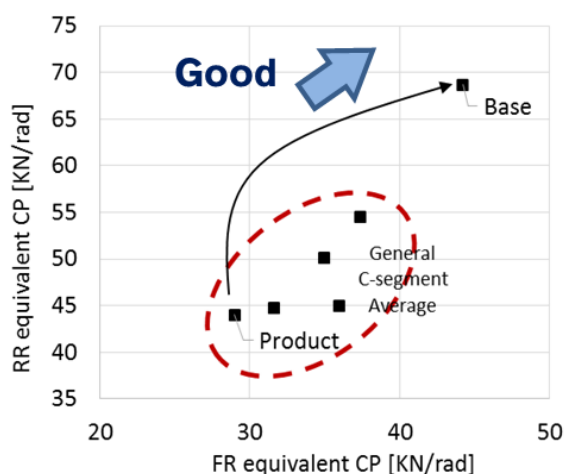


図 1-31 FR/RR 等価 CP の向上

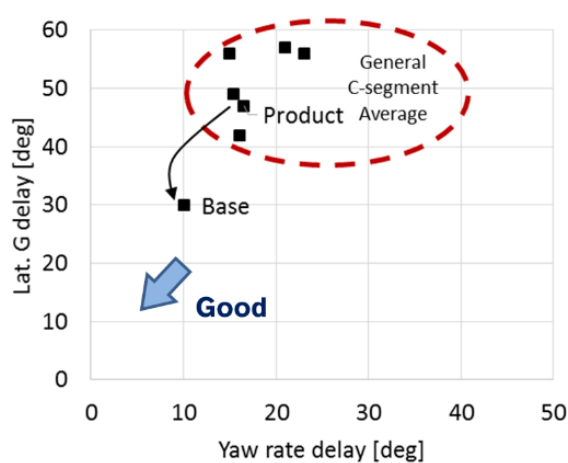


図 1-32 車両応答遅れの改善

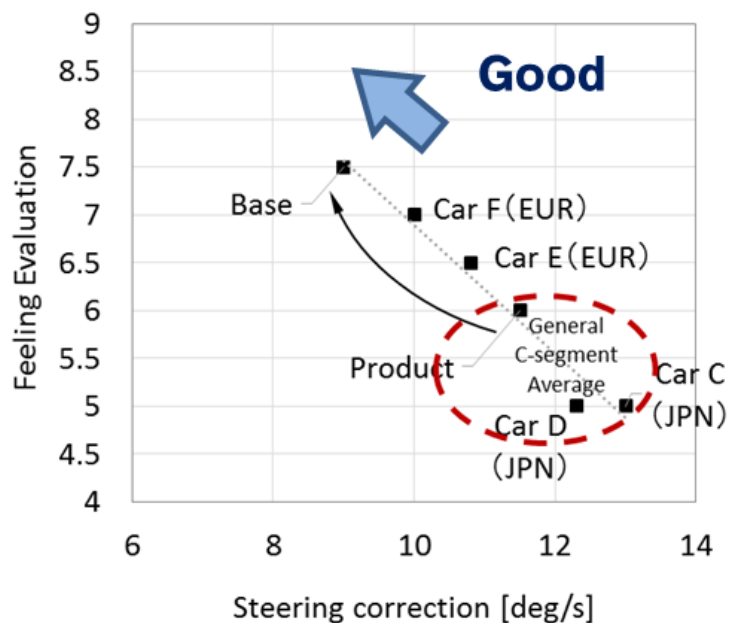


図 1-33 修正操舵量の低減と官能評価の向上

従来手法による基本性能の追求という観点では、この特性で究極の目標と言える、操舵に対するヨーレイト、横加速度の応答遅れ”ゼロ”に向けた、更なる改善が求められているが、応答遅れをゼロにすることは、トレードオフを含めたモノづくりの要件からその実現が極めて困難であるため、本研究では、より効果的に、「ドライバーが意のままと感じる」、つまり図 1-33 の官能評価を向上できる、車両応答特性を解明していくことに取り組む。

1.7 本論文の構成

本論文は全7章からなる。以下にその構成を説明する。次項 図 1-34 に、その流れを示す。

第1章「序論」においては、本研究の背景として車両運動性能の発展、現状の課題と先行研究の状況、これらに基づいた本研究の目的、前提条件、そして論文の構成等を述べた。また、目標達成に向けた以下2つの仮説を述べた。「操舵に対する車両のヨーレイト、横加速度、ロールの遅れを、ある適切なバランスで設定することにより、ドライバは目標とした走行ラインを正確にトレースできる。」「その適切なバランスの特性とすることで、従来の応答遅れ低減による性能向上と合わせて、より効果的に「ドライバが意のままと感じる」性能を向上できる。」

第2章「ドライバ操舵特性の定量的把握」では、カーブを走行中の車両挙動に対するドライバの操舵のメカニズムを分析し、時間に対する操舵角を精度よく再現できるドライバモデルの構築について述べる。また、本章及び第4章では、車両特性を大きく変更することができるドライビングシミュレータを活用したが、その実験環境の構築についてもここで述べる。

第3章「ドライバが意のままと感じる車両操舵応答特性の算出」では、第1章で立てた定性的な仮説「操舵に対する車両のヨーレイト、横加速度、ロールの遅れを、ある適切なバランスで設定することにより、ドライバは目標とした走行ラインを正確にトレースできる。」に対して、第2章で定量的に把握したドライバの操舵特性を使って、その「適切なバランス」を解析により定量的に算出する。

第4章「ドライバが意のままと感じる車両操舵応答特性のDS検証」では、第3章で定量的に算出した「ドライバが目標とした走行ラインを正確にトレースできる操舵応答特性」の仮説について、DS実験により検証する。また、本特性とすることで、従来の応答遅れ低減による性能向上と合わせて、より効果的に「ドライバが意のままと感じる」性能を向上できることを、修正操舵量の計測と、官能評価により検証する。

第5章「ドライバが意のままと感じる車両操舵応答特性の実車検証」では、第4章と同じく、第3章で定量的に算出した仮説の特性を、実際に具現化した実車両を使って検証する。その検証実車両の設計・製作についても合わせて述べる。従来の2輪モデルに対して、タイヤの横剛性による車両応答への影響を考慮できる要素を加えた新たな車両モデルを定義し、目標の操舵応答特性を実現できる仕様を選定する。

第6章「考察」では，研究の目的の対する検証実験で得られた結果に対する解釈，制約条件や発展性等，今後の運動性能のあるべき姿について述べる．また，今回検証された官能評価結果の裏付けとして，脳計測による分析結果を合わせて紹介する．

最後に，第7章「結論」において，本研究で得られた成果をまとめ，結論を述べる．

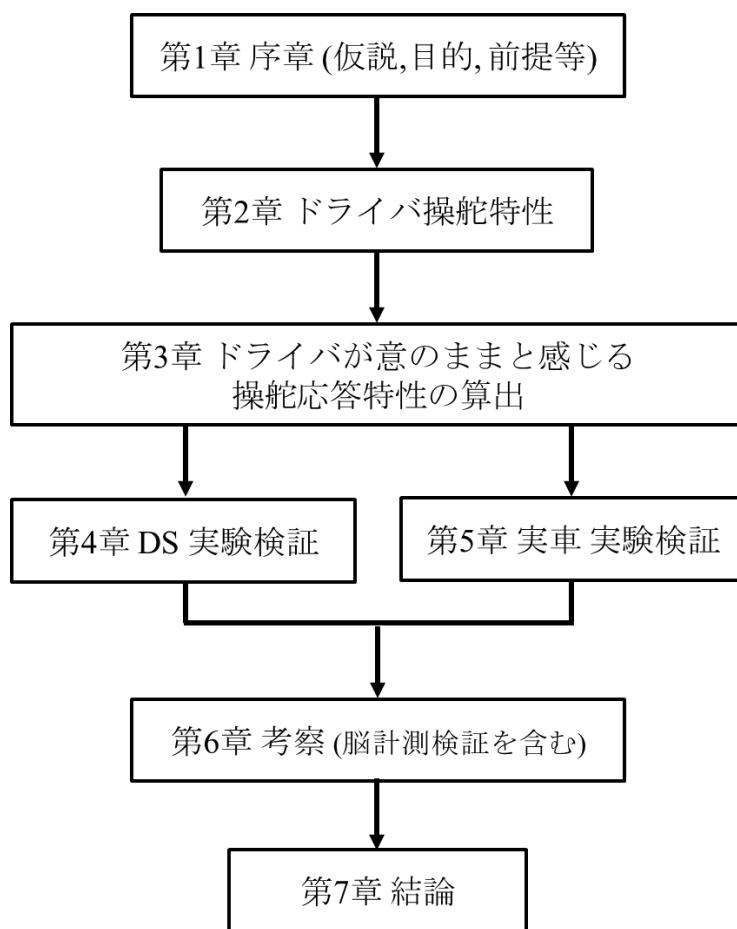


図 1-34 本論文の構成の流れ

第2章

ドライバ操舵特性の定量的把握

2.1 本章の目的

車両の走行は，現在の車両の走行状態から，次にドライバが目標とした走行状態（走行ライン）に対するドライバの操舵特性による車両への操舵入力と，車両の操舵応答特性による車両挙動と走行状態の変化，これらの繰り返しによって作られていく．ここでは，この流れの中の，ドライバの操舵特性を定量的に把握することを目的とする．具体的には今回定義した実験評価コースを，様々な操舵応答特性違いの車両で走行した場合でも，ドライバの時系列操舵角波形を精度よく再現できるドライバモデルを構築することを目標とする．

本研究では，この第2章「ドライバ操舵特性の定量的把握」及び第4章「ドライバが意のままと感じる車両操舵応答特性の DS 検証」において，車両特性の変更幅の自由度や効率面で，実車実験に対して圧倒的に有利な，ドライビングシミュレータ（DS）を活用した．ここでは DS を使った操安性評価を実施するための実験環境構築についても合わせて述べる．

ドライバの操舵特性は，初心者から熟練者，性別や年齢の違いから，様々な差があると考えられるが，研究では，それらのバラツキが比較的少ないと考えられる，普段から通勤等で車を運転している 30 代～40 代の男性 5 名の被験者を対象に，DS 上で 3 つの車両特性を変更した場合の走行実験を行い，その時系列操舵角波形を精度よく再現できるドライバモデルを定義する．

2.2 本研究で定義したドライバモデル

ドライバモデルとして、今回着目した3つの車両挙動である、ヨーレイト、ロール角、横加速度のそれぞれに対応した3つのモデルを定義した。

2.2.1 前方注視点誤差モデル

1つ目として、ヨー方向の車両挙動が高い寄与を持ち、現在最も一般的に用いられている前方注視点誤差モデルを適用した。図2-1(a)(b)に示したように、ドライバはその前方1~2秒先の点（前方注視点）^[30]と目標走行軌跡との偏差（前方注視点誤差）に応じた操舵角を、ある遅れ時間を持って出力するというもので、今回、図2-1(c)に示したように、その誤差の入力に対して、PID制御とむだ時間で、操舵角を出力するようにドライバモデルを設定した。本研究では、一定車速、一定の曲率という安定した条件であるため、前方注視点は、1.5秒先に固定することとした。

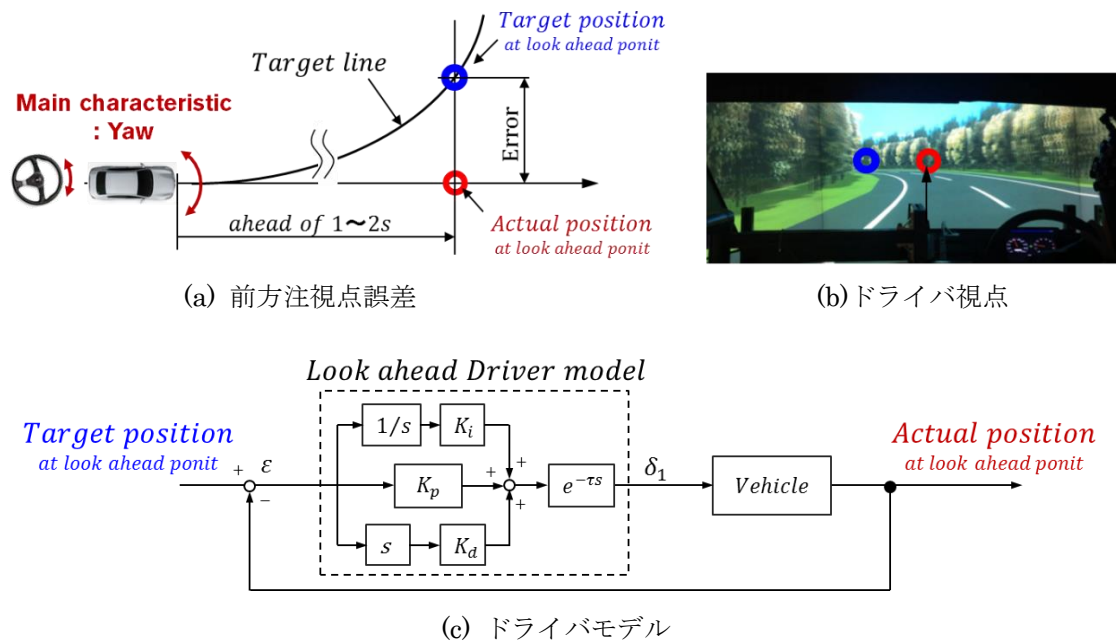


図 2-1 前方注視点誤差モデル

2.2.2 ロールフィードバックモデル

2つ目は、本研究の中で新たに確認されたロール挙動に対応したドライバモデルである。ドライバは、図 2-2(d)のイメージ図で示したように、カーブ進入に伴って発生するロール角に応じて、その操舵角を増減させるという習性があることが、ロール特性のみを変更した DS 実験で確認された。図 2-2(a)は、シミュレータ上で実験評価コースを再現し、計測された操舵角の時系列波形を示したものであり、図 2-2(b)は、計測開始地点通過後から最初の右カーブへ進入していく 2 秒間を拡大して表示したものである。グラフの中の 3 本のラインは、ロール特性のみ異なる仕様での計測結果であり、図 2-2(c)は、同じ時間軸でロール角の大きさを示したグラフである。両者を比較すると、ロールの大きさと操舵角の大きさの変化に相関があることが確認できる。本研究では、図 2-2(e)に示したような、ロール角に対する比例制御とむだ時間から操舵角を出力するモデルを、ロールフィードバックモデル（以下、ロール F/B モデル）として設定した。

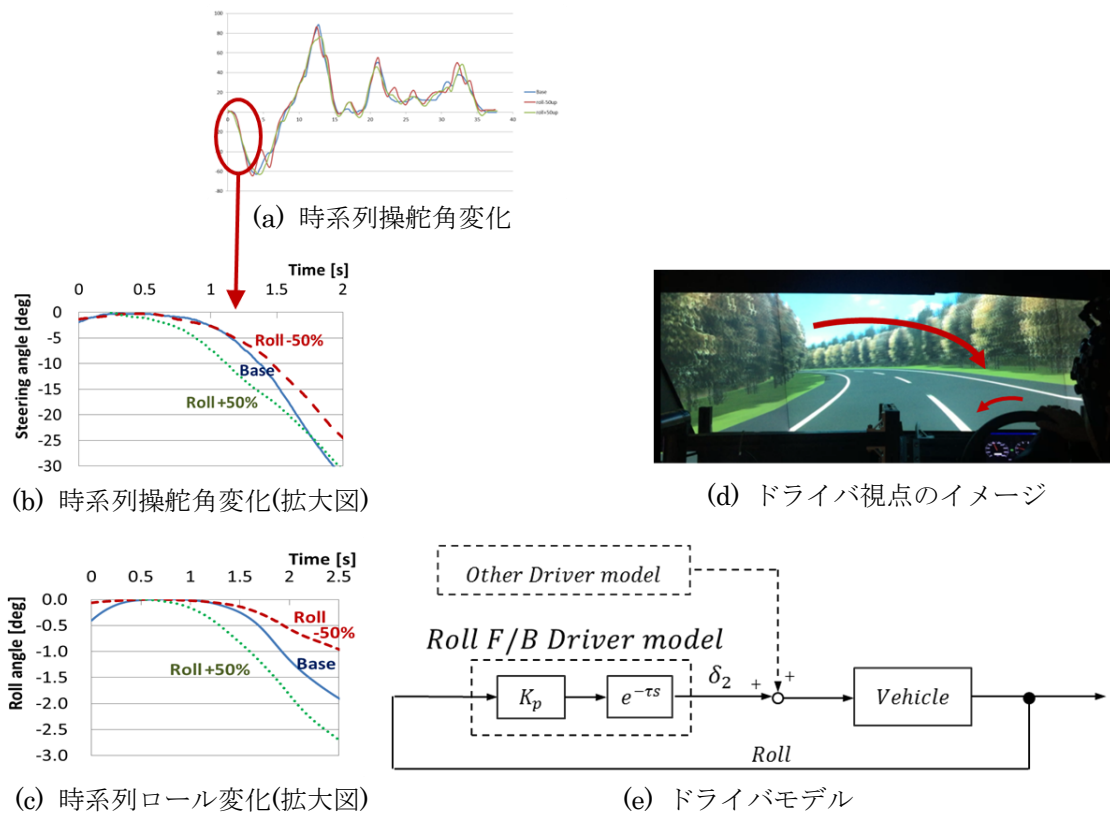


図 2-2 ロールフィードバックモデル

2.2.3 走行軌跡誤差モデル

3つ目は、主にカーブ進入後の横方向の挙動に対応したドライバモデルである。ドライバは、図 2-3(a)(b)に示したように、現在走行している自車位置の車線中央などの目標軌跡からの横方向の偏差（以下、走行軌跡誤差 or Line trace error）を、減らすように操舵を行うというもので、ここでは前方注視点と同じく、図 2-3(c)のように、その誤差の入力に対して、PID 制御とむだ時間で、操舵角を出力するモデルを、走行軌跡誤差モデル（Line trace model）として設定した。

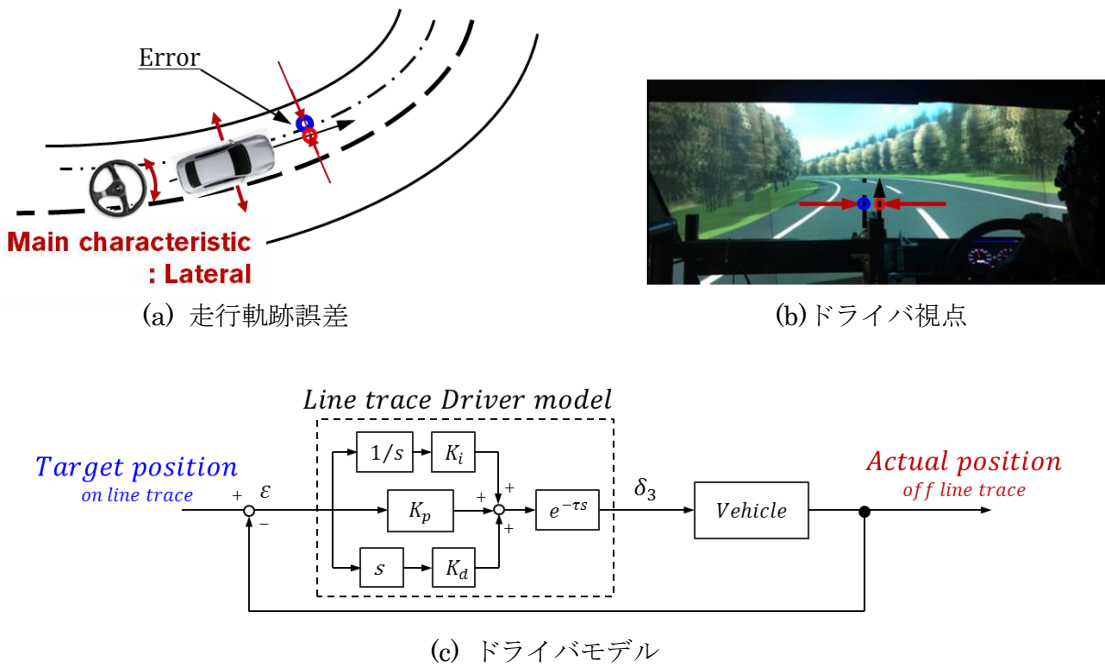


図 2-3 走行軌跡誤差モデル

2.2.4 ドライバ - 車両モデルの定義

今回定義した3つのドライバモデルは、前方注視点誤差、ロール角、走行軌跡誤差、それぞれの独立した値に対する、ドライバの操舵特性として定義したものである。よって、それぞれのモデルから出力される操舵角の和が、ドライバの操舵角となり、車両のモデルに入力されるという、下記に示した図2-4のようなドライバ-車両モデルを定義した。

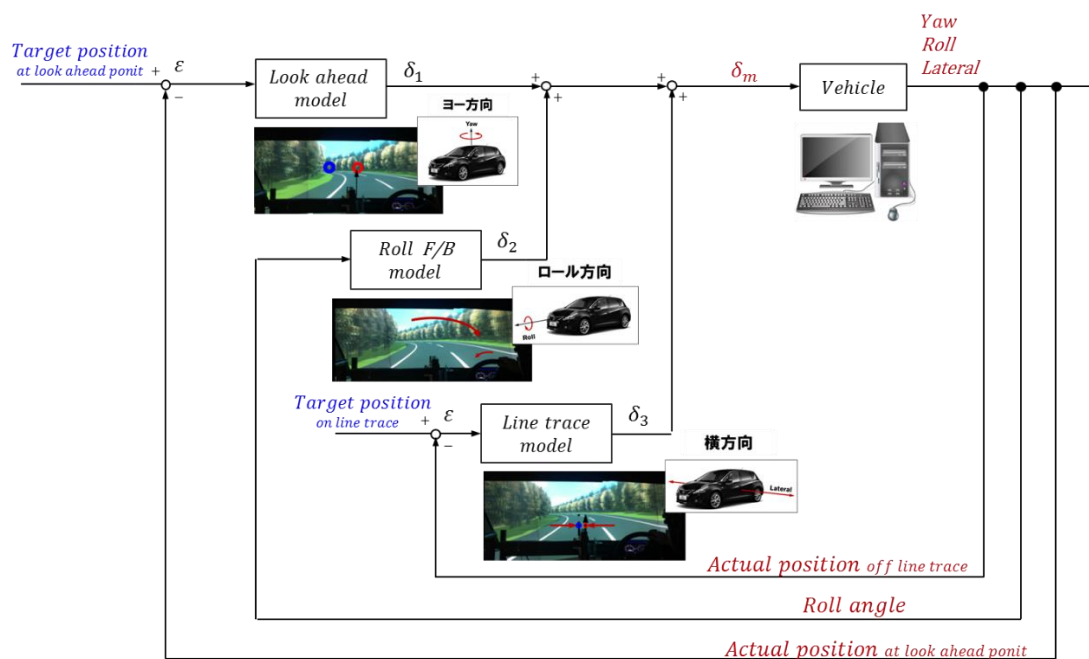


図 2-4 定義したドライバ - 車両モデル

2.3 ドライビングシミュレータ実験環境の構築

2.3.1 操舵力特性の実車再現性向上

今回の車両特性変更の対象からは外しているものの、操舵反力特性は、ドライバが車両を操縦する上で、最も重要な特性の一つである。よって、DS にベース車両の実験操舵反力特性の織り込みを検討した。図 2-5 に、80kph 一定速度で 0.3Hz のスラローム走行を実施した時の、ベース仕様の操舵反力特性の実車計測結果を、横軸に操舵角、縦軸に操舵反力として示した。

実車ででの操舵反力は、主にステアリングラック、サスペンションキングピン周りのフリクションの影響により、切り増しと切り戻し側に操舵反力の差が確認される。DS では、ステアリングホイール直下に直接取り付けられた反力モータで、操舵反力を再現するため、この実車でメカニカルなフリクションが付加されず、また、反力モータの制御によって、このフリクション要素を再現することができないため、図 2-6 のグラフの中の赤線で示したような、切り増しと切り戻しの平均値となる操舵反力特性を DS に織り込んだ。

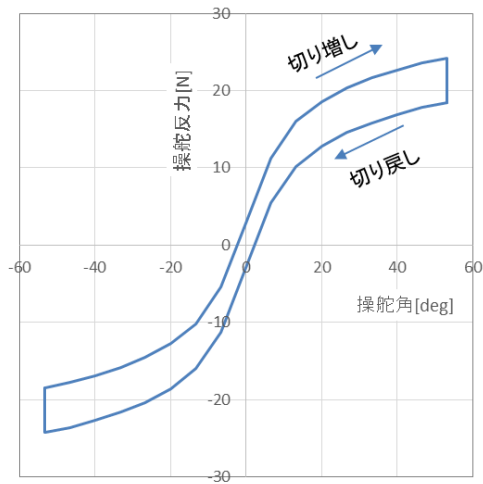


図 2-5 ベース仕様の操舵反力実車計測値

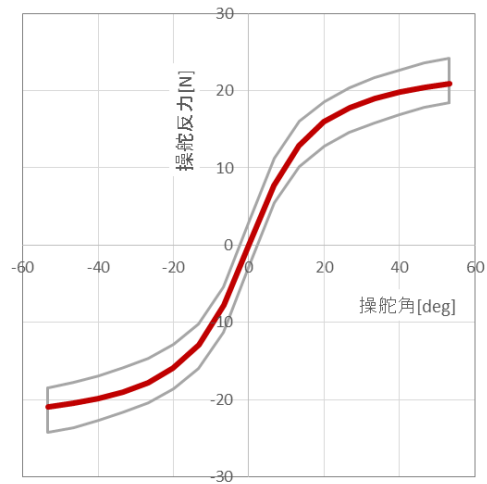


図 2-6 今回 DS に組み込んだ操舵反力特性

また、本特性の DS への織り込みにおいては、その通信周波数を 10Hz から 120Hz に上げることによる、操舵反力の振動の解消と合わせて、その実車再現性を向上させた。図 2-7 は、80kph 一定速の直進走行から、0.5s で 10deg の操舵角入力を与えたときの車両挙動と操舵反力を、横軸を時間として示したものである。赤の実線が操舵反力を表しており、図 2-7(c)の実車のデータに対して、シミュレータの改善前後（図 2-7(a)から(b)）で、その再現性が向上している様子を確認することができる。

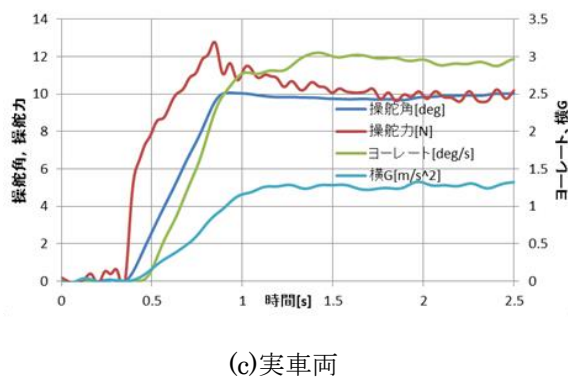
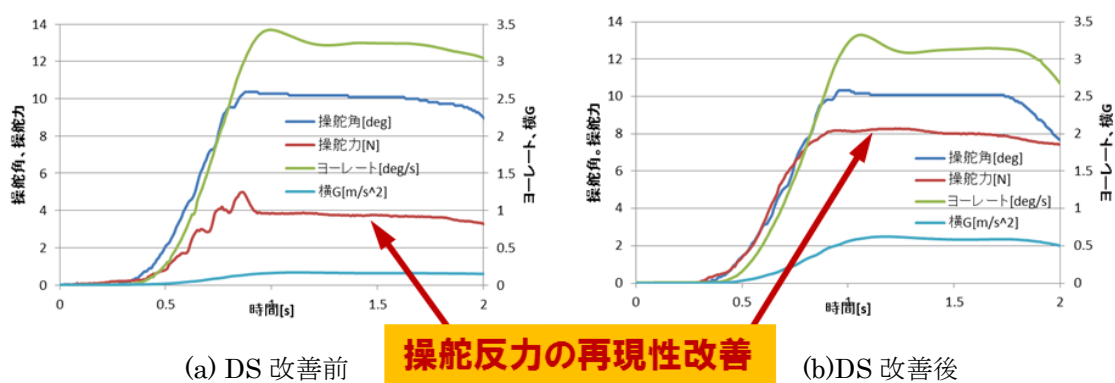


図 2-7 操舵反力特性の実車再現性向上の確認結果

2.3.2 操舵応答特性の実車再現性向上

DSはその定格作動範囲の中で、さまざまな走行シーンに対応するために、実際に発生するロール角や横加速度を10~20%（スケールファクタ0.1~0.2）程度に圧縮して再現することが一般的である。今回、設定した実験評価コース80kph一定速走行を前提に、その実車再現性を最大限確保することを目的に、DSの可動ストロークの限界に合わせて、ロール角で0.8、横加速度で0.4まで、スケールファクタ高めた。

図2-8は、操舵力と同じく、80kph一定速の直進走行から、0.5sで10degの操舵角入力を与えたときの車両挙動を、横軸を時間として示したものであり、今回対象としている3つの車両応答特性のうち、横加速度、およびロール角において、その再現性の向上が確認できた。

なお、今回用いたDSでは、ヨーレイトの挙動を前方の映像装置のみで再現することから、動揺装置のストロークなどの制約を受けないため、初期設定で十分な実車再現性が確認されている。

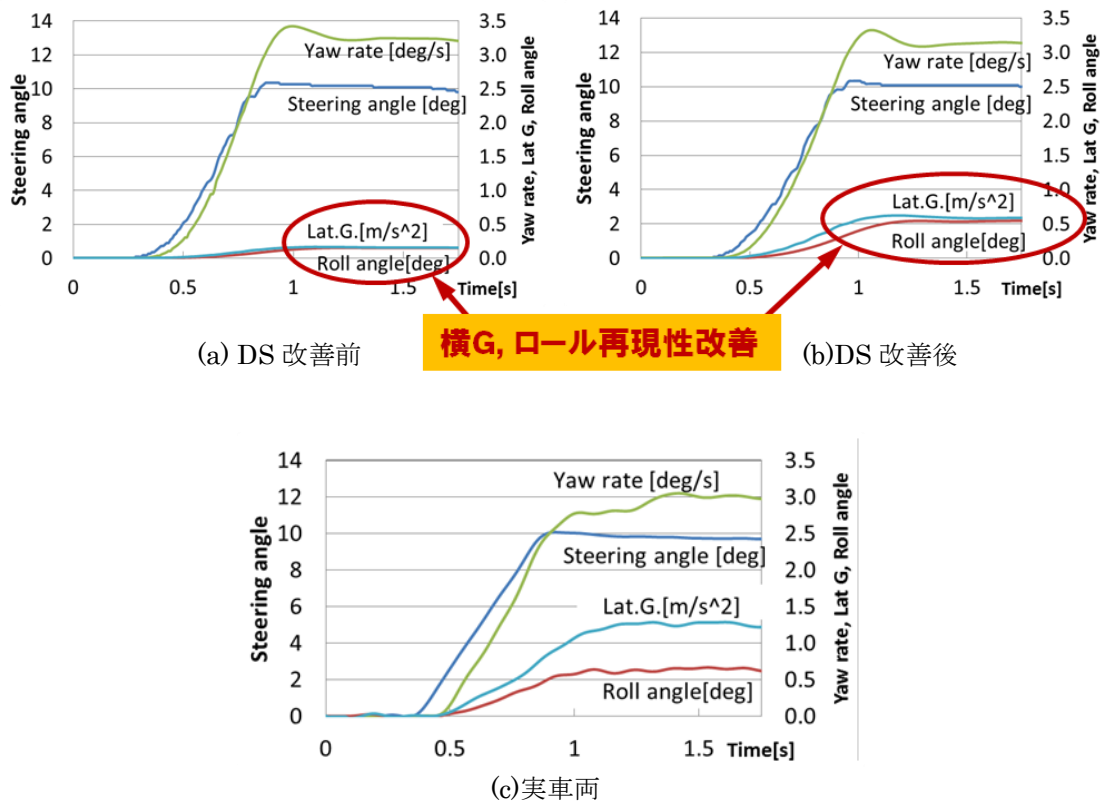


図2-8 横加速度とロール角の実車再現性向上の確認結果

2.3.3 実験評価コース走行時の実車再現性確認

車両の操舵応答特性の再現性を改善した DS を使って、実験評価コースでの再現性検証を実施した。操安性の評価が可能なライセンスを持つカーメーカの 40 代男性のテストドライバを被験者とし、DS での計測結果と実車での計測結果を比較した。車両はともにベース仕様とし、実験評価コースを 80kph 一定速でカーブに沿ってできるだけ車線中央を走行するようなタスクを与え、その操舵角を N=5 試行回ずつ計測した。図 2-9(a)に、DS で計測された操舵角を、図 2-9(b)に、実車で計測された操舵角を、いずれも横軸を時間として示した。

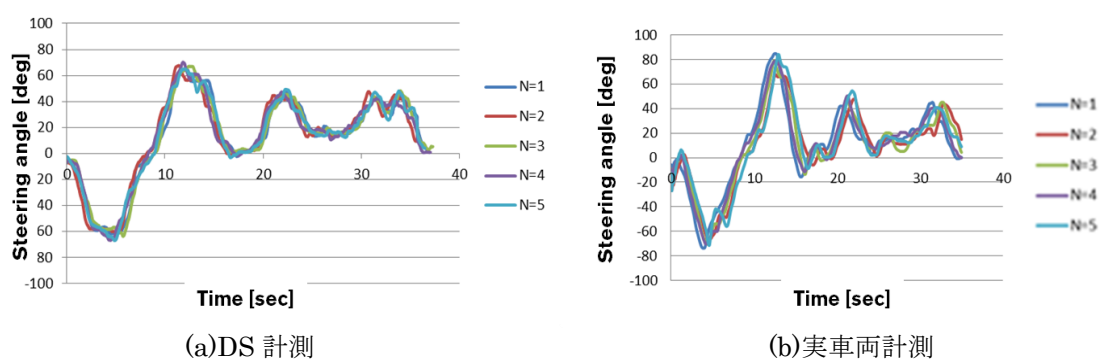


図 2-9 評価コースを走行時の操舵角波形 DS と実走行比較

舵角の大きい領域では、主に横加速度の再現性不足が要因と考えられる両者の乖離が見られるが、今回着目している、カーブへの進入付近の操舵角の比較的小さい領域では、概ね両者は類似した波形となっていること、また、テストドライバから、改善した DS は、実車を走行している感覚に非常に近い。とのコメントも得られたことから、今回改善した DS を使って、研究を進めることとした。

2.3.4 車両特性がドライバの操舵角に与える影響の確認

本研究では、カーブの進入において、ドライバが目標とした走行ラインを正確にトレースするための車両の操舵応答特性を解明していく。これは、ドライバは走行中の車両応答の情報をインプットとして、その操舵を変化させるという前提に基づいている。今回、構築した DS を使ってこの前提を大まかに確認した。DS で再現したベース仕様から、操舵反力、ロール角、横加速度の応答ゲインをゼロにした場合に、カーブに沿って走行しようとするドライバの操舵角波形が変化する様子を確認した。

実験は、2.3.3 と同様の被験者、条件で実施した。それぞれの仕様で十分な練習走行を実施した後、N=5 試行回の操舵角データを計測した。図 2-10 は、その操舵角を時系列で示したものであり、図 2-10(a)がベース仕様、図 2-10(b)がベース仕様に対して操舵反力をゼロとしたもの、図 2-10(c)が同じくベース仕様に対して DS のロールの動きをゼロとしたもの、図 2-10(d)は、(c)に対しさらに DS の横方向の動きをゼロとしたものである。

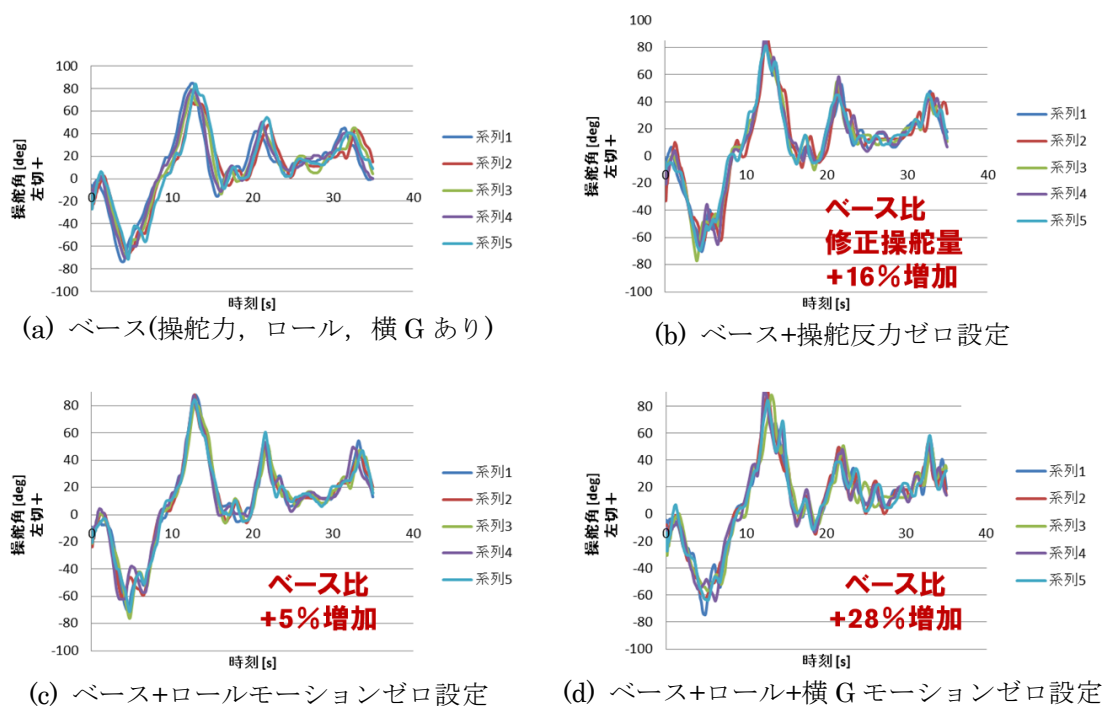


図 2-10 車両特性違いによるドライバの操舵角波形の変化

いずれの場合でも、その操舵角波形が大きく変化することが確認された。また、操舵角波形が乱れる方向、すなわち修正操舵量が増加する方向に変化していることから、ドライバはこれらの情報を有効に活用して、安定して滑らかな操舵を行っていると考えられる。

なお、今回新たな発見として、まったくロールをさせない場合に、予想に反して、操舵角の乱れが大きくなる現象が確認された ((a)→(c))。これについては、2.2.2.で述べた通り、ドライバは、ロールに合わせて操舵を増減する習性があることが分かり (これくらいのロールではこれくらい操舵をするべきという内部モデルを持っていると考えられる)、ロールを発生させない場合にはその分操舵角を抑えてしまうことによって、カーブで車両が外側に膨らんでしまい、その後素早い追加の操舵が必要になっていることが、操舵角波形からも確認できる。

2.3.5 フロントウィンドの窓枠の有無の操舵角への影響確認

今回の実車再現性の向上においては、主に車両の操舵応答特性を合わせることを中心に実施してきたが、その他の実車と DS の乖離要因として、ドライビングポジション、エンジン音、視界などがあげられる。ここでは、車両応答特性以外の要因として、本研究への影響が大きく、また実車との乖離代が特に大きかった視界の改善の取り組みを行ったので、紹介する。

カーブに沿って走行するドライバーにとって視界が最も重要な要素の一つであることは言うまでもない。ドライバーは前方の視界から見える情報を次の操舵にフィードバックしていると考えられる。中でも、車線に中央に対して、自車が、左や右に寄りすぎたりしないように、調整しながら走行していると考えられる。そして、その調整にはフロントウィンドの窓枠と前方の景色との関係が使われていると考える。使用した DS の初期仕様には、実車を十分に再現した窓枠がなかったため、今回、研究の前提としている C セグメント車両の窓枠寸法を計測し、それと同等の寸法の窓枠を DS 側に追加して、さらに実車再現性が向上することを確認した。

実験は、2.3.3 と同様の被験者で実施した。窓枠なし仕様と窓枠あり仕様、それぞれの仕様で十分な練習走行を実施した後、N=5 試行回の操舵角データを計測した。図 2-11 は操舵角波形の変化を示したものであり、図 2-11(a)の窓枠なし仕様に対して、図 2-11(b)の窓枠あり仕様では、細かい修正操舵が増加していることが確認できた。これは、窓枠ありの方が、自車位置の車線中央に対するズレを感知しやすく、車線に沿って、より細かく修正をしながら正確に走行しようとするためと考えられる。官能評価でも、窓枠を追加することによって、実車のフィーリングに近づくことが確認された。

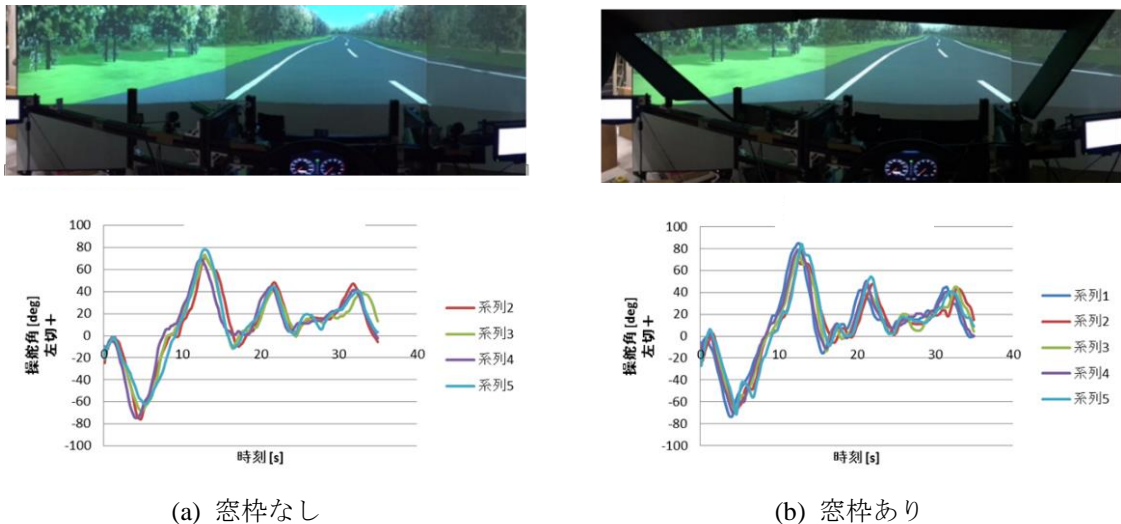


図 2-11 フロントウィンド窓枠有無違いによる操舵角波形の変化

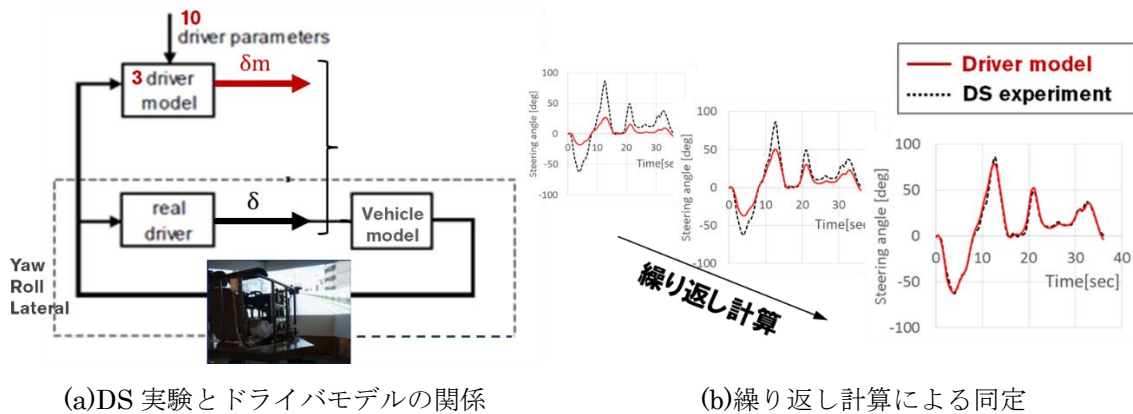
2.4 ドライバモデルパラメータの同定

2.4.1 ドライバモデルパラメータ同定のための実験と同定方法

本実験は、東京大学ライフサイエンス委員会倫理審査専門委員会の審査を受け、承認を得た内容であり、実験参加者からインフォームドコンセントを得た上で実施した。

実験は普段から通勤等で車を運転している30代～40代の男性計5名を被験者にして実施した。表2-1にある、ベース仕様と、今回着目している3つの車両特性のゲインと位相遅れを変化させた、全13仕様でのデータ取得とドライバモデルのパラメータ同定を実施した。実験評価コースを、80kph一定速で、カーブに沿ってできるだけ車線中央を走行するようなタスクを与えた。十分な練習走行の後、それぞれの仕様で、走行中の操舵角とヨーレート、横加速度、ロール角の車両挙動データを取得した。

図2-12(a)(b)のように、シミュレータ実験で計測された実際のドライバの操舵角と、同時に計測された車両挙動データを入力としたドライバ操舵モデルから出力される操舵角が一致するように、モデルのパラメータを徐変させた繰り返し計算を行い、その値を同定した。



(a)DS 実験とドライバモデルの関係

(b)繰り返し計算による同定

図 2-12 ドライバモデルのパラメータ同定方法

表 2-1 ドライバモデルパラメータ同定を行った仕様

Base+	Gain		Delay in phase	
	Yaw rate	-50%	+50%	+20deg
Roll angle	-50%	+50%	-40deg	-20deg
Lateral G.	-100%	-50%	-20deg	+20deg

2.4.2 ドライバモデルパラメータ同定結果

図 2-13 に、あるドライバのパラメータ同定を完了したドライバモデルでの時系列操舵角変化を、実測結果と比較して示す。赤線がドライバモデルによる再現結果であり、黒線の実測の操舵角波形である。ベース仕様及び表 2-1 で示したすべての仕様において、概ね精度良く再現できることが確認できた。今回、計 5 名の被験者のパラメータ同定を実施したが、いずれも操舵角誤差平均が 2%以下となる、高い再現性が確認できた。

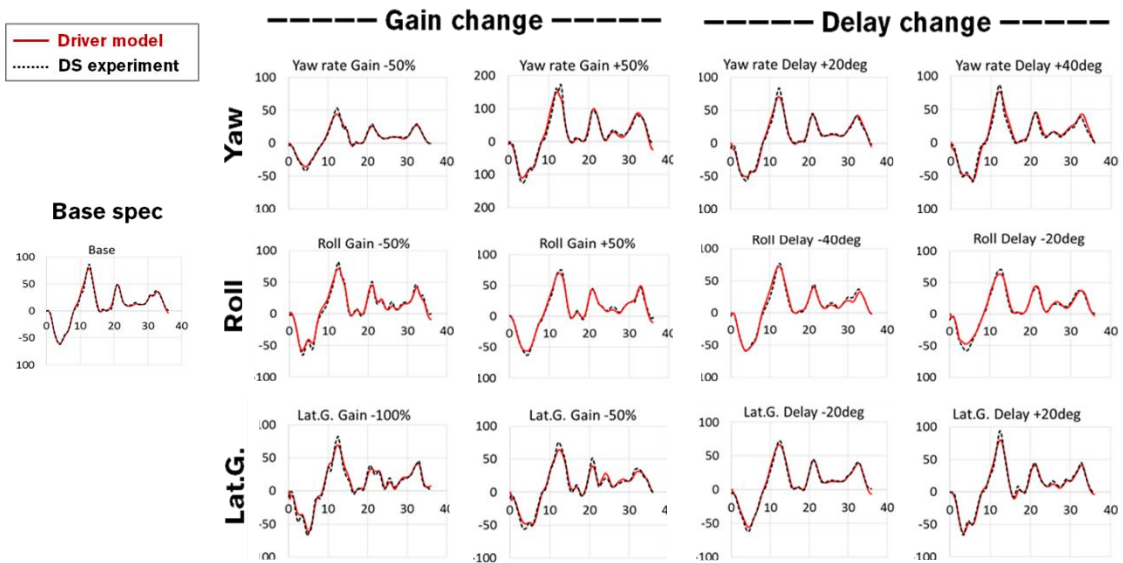


図 2-13 ドライバモデルのパラメータ同定後の操舵角波形再現結果

表 2-2 に、今回同定した 5 名の被験者のドライバモデルのパラメータ同定結果を示す。

表 2-2 ドライバモデルパラメータ同定結果

Driver model parameter		Driver				
		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
Look ahead model	Kp	4.738	5.431	6.857	7.105	7.211
	Kd	-1.158	-0.868	-1.097	-0.864	-0.901
	Ki	-0.092	-0.082	-0.097	-0.116	-0.113
	T	0.235	0.287	0.281	0.290	0.298
Roll F/B model	Kp	46.912	111.784	104.859	45.191	65.305
	T	0.564	1.277	0.538	0.554	0.633
Line trace model	Kp	0.934	0.654	0.596	0.129	0.320
	Kd	-0.033	-0.126	0.020	0.056	0.135
	Ki	0.069	0.080	-0.013	0.013	0.023
	T	0.135	0.147	0.099	0.107	0.100

2.5 本章のまとめ

車両の走行は、現在の車両の走行状態から、次にドライバが目標とした走行状態（走行ライン）に対するドライバの操舵特性による車両への操舵入力と、車両の操舵応答特性による車両挙動と走行状態の変化、これらの繰り返しによって作られてゆく。ここでは、この流れの中の、ドライバの操舵特性を定義した。今回着目した3つ車両特性にそれぞれ対応した3つのドライバモデルを定義し、5名の被験者による操舵角波形を精度良く再現できるドライバモデルを定義できた。また、DS実験においては、そのシステムの制約の中でも、操舵に対する操舵反力、ヨーレイト、横加速度、ロール角の応答特性を、実車の計測データと定量的に比較しながら合わせ込みを行うとともに、フロントウィンドの窓枠を追加する等の改善を実施した。結果、カーブを走行中の操舵角波形およびフィーリング評価で、高い実車再現性が確認された。これまで難しいとされてきたDSでの操安性実験を可能とする、実験環境を構築することができた。

第3章

ドライバが意のままと感じる 車両操舵応答特性の算出

3.1 本章の目的

車両の走行は、現在の車両の走行状態から、次にドライバーが目標とした走行ラインに対するドライバーの操舵特性による車両への操舵入力と、車両の操舵応答特性による車両挙動と走行状態の変化、これらの繰り返しのよって作られてゆく（図 3-1）。ここでは、第 1 章で立てた、ドライバーが意のままと感ずるための定性的な仮説「操舵に対する車両のヨーレイト、横加速度、ロールの遅れを、ある適切なバランスで設定することにより、ドライバーは目標とした走行ラインを正確にトレースできる。」に対して、第 2 章で定量的に把握したドライバーの操舵特性を使って、解析によりその「適切なバランス」を定量的に算出することを目的とする。

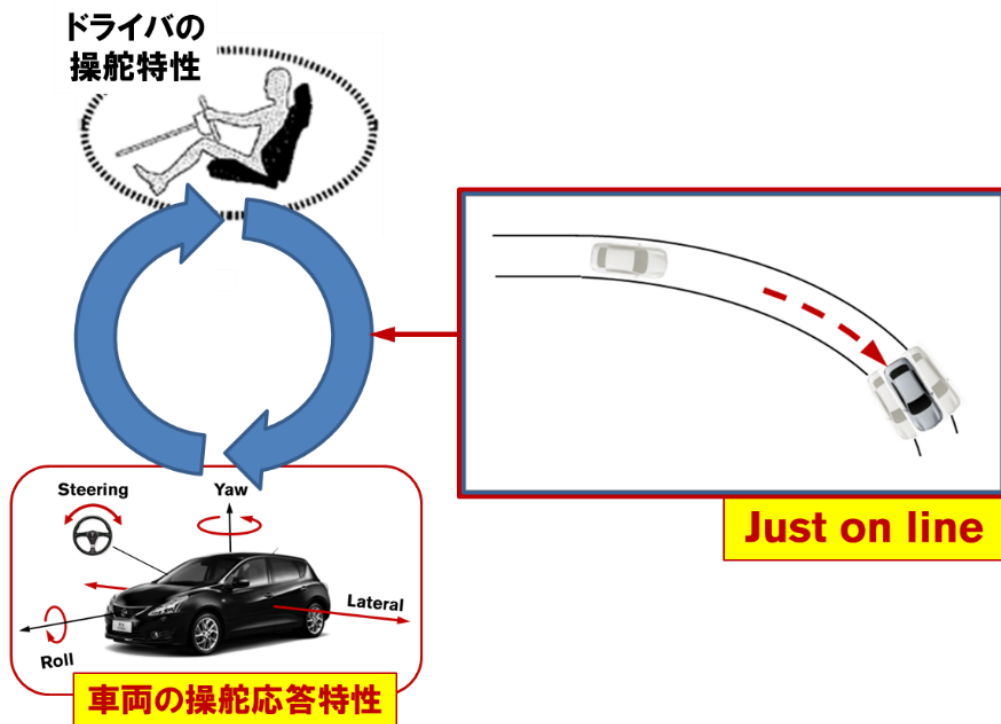


図 3-1 車両の操舵応答特性の解明の概念図

3.2 ドライバ操舵特性の考察による仮説特性算出方針の検討

直進からカーブに進入していくシーンで、ドライバが目標とした走行ラインを正確にトレースできる車両の操舵応答特性の算出方針を検討するために、今回定義した3つのドライバモデルがどのように機能するかについて考察した(図3-2)。

まず、前方にカーブが確認されると、前方注視点モデルによる操舵が開始される。次にカーブへの進入に伴って発生するロールに同調した、ロール F/B モデルによる操舵が加わる。この2つのモデルによる操舵によってカーブに進入した結果、自車位置と目標軌跡との間に乖離が生ずると、走行軌跡誤差モデルによる操舵が行われることになる。

よって、カーブの進入で、ドライバが目標とした走行ラインを正確にトレースするためには、前の2つのドライバモデルである前方注視点モデルとロール F/B モデルによる操舵を工夫し、カーブに入った時の車両の車線中央からのズレを発生させない、つまり、走行軌跡誤差モデルによる操舵を発生させないことが目標の状態と考えることができる。

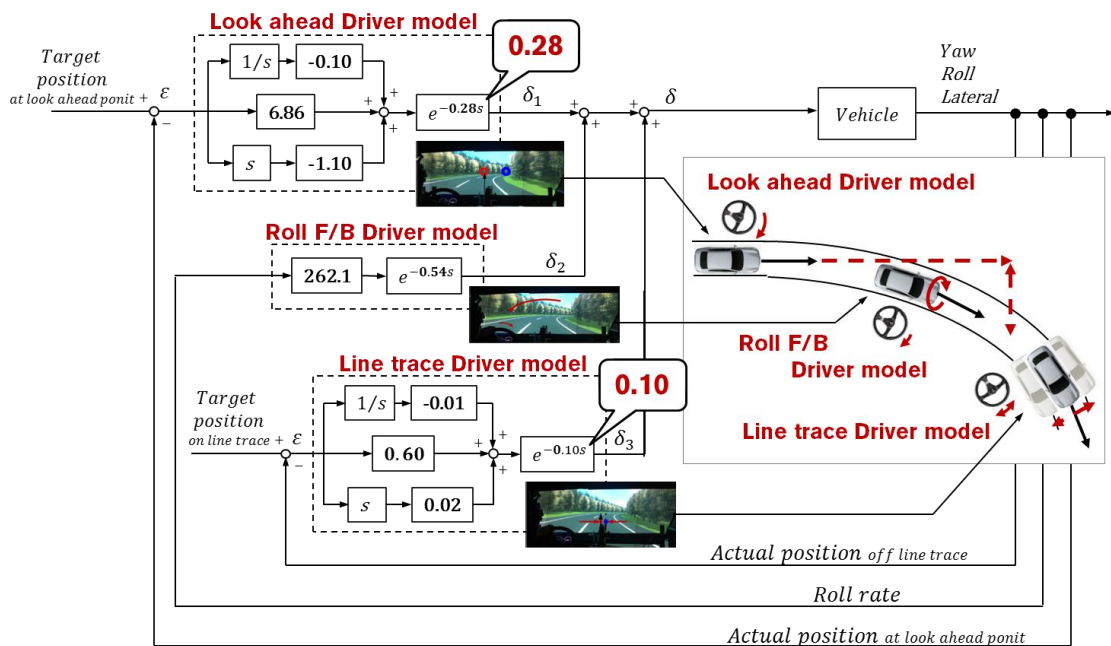


図3-2 定義したシーンでのドライバモデルの機能の仕方

なお、今回同定されたパラメータを見ると、走行軌跡モデルのむだ時間は、前方注視点モデルのものに比べて非常に短いことから、走行軌跡モデルによる操舵の修正は、緊急度の高い、ドライバにとって負担が大きい操舵と考えられる。このことから、カーブに入った時に、ドライバが目標とした走行ラインを正確にトレースできることの重要性が、定量的にも確認できたと言える。

3.3 車両応答特性違いの解析比較による仮説特性の絞り込み

ここでは第2章で定義したドライバモデルを、操舵応答特性の異なるいくつかの車両モデルと組み合わせて、実験評価コースを走行する解析を行い、実際にカーブの進入で走行軌跡モデルによる操舵がゼロになるような操舵応答特性の一例を示す。

図3-3のグラフは、ある操舵応答特性を持つ車両モデルに、今回同定したNo.3のドライバモデルを組み合わせて、実験評価コースを走行したときの操舵角波形を計算、3つのドライバモデルによる操舵指令を、時系列でそれぞれ分解して表示したもので、赤実線が今回着目する走行軌跡モデルによる操舵指令を表している。

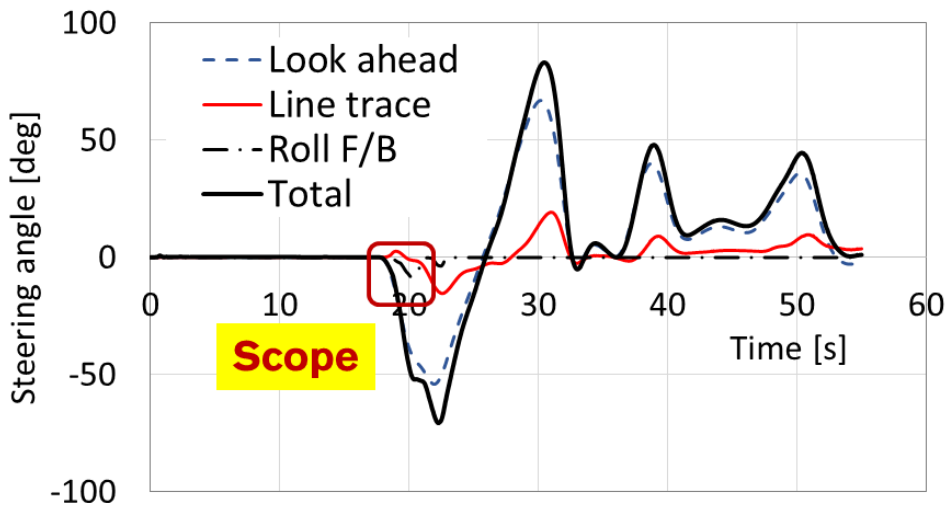
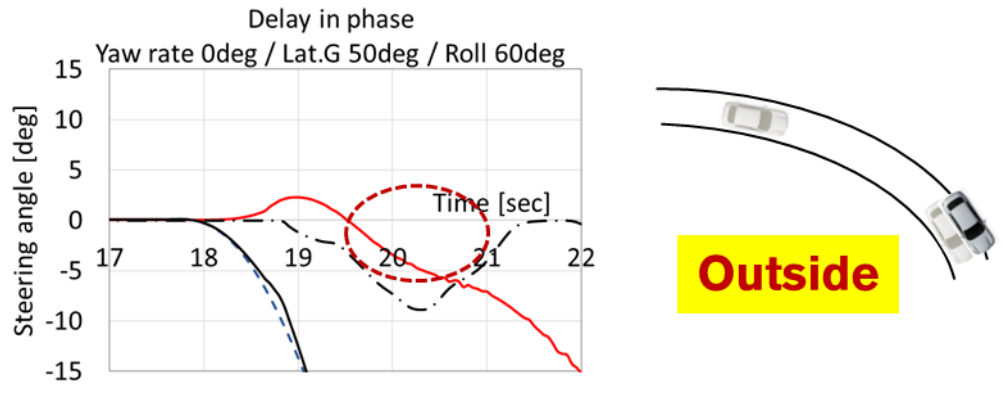


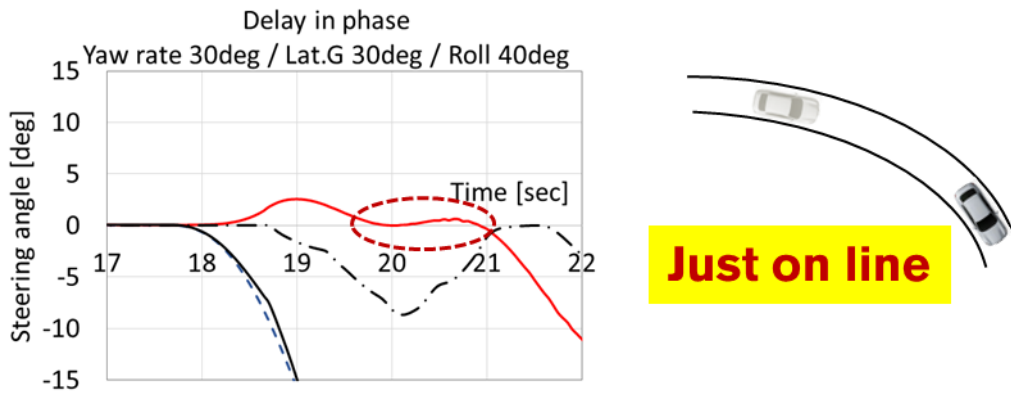
図3-3 ドライバモデルによる操舵角のシミュレーション結果

また、図3-4の3つのグラフは、操舵に対する、ヨーレイト、ロール角、横加速度の位相遅れの異なる車両モデルと組み合わせた場合の計算結果で、図3-3のグラフの中の赤く囲んだ部分の、直進から最初の70Rの右カーブに入ったシーンを拡大したものを示している。図3-4(a)(b)(c)の後のYaw, Lat. G, Rollの3つの数値は、操舵周波数入力に対する車両のヨーレイト、横加速度、ロール角、それぞれの1Hzでの位相遅れ角[deg]を表している。

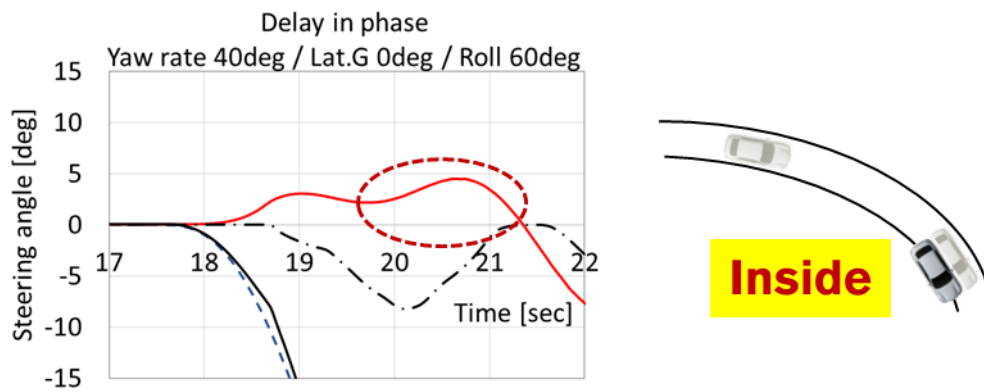
これらの拡大図を見ると、前節で説明した直進からカーブに進入していく時に、3つのドライバモデルが順番に機能する様子が定量的にも確認できる。最初に、18秒の手前あたりから破線で示した前方注視点誤差モデルによる操舵が開始されている。次に、18.5秒あたりから極わずかな量ではあるが、一点破線で示したロールF/Bモデルによる操舵指令が出ている。そして最後に、赤実線で示した走行軌跡誤差モデルによる操舵が実行されていることが分かる。



(a) Yaw 0 / Lat.G. 50 / Roll 60



(b) Yaw 30 / Lat.G. 30 / Roll 40



(c) Yaw 40 / Lat.G. 0 / Roll 60

図 3-4 車両特性違いでのドライバモデルからの操舵指令比較

図 3-4 (a)は、ヨーレイトの遅れを小さく、横加速度の遅れを逆に大きくした仕様で、カーブに入った時に、車両が外側に膨らみ、走行軌跡モデルによる切り増しの操舵が必要となっていることが確認される。これは、ヨーレイトの遅れが小さいと素早くヨー角が変わってしまうために、カーブ入り口で前方注視モデルでの操舵が小さく抑えられることに加え、横加速度の遅れによって車両の横移動が減少することが要因と考えられる。

一方、図 3-4 (c)はその逆のケースを表している。ヨーレイトの遅れが大きいためカーブの入口で大きな操舵を入れてしまうことに加え、横方向の動きが機敏なために、車両はカーブの内側に切れ込んでしまい、走行軌跡モデルによる切り戻しの操舵が必要になっていることが確認される。

図 3-4 (b)は、カーブ進入後の走行軌跡誤差および、走行軌跡モデルによる操舵がゼロになるように、ロール F/B モデルによる操舵を含めて、ヨーレイト、横加速度、ロール角の操舵に対する遅れをバランスよく設定した仕様の一例を示している。

3.4 カーブの進入でドライバーが目標とした走行ラインを正確にトレースできる操舵応答特性の算出

3.3の最後に一例で示したように、操舵に対するヨーレイト、横加速度、そしてロール角の位相遅れをあるバランスで適切に設定することで、カーブの進入で、ドライバーが目標とした走行ラインを正確にトレースできる、つまり走行軌跡モデルによる操舵をゼロにできるパターンが存在することが確認できた。

ここではまず、操舵に対するロールの位相遅れを、ベース仕様と同じ 60deg に固定し、カーブの進入で、走行軌跡モデルによる操舵をゼロにできる、操舵に対するヨーレイトと横加速度の遅れの関係解析により計算し、それぞれ横軸、縦軸として図 3-5 に示した。図中 No.1～No.5 の 5 本のラインは、今回同定した 5 名のドライバーモデルの違いによるものを表しており、本研究での被験者の選定条件から想定される通り、ドライバーによってそのラインが大きく異なることが確認できた。中でも太い赤線は、ドライバーモデルのパラメータが 5 名の平均的な値となった No.3 のものであり、以降、このドライバーモデルを代表モデルとして検討を進めることとした。

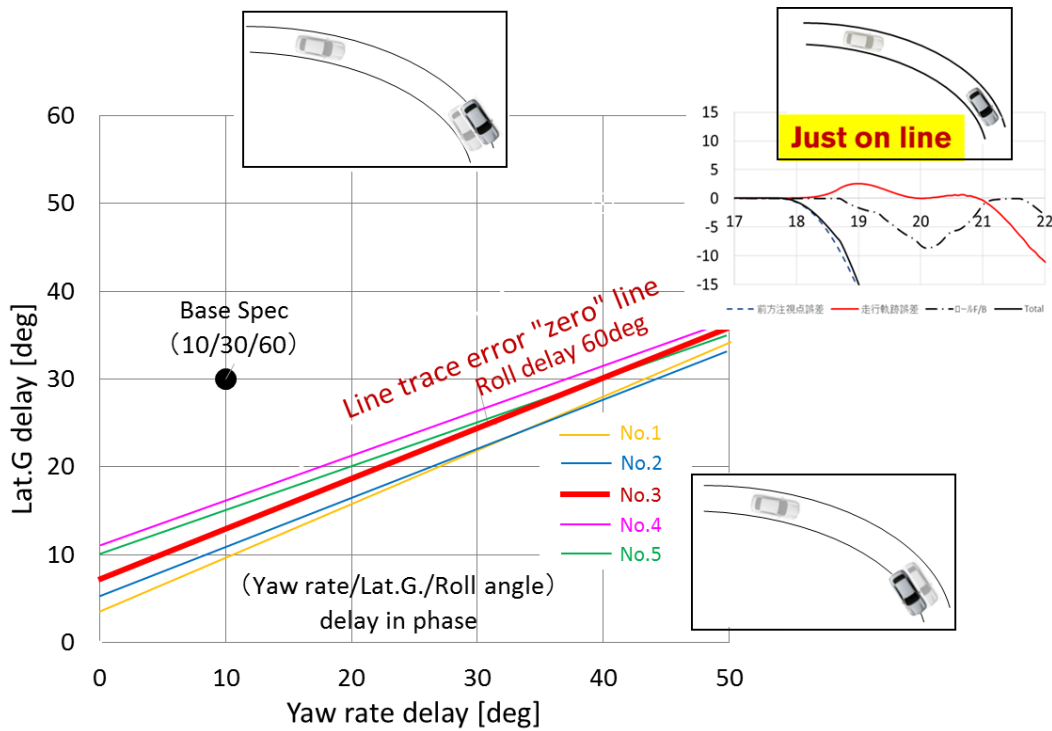


図 3-5 ドライバが意のままと感じる車両操舵応答特性
(同定した 5 名のドライバーモデルによる走行軌跡誤差が”ゼロ”となるライン)

次に、No.3のドライバモデルを前提に、操舵に対するロールの位相遅れが40degの場合の、カーブの進入で、走行軌跡モデルによる操舵をゼロにできる、ヨーレートと横加速度の遅れの関係进行を計算し、グラフに追加した(図3-6)。ロールの位相遅れを20deg改善することによって、ヨーレートの位相で約12deg低減、横加速度の位相遅れで約6deg低減と同等の効果が見込まれることが、このグラフから読みとれる。

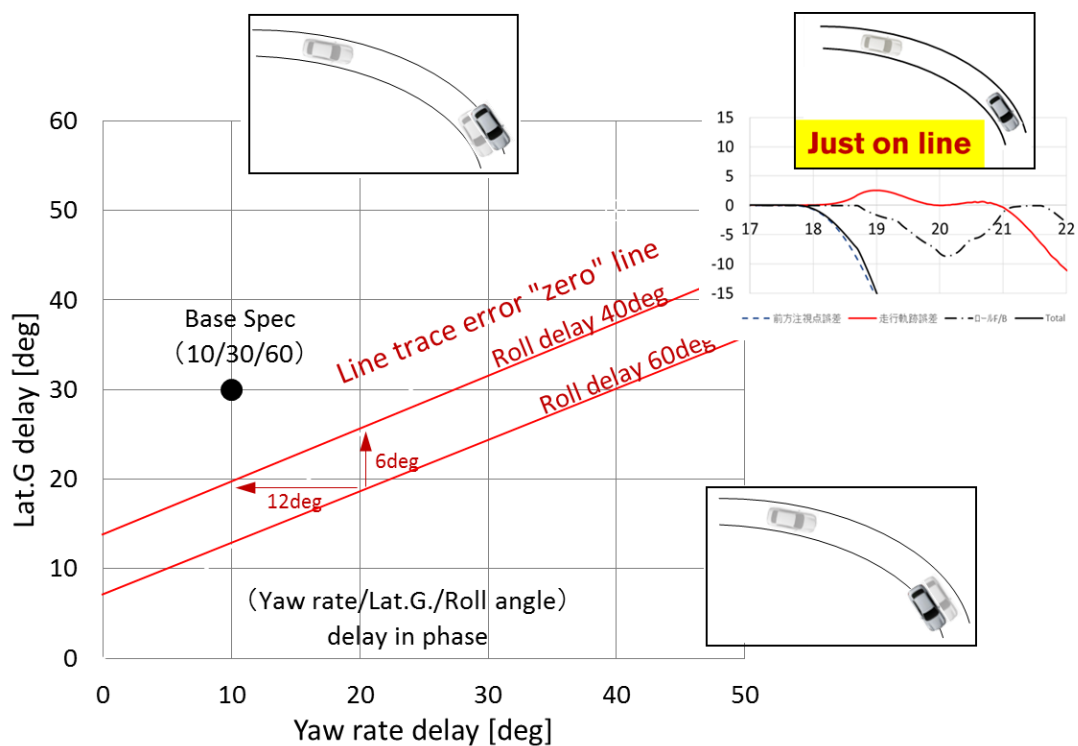


図 3-6 カーブに進入した時に、走行軌跡モデルによる操舵がゼロになる操舵応答特性の関係

3.5 仮説検証仕様の選定

次章では、前節で算出した仮説の車両応答特性とすることで、ドライバーが目標とした走行ラインを正確にトレースできること、そして、従来手法である応答遅れの低減と合わせて、効果的に性能向上ができることを、その特性を大きく変更することができる DS を活用して検証する。ここではその検証仕様を選定した。ベース仕様を基準に今回の仮説特性による効果と従来手法による効果を考え、以下 A~F の 6 仕様を選定した。(図 3-7、表 3-1)

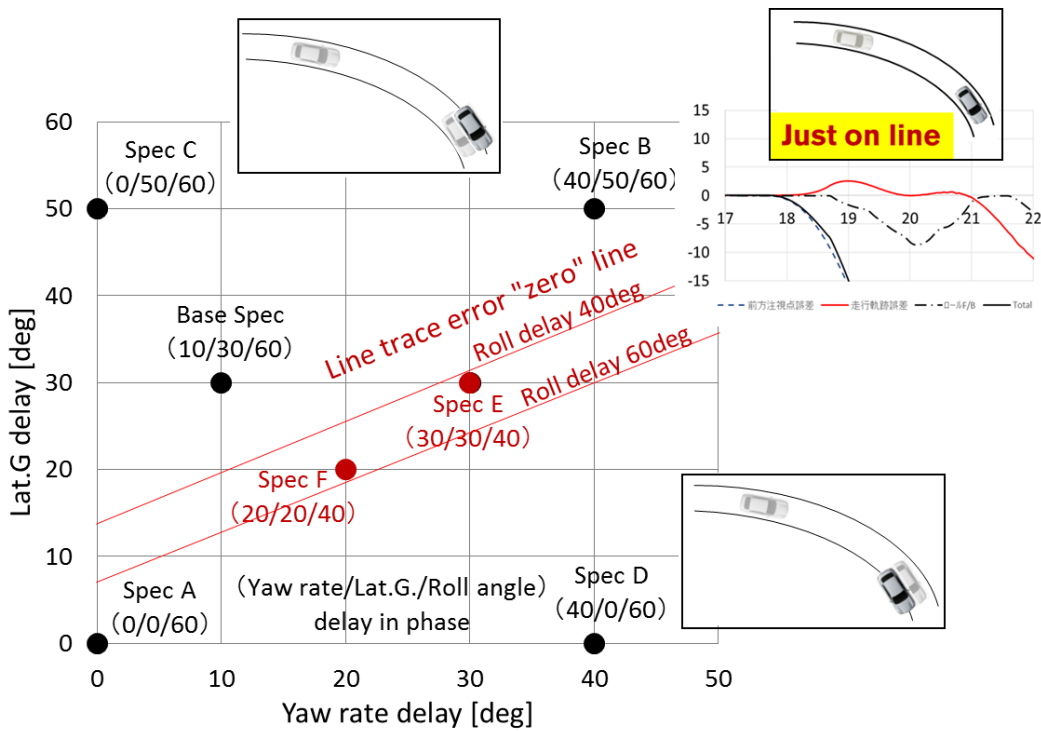


図 3-7 本研究での仮説検証仕様 (ベース仕様及び A~F 仕様)

表 3-1 仮説検証仕様の一覧

Delay in phase [deg]	Specification						
	Base	A	B	C	D	E	F
Yaw rate	10	0	40	0	40	30	20
Lateral G.	30	0	50	50	0	30	20
Roll angle	60	60	60	60	60	40	40

以下に、A～Fの仕様の選定理由と、次項図 3-8 に、各仕様の修正操舵量と走行軌跡乖離量のシミュレーション結果を示す。

ベース仕様：従来の考え方である、ヨーレイト、横加速度の遅れ低減によって修正操舵を低減するという手法で、その改善を積み上げてきた性能向上検証車両

A仕様：従来手法での最終的な目標である、ヨーレイトと横加速度の遅れを”ゼロ”とした仕様。従来手法によって、性能がどこまで向上できるのか確認する。

B仕様：従来手法でもその評価が悪いと考えられる、ヨーレイトと横加速度の遅れを大幅に悪化させた仕様。

C仕様：ヨーレイトの位相遅れを”ゼロ”に、横加速度の位相遅れを大きくすることで、遅れのバランスを大きく崩し、カーブで車両が外側に膨らんでしまうことを検証する仕様。また、従来手法の観点でも修正操舵の低減に感度の高い横加速度の位相遅れを大きく設定することにより、高い評価は得られないと予測される仕様。

D仕様：C仕様とは逆に、ヨーレイトの位相遅れを大きくする一方、横加速度の位相遅れを”ゼロ”とすることで、カーブで車両が内側に切れ込んでしまうことを検証する仕様。一方、従来手法の観点で、横加速度の位相遅れ”ゼロ”によって修正操舵が抑えられるため、全体として大きく評価が悪化しないことが予測される仕様。

E仕様：今回の仮説を検証する仕様の一つ。ヨーレイト、横加速度、ロールの位相遅れをバランス良く設定し、ドライバーが正確にラインをトレースできることを検証する仕様。更に、ベース仕様に対して、ヨーレイトの位相遅れを 20deg 増加させることによって従来手法の見方としてはその性能がやや悪化見込みであるが、その悪化を今回提案する手法でリカバリできることが期待される仕様。

F仕様：今回の仮説を検証する仕様の一つ。E仕様と同様に、ヨーレイト、横加速度、ロールの位相遅れをバランス良く設定し、ドライバーが正確にラインをトレースできることを検証する仕様。また、ベース仕様に対してヨーレイトの位相遅れをやや (10deg) 増加させながら、修正操舵に感度の高い横加速度の位相遅れを 10deg 低減することにより、従来手法及び今回の新たな手法を合わせて、大幅な性能向上が期待される仕様。

図 3-8 は、ベース及び A~F の各仕様について、No.3 ドライバモデルと組み合わせて、実験評価コースを走行したシミュレーション計算を行い、70R に入った時の車線中央からの走行軌跡の乖離量と修正操舵量を算出、それぞれ横軸、縦軸にプロットしたものである。

ベース仕様に対して、A 仕様や D 仕様は修正操舵量が低減できるが、内側に切れ込む傾向があることが予測される。一方、E 仕様や F 仕様は修正操舵量は、ベース仕様に対して同等かやや増加するが、カーブで非常に正確なライントレースが予測される。以上、これらの仕様を使って、本研究の仮説の検証を行う。

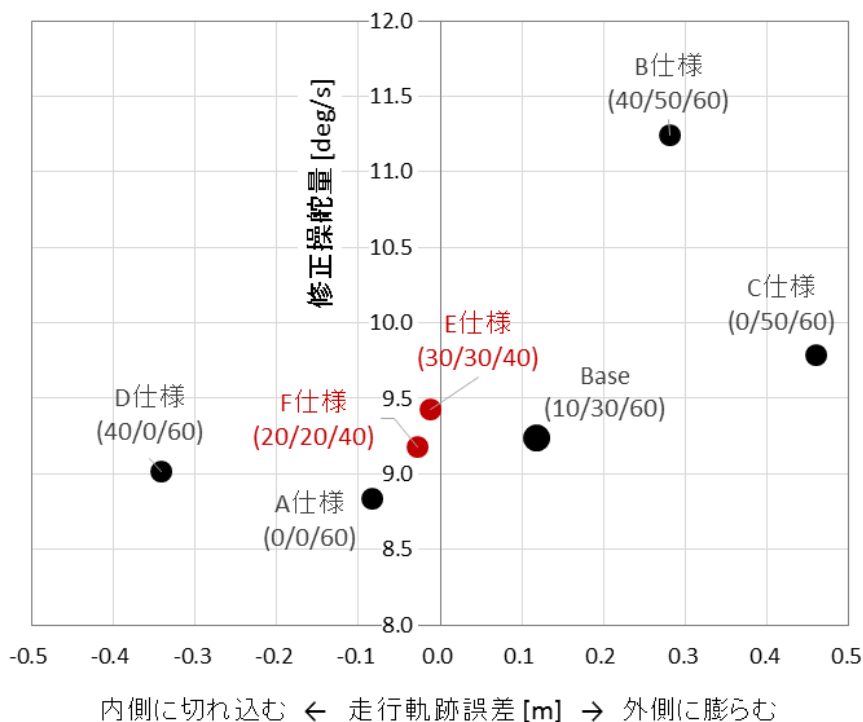


図 3-8 仮説仕様の修正操舵量と走行軌跡乖離量シミュレーション結果

3.6 本章のまとめ

車両の走行は、現在の車両の走行状態から、次にドライバーが目標とした走行ラインに対するドライバーの操舵特性による車両への操舵入力と、車両の操舵応答特性による車両挙動と走行状態の変化、これらの繰り返しによって作られてゆく。本章では、第1章で立てた定性的な仮説「操舵に対する車両のヨーレイト、横加速度、ロールの遅れを、ある適切なバランスで設定することにより、ドライバーは目標とした走行ラインを正確にトレースできる。」に対して、第2章で定量的に把握したドライバーの操舵特性を使って、解析によりその「適切なバランス」を定量的に算出した。

今回定義したドライバーモデルのメカニズムの分析・考察から、カーブの進入で、ドライバーが目標とした走行ラインを正確にトレースするためには、前方注視点モデルとロール F/B モデルによる操舵を工夫し、カーブに入った時の車両の車線中央からのズレを発生させない、つまり、走行軌跡誤差モデルによる操舵を発生させないことが目標の状態であることを示した。

そして、操舵に対してヨーレイトの遅れが小さく、横加速度の遅れが大きい車両は、カーブの進入で、ドライバーが目標とした走行ラインに対して外側に膨らむ傾向があること、逆に、操舵に対してヨーレイトの遅れが大きく、横加速度の遅れが小さい車両は、内側に切れ込む傾向があること、そして、ヨーレイト、横加速度、そしてロールの遅れをバランス良く設定することで、ドライバーが目標とした走行ラインを正確にトレースできる一例を、解析により求めた。

解明したメカニズムに基づき、一般解を示した。今回同定した5名のドライバーモデルそれぞれについて、ロールの位相遅れを固定し、カーブの進入で、ドライバーが目標とした走行ラインを正確にトレースできるヨーレイトと横加速度の位相遅れの関係解析により計算し、5名の差が大きくないことを確認することによって、その中でも平均的な No.3 のドライバーモデルをその代表として検討することを決定した。

最後に、本仮説を検証するための仕様選定を行った。次章にて、ベース仕様及び A~F 仕様の実験確認を実施する。

第4章

ドライバーが意のままと感じる 車両操舵応答特性の DS 検証

4.1 本章の目的

車両の走行は、現在の車両の走行状態から、次にドライバーが目標とした走行ラインに対するドライバーの操舵特性による車両への操舵入力と、車両の操舵応答特性による車両挙動と走行状態の変化、これらの繰り返しによって作られてゆく。ここでは、第3章で定量的に算出した「ドライバーが目標とした走行ラインを正確にトレースできる操舵応答特性」の仮説について、DS実験により検証する。また、本特性とすることで、従来の応答遅れ低減による性能向上と合わせて、より効果的に「ドライバーが意のままと感じる」性能を向上できることを修正操舵量計測と官能評価により検証することを目的とする。

4.2 DS実験検証

4.2.1 実験検証仕様

ここでは前章で説明したベース仕様及び操舵応答特性の異なるA~Fの仕様をDS上で再現し、その検証を行った。本実験により、E及びF仕様で、ドライバーが目標としたラインを正確にトレースできることを定量的に確認するとともに、本仕様とすることで、より効果的に「ドライバーが意のままと感じる」性能を向上できることを官能評価により検証する。

4.2.2 実験検証方法（走行軌跡計測と官能評価）

本実験は、東京大学ライフサイエンス委員会倫理審査専門委員会の審査を受け、承認を得た内容であり、実験参加者からインフォームドコンセントを得た上で実施した。

実験は、ドライバーモデルの同定で協力いただいた5名に、同じく普段から通勤等で車を運転している30代~40代の男性2名を加えた、計7名を被験者にして実施した。実験評価コースを、80kph一定速で、カーブに沿ってできるだけ車線中央を走行するようなタスクを与えた。十分な練習走行を行った後、それぞれの仕様で、70Rでの走行軌跡、車線中央からの乖離量と修正操舵量を、N=4試行回計測した。同時に、各仕様がどれくらい意のままと感じるか、ベース仕様を基準に、表4-1に示した評点スケールで、官能評価を実施した。

表 4-1 「意のまま」の評価 評点スケール

7	6	5	4	3	2	1
非常に良い	良い	やや良い	基準	やや悪い	悪い	非常に悪い

4.2.3 ドライバが意のままと感じる車両操舵応答特性の DS 検証結果

最初に、走行軌跡の計測結果を示す。図 4-1 は、ある被験者の C,D 仕様および F 仕様の走行軌跡の計測結果を示している。(c)の拡大図 2 は、(a)の評価コース全体図に対して、計測開始地点直後の右カーブに入った時の、走行軌跡を拡大して示したグラフである。グラフの数値は、計測開始地点の車線中央を原点として、その原点からの距離を、原点通過時の進行方向を横軸に、左右方向（進行方向左を+）を縦軸に示したものである。

黒破線で示した車線中央ラインに対して、外側に膨らむと想定していた C 仕様、その逆の D 仕様、そして今回の仮説検証仕様の 1 つ F 仕様に対して、概ね想定通りの結果が確認された。

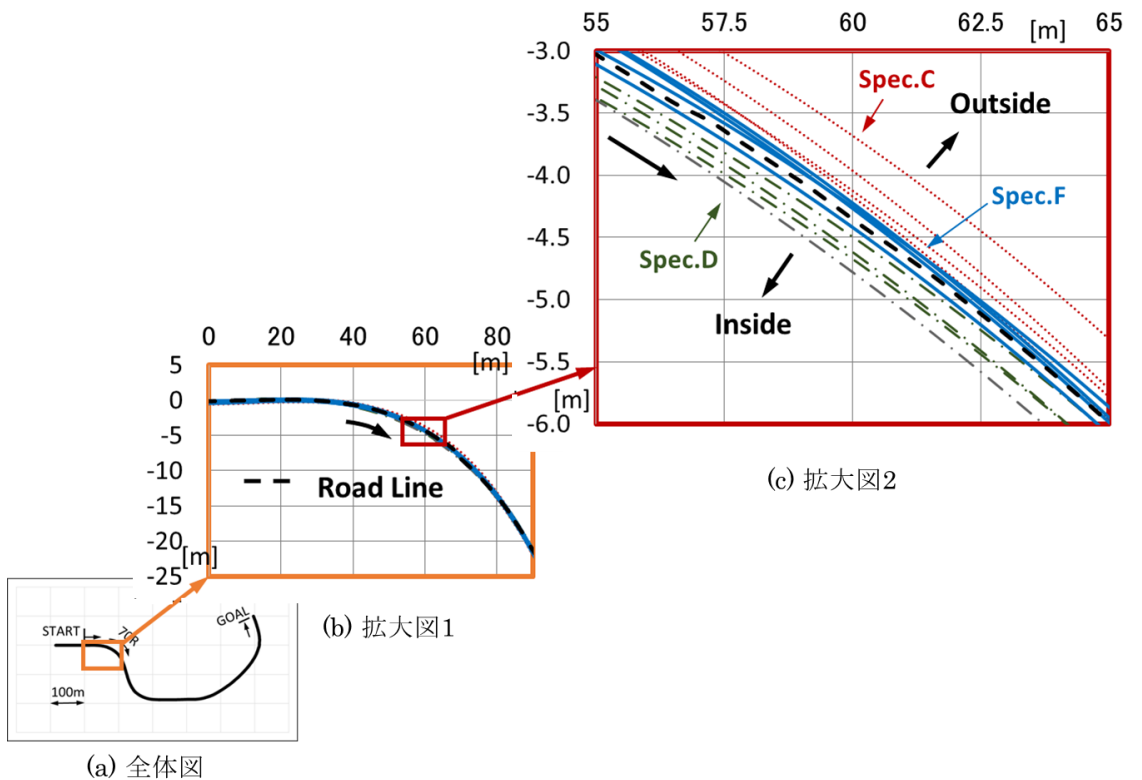


図 4-1 走行軌跡の計測結果の一例

また、図 4-2 は、被験者 7 名、各仕様 4 試行回の走行軌跡の車線中央からの乖離量（カーブ内側をマイナス、カーブ外側をプラス）の平均値とそのバラツキを、それぞれの仕様毎に示したものである。カーブの外側に膨らむ C 仕様、内側に切れ込む D 仕様、概ね車線中央を走行できる F 仕様の関係が、定量的にも確認できた。特に、E,F 仕様は、その乖離量が非常に小さい値となっていることから、ドライバーが目標とした走行ラインを極めて正確に走行できることが確認できた。さらに、ヨーレイト、横加速度の位相遅れを”ゼロ”とした A 仕様は、若干ではあるが、カーブの内側に切れ込むことも確認できた。

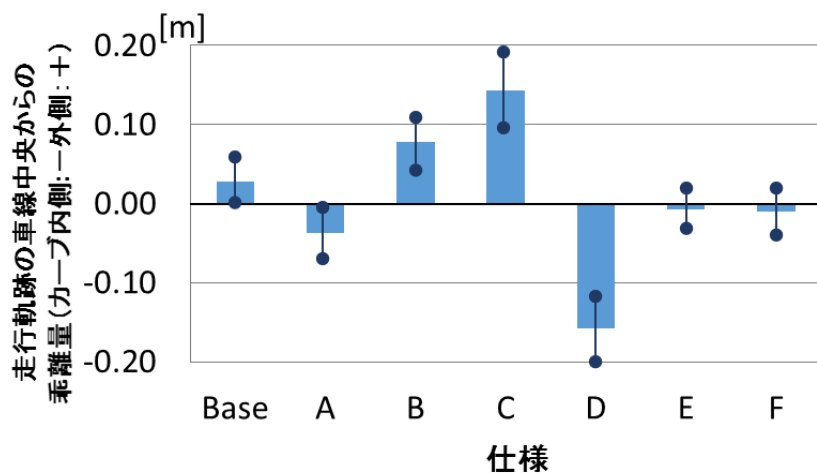


図 4-2 走行軌跡 DS 計測結果 被験者 7 名の車線中央からの乖離量平均値とバラツキ比較

以上より、第 3 章で算出した、「ドライバーが意のままと感じる車両操舵応答特性」の仮説が定量的に検証された。

次に、修正操舵量計測結果を図 4-3 に、官能評価結果を図 4-4 に、横軸にそれぞれの仕様違いの比較として示した。

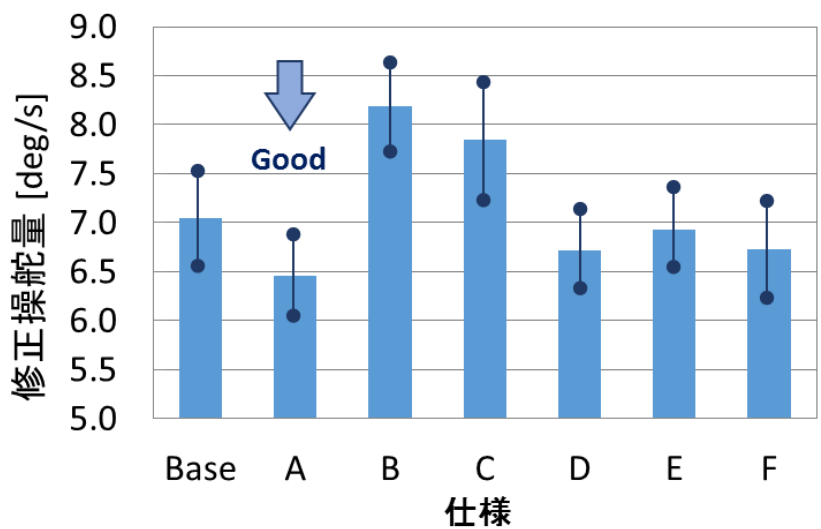


図 4-3 修正操舵量計測結果 7名平均値とバラツキ

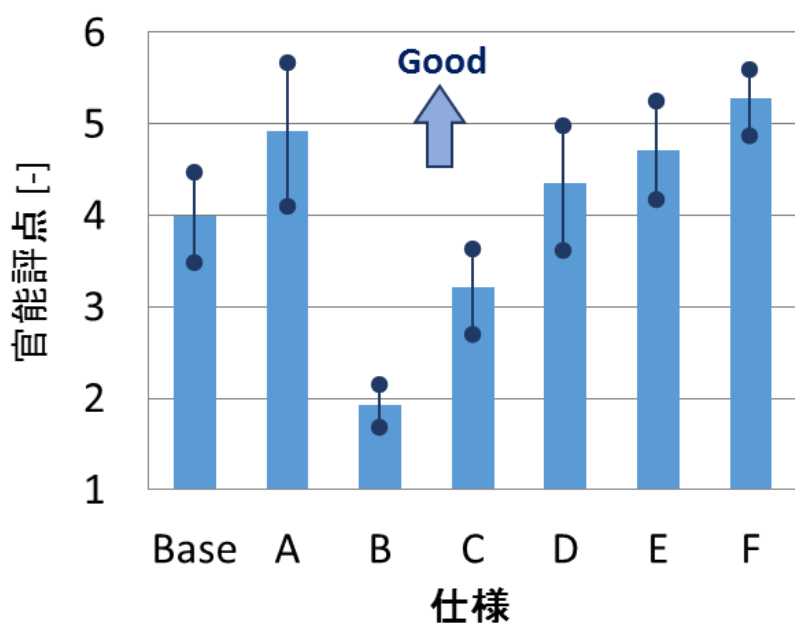


図 4-4 官能評価結果 7名平均値とバラツキ

A仕様は、ベース仕様に対して、修正操舵が減少し、それに応じた官能評価の向上が確認され、逆に、B仕様はベース仕様に対して修正操舵量が増加し、官能評価の悪化が確認された。これは、従来手法の考え方で定性的に説明ができ、今回その定量的な変化代が確認された。

C仕様は、ベース仕様に対して、修正操舵が増加し、官能評価も悪化した。修正操舵が増加した要因は、ヨーレイトの遅れを”ゼロ”にした効果よりも、修正操舵に感度の高い横加速度の遅れを大きくしたためと考えられる。また、官能評価が悪化した要因は、この修正操舵の増加に加えて、カーブの進入で走行軌跡が外側に膨らんだことによるものと考えられる。

D仕様は、ベース仕様に対し、修正操舵が減少したが、官能評価は同等となった。修正操舵が減少した要因は、これに感度が高い、横加速度の遅れを”ゼロ”としたことによるものと考えられる。また、官能評価が向上しなかった要因は、この修正操舵の減少による性能向上が、カーブの進入で走行軌跡が内側に切れ込んでしまう悪さに相殺されたためと考えられる。

E仕様は、ベース仕様に対し、修正操舵は同等、官能評価はやや向上した。修正操舵が同等となった要因は、これに感度が高い、横加速度の遅れを変更しなかったためと考えられる。また、官能評価がやや向上した理由は、今回新たに提案した車両応答特性のバランスとすることによって、カーブの進入でのライントレース性が向上したためと考えられる。

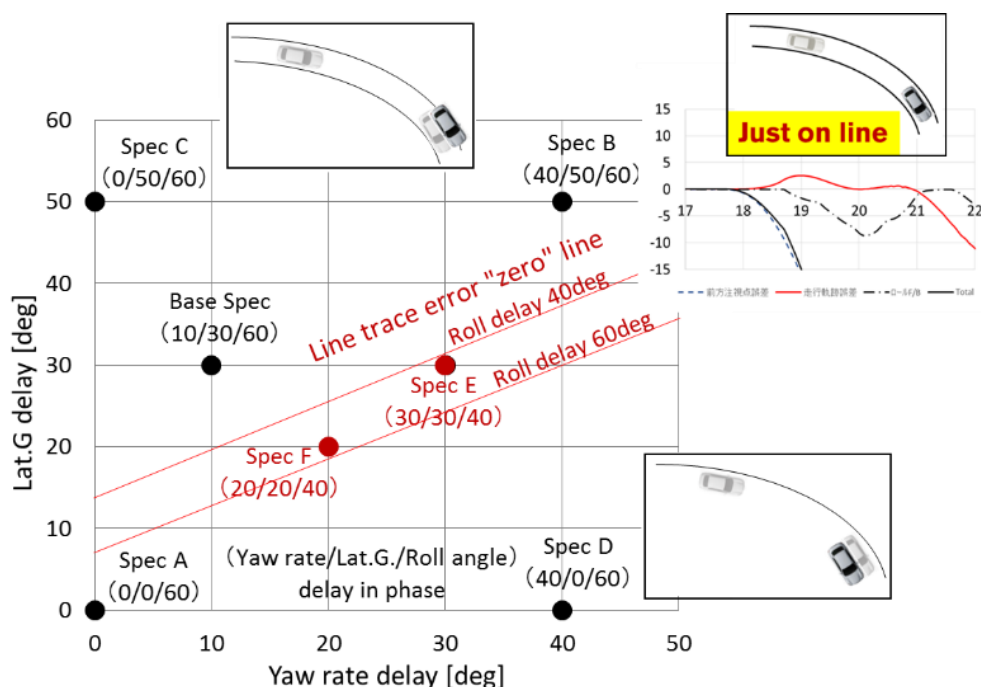


図 3-7 本研究での仮説検証仕様（再掲）

最後に F 仕様は、ベース仕様に対し、修正操舵が減少し、官能評価は A 仕様同等以上まで、大幅に向上した。修正操舵が減少したのは、わずかではあるが、これに感度が高い横加速度の遅れを低減させたことによるものと考えられる。また、官能評価が大幅に向上したのは、この加速度の遅れ低減による修正操舵の低減に加えて、今回新たに提案した車両応答特性のバランスとすることによって、カーブの進入でのライントレース性が向上したこと、この両方の効果によるものと考えられる。

以上より、今回提案するドライバーが目標とした走行ラインを正確にトレースできる車両応答特性とすることで、従来手法の応答遅れを低減させることと合わせて、「ドライバーが意のままと感じる」性能を効果的に実現できることが確認できた。

「ドライバーが意のままと感じる車両操舵応答特性」の仮説に対して、DS 実験による検証が完了した。

4.3 本章のまとめ

車両の走行は、現在の車両の走行状態から、次にドライバーが目標とした走行ラインに対するドライバーの操舵特性による車両への操舵入力と、車両の操舵応答特性による車両挙動と走行状態の変化、これらの繰り返しによって作られてゆく。ここでは、第3章で定量的に算出した「ドライバーが目標とした走行ラインを正確にトレースできる操舵応答特性」の仮説を、DS 実験により検証した。また、その特性とすることで、従来の応答遅れ低減による性能向上と合わせて、より効果的に「ドライバーが意のままと感じる」性能を向上できることを、ライントレース計測結果、修正操舵量計測結果、官能評価結果の比較から明らかにした。

第5章

ドライバが意のままと感じる 車両操舵応答特性の実車検証

5.1 本章の目的

車両の走行は、現在の車両の走行状態から、次にドライバーが目標とした走行ラインに対するドライバーの操舵特性による車両への操舵入力と、車両の操舵応答特性による車両挙動と走行状態の変化、これらの繰り返しによって作られてゆく。ここでは、第4章と同じく、第3章で定量的に算出した「ドライバーが目標とした走行ラインを正確にトレースできる操舵応答特性」を、実際に具現化した実車両を使ってその仮説を検証する。また、その特性とすることで、従来の応答遅れ低減による性能向上と合わせて、より効果的に「ドライバーが意のままと感じる」性能を向上できることを修正操舵計測と官能評価により検証することを目的とする。

5.2 実車実験車両の仕様

実車両での実験は、1.6.3「研究に用いた評価車両」で説明した、Cセグメントハッチバック車の量産車「量産仕様」と、同じ量産車を使い、従来手法であるヨーレイトと横加速の遅れ低減によって、その性能をセグメントトップレベルまで向上させてきた試作車両である「ベース仕様」、そしてベース仕様に対して、今回DS実験で検証が完了したカーブの進入でドライバーが目標とした走行ラインを正確にトレースできる車両の操舵応答特性を、実際に具現化した「改善仕様」の3つの仕様にて実車検証実験を実施した。「改善仕様」は、図5-1のように、「ベース仕様」に対して、横軸のヨーレイトの位相遅れを維持したまま、縦軸の横加速の位相遅れとロールの位相遅れを10degずつ低減した仕様である。

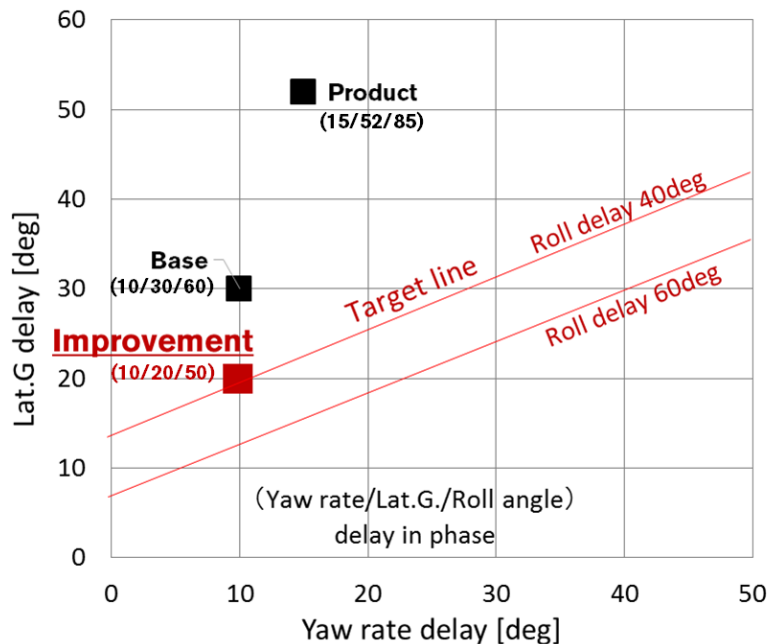


図 5-1 実車両での仮説検証仕様

5.3 仕様を実現する検証車両の設計・製作

5.3.1 従来2輪モデルによる操舵応答特性の向上

「改善仕様」の試作においては、従来の2輪モデルに、タイヤの横剛性の車両応答への影響を考慮できる要素を加えた新たな車両モデルを使い、ベース仕様を基準に、目標の操舵応答特性を実現できる部品仕様を選定した。

ここではその詳細について述べる前に、量産仕様からベース仕様に至るまでの性能向上について整理する。この性能向上開発は、従来の2輪モデル（図5-2、式5-1,5-2）を使った、フロントとリアのコーナリングパワー（以下、CP）の向上、それらによる、操舵周波数入力に対するヨーレイト、横加速度の位相遅れ（式5-3, 5-4, および式5-5~5-10）の低減によって実施されてきた。量産仕様とベース仕様の主要諸元の違いを表5-1に示す。

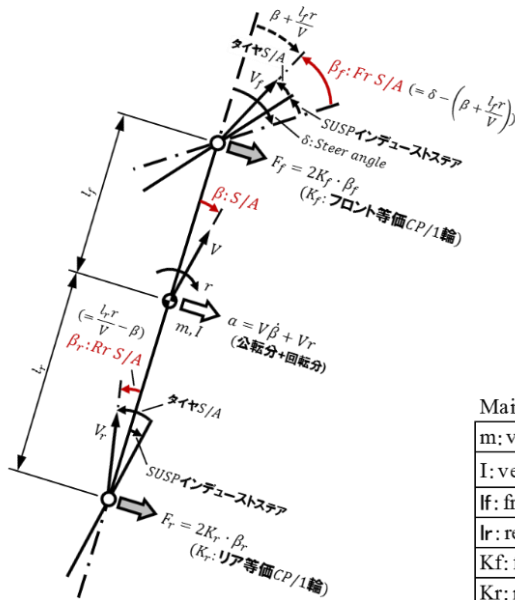


図5-2 2輪モデル

表5-1 車両の諸元

Main specification	Product	Base	unit
m: vehicle mass	1600		kg
I: vehicle yaw inertia	2500		kgm ²
l _f : front axle ~ C.G.	1.12		m
l _r : rear axle ~ C.G.	1.58		m
K _f : front equivalent CP	29	44	kN/rad
K _r : rear equivalent CP	44	69	kN/rad

$$\left\{ ms^2 + \frac{2(K_f + K_r)}{V} s \right\} y(s) + \left\{ \frac{2(l_f K_f - l_r K_r)}{V} s - 2(K_f + K_r) \right\} \theta(s) = 2K_f \delta(s) \quad (5-1)$$

$$\frac{2(l_f K_f - l_r K_r)}{V} s y(s) + \left\{ Is^2 + \frac{2(l_f^2 K_f + l_r^2 K_r)}{V} s - 2(l_f K_f - l_r K_r) \right\} \theta(s) = 2l_f K_f \delta(s) \quad (5-2)$$

Yaw rate delay:
$$\angle G_{\delta}^Y = \tan^{-1}(2\pi f T_Y) - \tan^{-1}\left(\frac{\frac{2\pi f 2\zeta}{\omega_n}}{1 - \frac{(2\pi f)^2}{\omega_n^2}}\right) \quad (5-3)$$

Lat. G delay:
$$\angle G_{\delta}^{\ddot{y}} = \tan^{-1}\left(\frac{2\pi f T_{y1}}{1 - (2\pi f)^2 T_{y2}}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\frac{2\pi f 2\zeta}{\omega_n}}{1 - \frac{(2\pi f)^2}{\omega_n^2}}\right) \quad (5-4)$$

$$\zeta = \frac{m(l_f^2 K_f + l_r^2 K_r) + I(K_f + K_r)}{2l \sqrt{m l K_f K_r (1 + AV^2)}} \quad (5-5) \quad \omega_n = \frac{2l}{V} \sqrt{\frac{K_f K_r (1 + AV^2)}{ml}} \quad (5-6)$$

$$T_Y = \frac{ml_f V}{2l K_r} \quad (5-7) \quad T_{y1} = \frac{l_r}{V} \quad (5-8) \quad T_{y2} = \frac{I}{2l K_r} \quad (5-9) \quad A = -\frac{m l_f K_f - l_r K_r}{2l^2 K_f K_r} \quad (5-10)$$

図 5-3 は、量産車を基準に、タイヤ CP とサスペンションのインデューストステアで決定されるフロントとリアの等価 CP を、25%刻みで増減させた場合の、操舵周波数入力に対する、横軸のヨーレートと縦軸の横加速度の 1Hz での位相遅れの変化を、網目状の線図で表したものであり、ベース仕様は、量産車に対して、フロントおよびリアの等価 CP を、それぞれ 52%、57% 増加させることによって、現在のレベルまで位相遅れを低減していることを示している。今回、このベース仕様を基点に、赤線で示した目標ラインに向けた具現化方策を検討する。

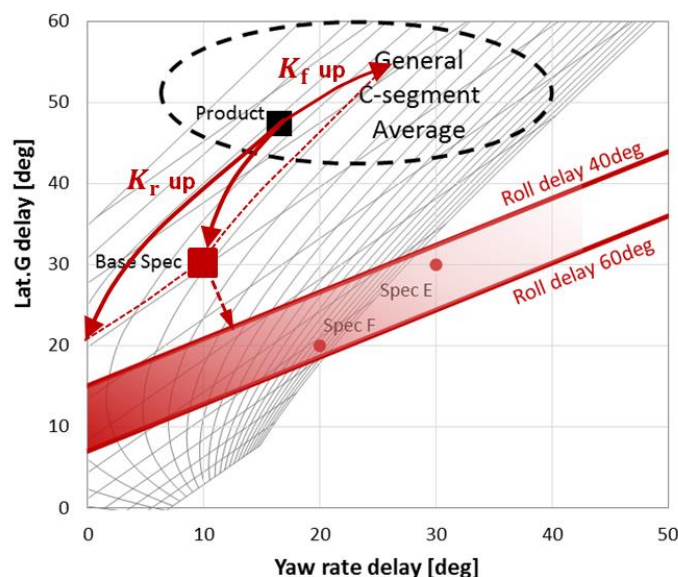


図 5-3 量産車からベース仕様への等価 CP 増加による性能向上

5.3.2 従来手法である等価 CP による性能向上代の明確化

図 5-4 は、等価 CP の構成要素のうち、旋回時のサスペンションのアライメントやコンプライアンス変化によるステア角であるインデューストステアについて、フロントサスペンション分を横軸に、リアサスペンション分を縦軸に示したものである。グラフから見られるように、ベース仕様は、既に相場上限までそれらを高めていることから、等価 CP のもう一つの構成要素である、タイヤ CP の向上を検討した。図 5-5 は一般的な乗用車用タイヤについて、横軸をタイヤ幅に、縦軸にその CP を示したものであり、ここではタイヤ幅を 1 ランク上げることを前提に、現実的にありうる範囲でのタイヤ CP の向上を実施した。ベース仕様のタイヤ CP に対して、約 20% CP を増加した 215 幅のタイヤを改善仕様として選定した。

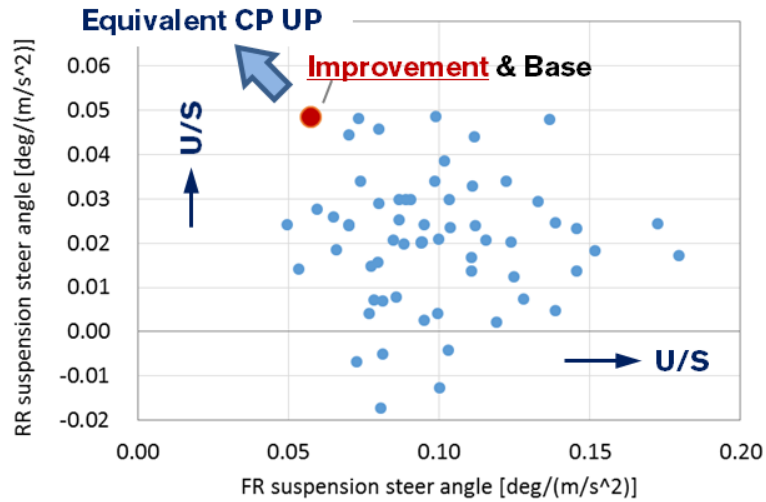


図 5-4 旋回中のサスペンションステア角の相場

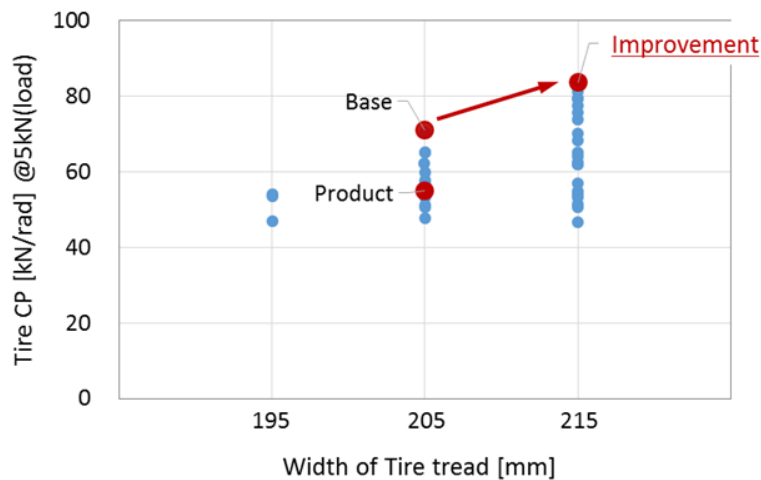


図 5-5 一般的な乗用車用タイヤのタイヤ幅と CP の相場

図 5-6 に、タイヤ CP を変更した場合のヨーレイト、横加速度の位相遅れの改善代予測を示す。目標ラインに大幅に近づくものの、更なる改善方策が必要であることが予測される。この方策として、タイヤの横剛性違いによる、タイヤが発生する CP そのものの応答遅れへの影響に着目したモデル化と性能向上検討を実施した。

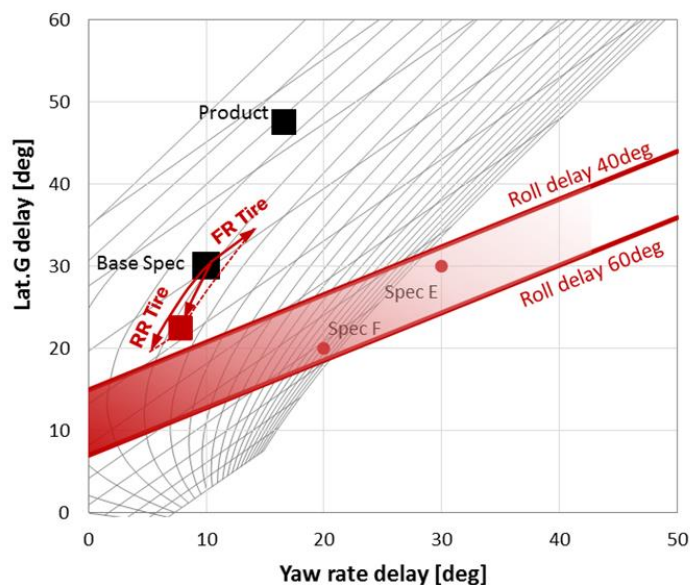


図 5-6 タイヤ CP 向上による応答遅れの改善

5.3.3 タイヤの横剛性のモデル化による新たな車両モデルの構築と目標特性を実現する具現化方策の仮説の立案

ここまで実施してきた従来の 2 輪モデルによる性能検討の手法においては、タイヤはそのスリップ角に対して遅れなくその横力が発生することを前提として、車両応答の遅れを設計してきた。しかし、実際には、ドライバが操舵をして、タイヤが一定の横すべり角を発生するまでには、タイヤの横方向の剛性に応じた接地面の横変形により、その力の発生そのものに応答遅れが生じることが分かっている^{[48][68]}。ここではこの過渡現象を考慮し、タイヤのコーナリング動特性の違いによる等価 CP の応答特性、そして車両応答特性への影響を検討した。

横すべり角が比較的小さい領域を取り扱う前提で、タイヤ接地点とホイールセンタが横方向に相対的に変形するタイヤ横剛性を定義した。図 5-7 で示すように、ドライバが操舵した直後にタイヤの回転方向と同方向に進行していたタイヤに横すべり角 β が発生、タイヤに横力が発生し、接地点がホイールセンタに対し横方向に対し、 y だけ変形したと考える。その瞬間の接地点の横方向の速度は \dot{y} となり、その横力はコーナリングパワ K 、進行方向速度 V を用いて、

$$F = K \left(\beta - \frac{\dot{y}}{V} \right) \quad (5-11)$$

となる.

タイヤの横剛性を k_y とすると,

$$F = k_y y \quad (5-12)$$

であり,

(5-11) と (5-12) 式から y を消去し,

$$\lambda = \frac{K}{k_y} \quad (5-13)$$

とすれば, コーナリングパワは, 次式のように, λ/V を時定数とする 1 次遅れの応答特性を持つことが分かる.

$$\frac{F}{\beta}(s) = \frac{K}{1 + \frac{K}{k_y V} s} = \frac{K}{1 + \frac{\lambda}{V} s} \quad (5-14)$$

また, λ は緩和長と呼ばれるものであり, タイヤの横剛性を上げることにより小さくでき, このコーナリングパワの応答遅れを低減できることが分かる.

式 (5-14) を 2 輪モデルの基本運動方程式 (5-1) (5-2) に代入し, 整理したものを式 (5-15) に示す.

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \left(s \left(\frac{2K_f}{s\lambda_f + V} + \frac{2K_r}{s\lambda_r + V} + ms \right) \right) & \left(-\frac{2(K_r(s\lambda_f + V)(l_r + V) + K_f(V - sl_f)(s\lambda_r + V))}{(s\lambda_f + V)(s\lambda_r + V)} \right) \\ \left(\frac{2sK_f l_f}{s\lambda_f + V} - \frac{2sK_r l_r}{s\lambda_r + V} \right) & \left(\frac{(s\lambda_f + V)(Is^2(s\lambda_r + V) + 2K_r l_r (l_r + V)) + 2K_f l_f (sl_f - V)(s\lambda_r + V)}{(s\lambda_f + V)(s\lambda_r + V)} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y(s) \\ \theta(s) \end{bmatrix}^T \\ & = \begin{bmatrix} 2 \left(\frac{K_f V}{s\lambda_f + V} \right) \delta(s) \\ 2 \left(\frac{K_f V}{s\lambda_f + V} \right) l_f \delta(s) \end{bmatrix} \quad (5-15) \end{aligned}$$

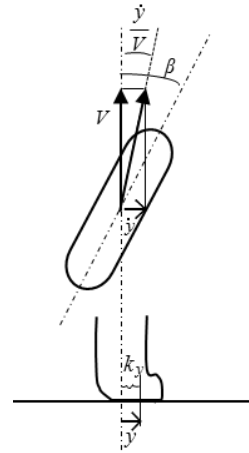


図 5-7 横力によるタイヤの変形^[39]

また、式 (5-3) (5-4) と同様に、式 (5-15) から操舵周波数応答の位相遅れを求めると次式のようになる。

$$\text{Yaw rate delay: } \angle G_{\delta}^Y = \tan^{-1} \left(\frac{Q_Y}{P_Y} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{S_Y}{R_Y} \right) \quad (5-16)$$

$$Q_Y = \pi f m l_f V \quad (5-17)$$

$$P_Y = l K_r - 2\pi^2 f^2 m l_f \lambda_r \quad (5-18)$$

$$S_Y = 2\pi f V \{ m(l_f^2 K_f + l_r^2 K_r) + I(K_f + K_r) + m\lambda_f(l_r K_r - 2\pi^2 f^2 I) - m\lambda_r(l_f K_f + 2\pi^2 f^2 I) \} \quad (5-19)$$

$$R_Y = 2l^2 K_f K_r - mV^2(l_f K_f - l_r K_r + 2\pi^2 f^2 I) - 4\pi^2 f^2 \lambda_f \lambda_r \left\{ \frac{K_f}{\lambda_f} (m l_f^2 + I) + \frac{K_r}{\lambda_r} (m l_r^2 + I) - 2\pi^2 f^2 m I \right\} \quad (5-20)$$

$$\text{Lat. G delay: } \angle G_{\delta}^y = \tan^{-1} \left(\frac{Q_y}{P_y} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{S_y}{R_y} \right) \quad (5-21)$$

$$Q_y = 2\pi f (l_r l K_r - 2\pi^2 f^2 I \lambda_r) \quad (5-22) \quad S_y = S_Y \quad (5-23)$$

$$P_y = (l K_r - 2\pi^2 f^2 I) V \quad (5-24) \quad R_y = R_Y \quad (5-25)$$

図 5-8 は、図 5-6 で見積もったタイヤの CP を増加させた仕様を基準に、式 (5-16) (5-21) により、フロントおよびリアタイヤの横剛性を 25%刻みで増減させた場合の、操舵に対する横軸のヨーレートと縦軸の横加速度の位相遅れの変化を、網目状の線図で表したものである。リアタイヤの横剛性向上が目標に向けた有効な方策であることが確認され、実車においては、その横剛性増加に高い効果のあるロードホイールのリム幅 UP により、横剛性を約 22%向上させ、目標特性を達成できる仮説を立てた。

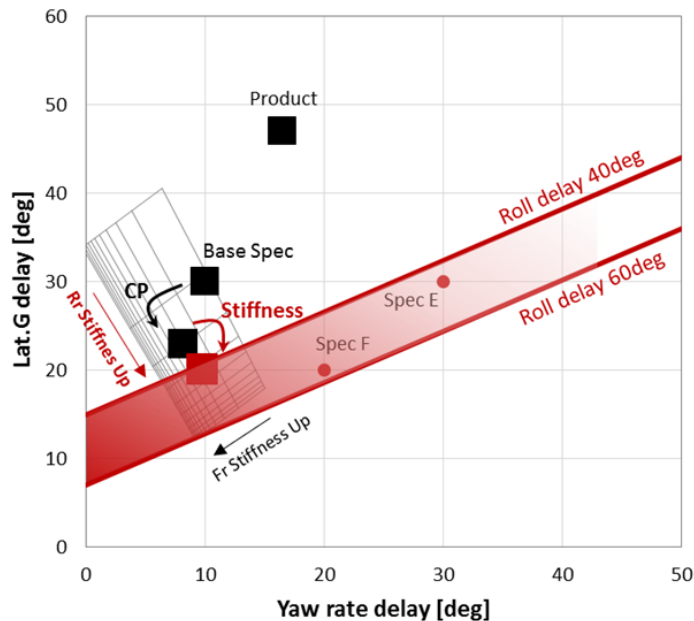


図 5-8 タイヤ横剛性向上による応答遅れの改善

5.3.4 新たに構築した車両モデルの実車両を用いた検証

従来の2輪モデルと、新たに構築した車両モデルを用い、目標ゾーン達成のために検討した具現化方策、タイヤ幅UPによるタイヤのCP 20%増加、そして、ホイールのリム幅UPによるタイヤの横剛性の22%増加を、実車両のベース仕様に織り込み、実際に目標ゾーンの操舵応答特性を達成できることを確認した。

実験は、日産自動車(株)の操舵過渡応答試験の実験手順書に定める方法にて実施した。概要として、質量、およびホイールアライメントを設計値に設定、一定速度にて十分なタイヤの慣らしを行った後、以下の手順でデータを取得する。

- ・直進状態から3~5秒直進走行後、0.3~0.5秒のパルス幅の入力を与える。
- ・目標ハンドル角は、定常状態で4m/s²の横加速度を発生させる大きさとする。
- ・操舵入力後、3~5秒間ハンドル角を直進位置に固定する。
- ・上記操舵入力を左右それぞれ5回以上実施する。

サンプリング周波数は100Hzとし、ハンドル角、ヨーレート、横加速度、ロール角、操舵反力等のデータ取得、40Hzのローパスフィルタでノイズを除去したのち、周波数分析装置により操舵周波数入力に対する各データの応答特性を算出する。

図 5-9 は、以上のような方法により計測された結果であり、横軸の操舵周波数入力に対する、ヨーレイト、横加速度、ロール角の位相遅れ角を縦軸に示したものである。解析モデルを使って予測した通り、改善仕様はベース仕様に対して、ヨーレイトの遅れは変わらず、横加速度の位相遅れが 10deg 改善していることが確認できる。また、ロールは横加速度に伴って発生するため、ロールの位相も同時に 10deg 改善していることも確認できる。次節 5.4 では、この改善仕様を用いて、仮説の検証を実施する。

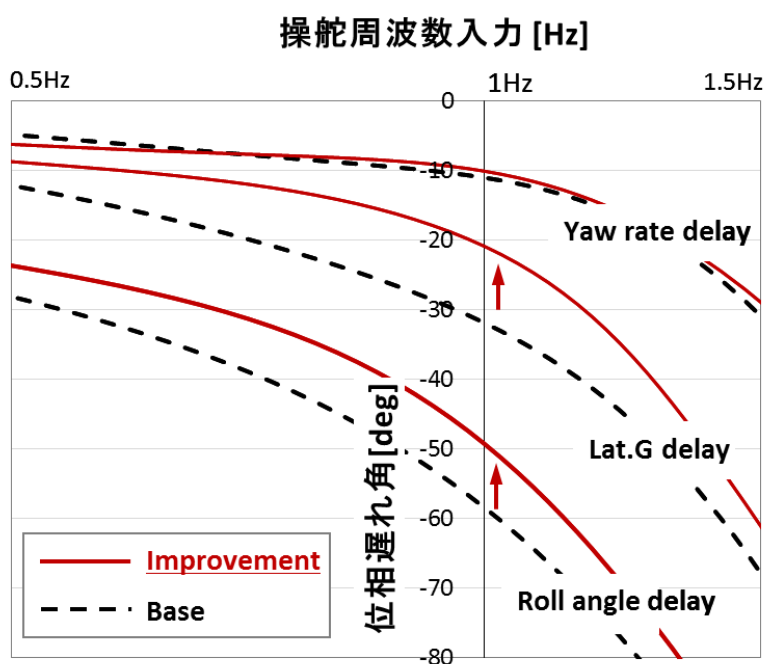


図 5-9 ベース仕様と改善仕様の操舵応答特性 実車計測結果

5.4 実車実験検証

5.4.1 実験検証方法

本実験は、日産自動車(株)実験倫理委員会の審査を受け、承認を得た内容であり、実験参加者からインフォームドコンセントを得た上で実施した。

実車実験は、DS 実験と同じく、普段から通勤等で車を運転している 30 代～40 代の男性計 5 名を被験者にして実施した。実験評価コースを、80kph 一定速で、カーブに沿ってできるだけ車線中央を走行するようなタスクを与えた。十分な練習走行を行った後、それぞれの仕様で、70R での走行軌跡、車線中央からの乖離量を、N=5 試行回 GPS を使って計測した。

修正操舵量の計測、及び「意のまま」の官能評価は、これまでに実施してきたいくつかの車両の計測結果及び評価結果との比較検証を行うために、専任のスキルドライバにて実施した。評価スケールを表 5-2 に示す。

表 5-2 官能評価 評点スケール

10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
非常に良い		良い	やや良い	普通(平均)	やや悪い	悪い	非常に悪い		

5.4.2 ドライバが意のままと感じる車両操舵応答特性の実験検証結果

最初に、走行軌跡の計測検証結果を示す。図 5-10 は、あるドライバの走行軌跡の結果である。(c)の拡大図 2 は、(a)の評価コース全体図に対して、計測開始地点直後の右カーブに入った時の、走行軌跡を拡大して示したグラフである。グラフの数値は、計測開始地点の車線中央を原点として、その原点からの距離を、原点通過時の進行方向を横軸に、左右方向（進行方向左を+）を縦軸に示したものである。

黒破線で表される車線中央ラインに対して、緑の点線は量産車、黒実線はベース仕様、そして赤実線は改善仕様を示しており、想定通り、量産車、ベース仕様、改善仕様の順番に、車線中央からの乖離量が減少していることが確認できる。

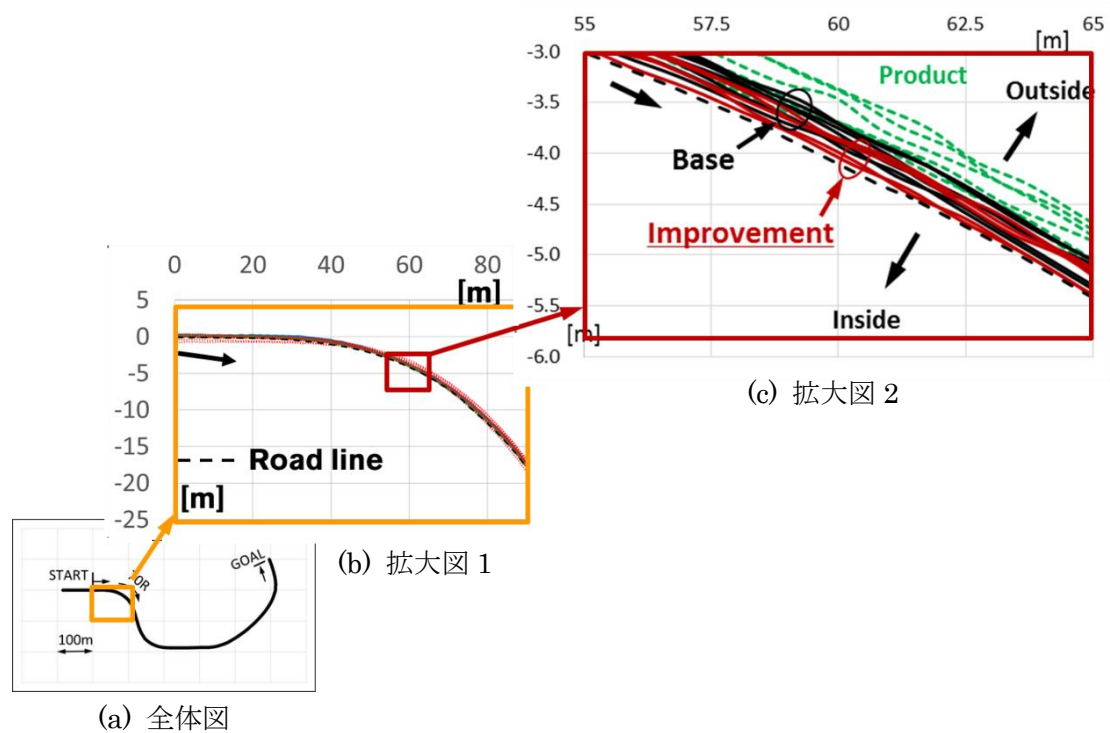


図 5-10 走行軌跡の計測結果の一例

また、図 5-11 は、被験者 5 名、各仕様 5 試行回の走行軌跡の車線中央からの乖離量（カーブ内側をマイナス、カーブ外側をプラス）の平均値とそのバラツキを、それぞれの仕様毎に示したものである。量産仕様からその乖離量で約半分程度に低減できているベース仕様に対して、改善仕様では更にそれを半減した、0.1m 以下となっていることが確認できる。この乖離量は、図 5-12 に示す、ドライバーが直進部分で車線中央を走行している時に計測された走行軌跡のバラツキである±0.1m 以下となる、極めて小さいレベルとなっていることから、改善仕様走行でのカーブ進入において、ドライバーは目標とした走行ラインを正確にトレースできていると感じているものと考えられる。

DS 実験同様、実車実験においても、今回立案した、カーブの進入でドライバーが目標とした走行ラインを正確にトレースできる操舵応答特性の仮説が検証できた。

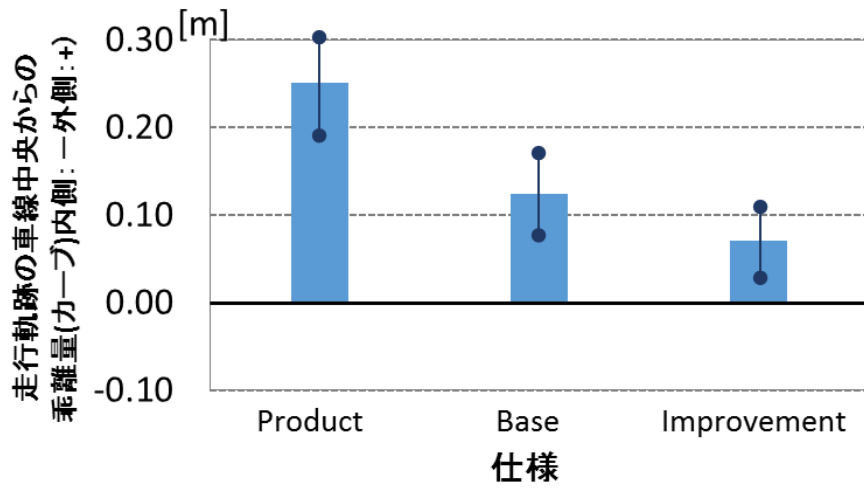


図 5-11 走行軌跡実車計測結果 被験者 5 名の車線中央からの乖離量平均値とバラツキ比較

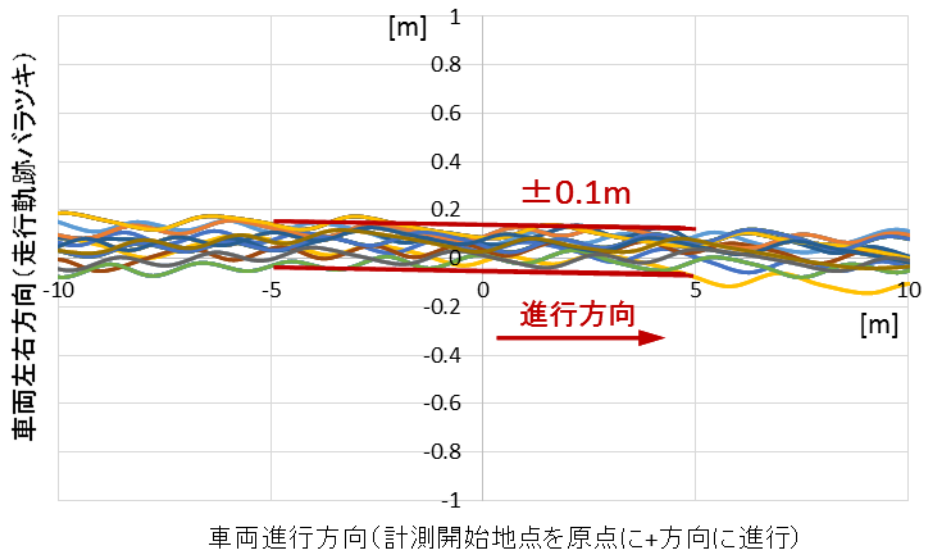


図 5-12 被験者 5 名の直進部分での走行軌跡のバラツキ

次に、専任のスキルドライバによる修正操舵量の計測と官能評価結果について示す。図 5-13 は、横軸を修正操舵量に、縦軸を官能評価結果として、これまで評価してきた C セグメントのいくつかの車両と比較する形で、「量産仕様」、「ベース仕様」そして、「改善仕様」の 3 台の評価結果をプロットしたものである。

既にセグメントトップレベルの性能を実現している「ベース仕様」に対して、「改善仕様」は、修正操舵量がやや抑えられるとともに、官能評価で更に 1 ランクの性能向上が確認できた。また、図中の赤破線で示した、これまで計測・評価してきた車両群の修正操舵量と官能評価の相関ラインと比較すると、ベース仕様からわずかな修正操舵量の低減量で、より効果的に「ドライバが意のままと感じる」官能評価の向上を実現できていることが確認された。

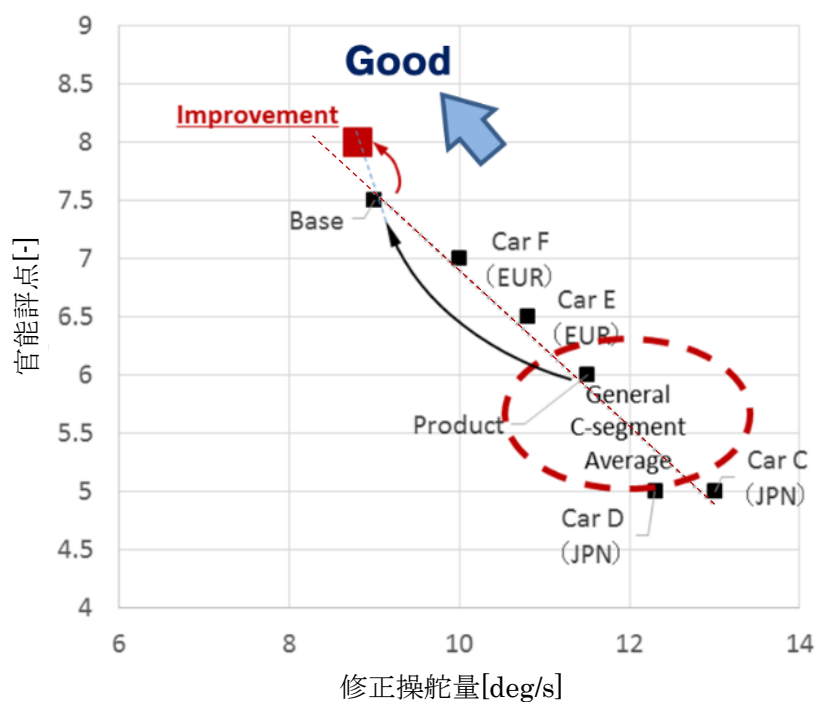


図 5-13 同セグメント内での位置づけ

以上、実車実験においても、「ドライバが意のままと感じる車両操舵応答特性」の仮説検証が完了した。

5.5 本章のまとめ

車両の走行は、現在の車両の走行状態から、次にドライバーが目標とした走行ラインに対するドライバーの操舵特性による車両への操舵入力と、車両の操舵応答特性による車両挙動と走行状態の変化、これらの繰り返しのよって作られてゆく。ここでは、第4章と同じく、第3章で定量的に算出した「ドライバーが目標とした走行ラインを正確にトレースできる操舵応答特性」の仮説の特性を、実際に具現化した実車両を使って検証した。また、その特性とすることで、従来の応答遅れ低減による性能向上と合わせて、より効果的に「ドライバーが意のままと感じる」性能を向上できることを修正操舵量計測と官能評価により検証した。(図5-14)

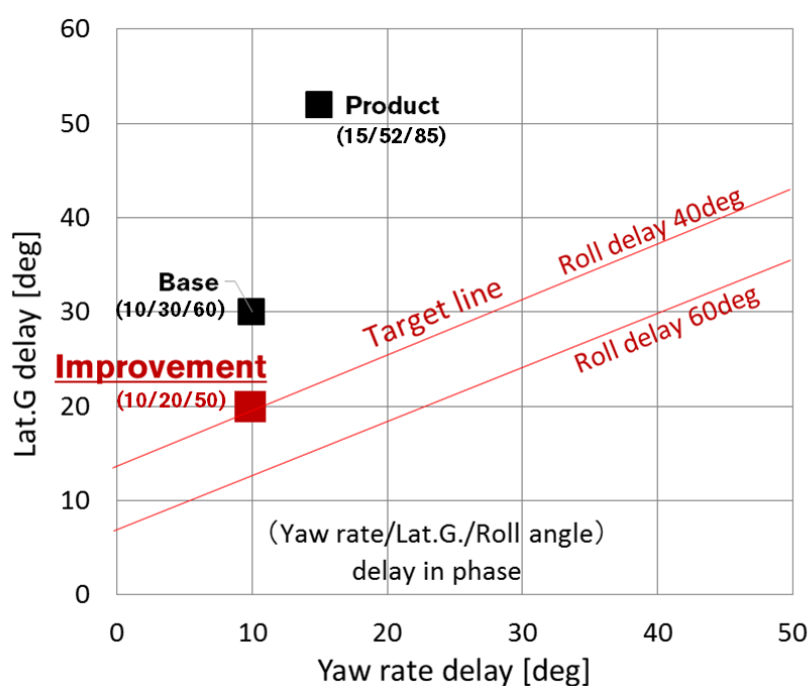


図5-14 「ドライバーが意のままと感じる」性能を効果的に向上できる車両特性

第6章 考 察

6.1 本章の目的

ここでは、研究の目的に対する検証実験で得られた結果に対する解釈、制約条件や発展性等、今後の運動性能のあるべき姿について述べる。また、今回検証された官能評価結果の裏付けとして、脳計測による分析結果を合わせて紹介する。

6.2 ドライバが意のままと感じる車両の操舵応答特性

ドライバが意のままと感じる車両の操舵応答特性の仮説に対し、DS 実験及び実車実験において、その検証が完了した。カーブの進入でドライバが目標とした走行ラインを正確にトレースできる、操舵に対する車両のヨーレート、横加速度、ロール角の位相遅れの定量的なバランスを明確にするとともに、その特性とすることによって、従来の応答遅れ低減による性能向上と合わせて、より効果的に「ドライバが意のままと感じる」性能を向上できることを明らかにした。(図 6-1)

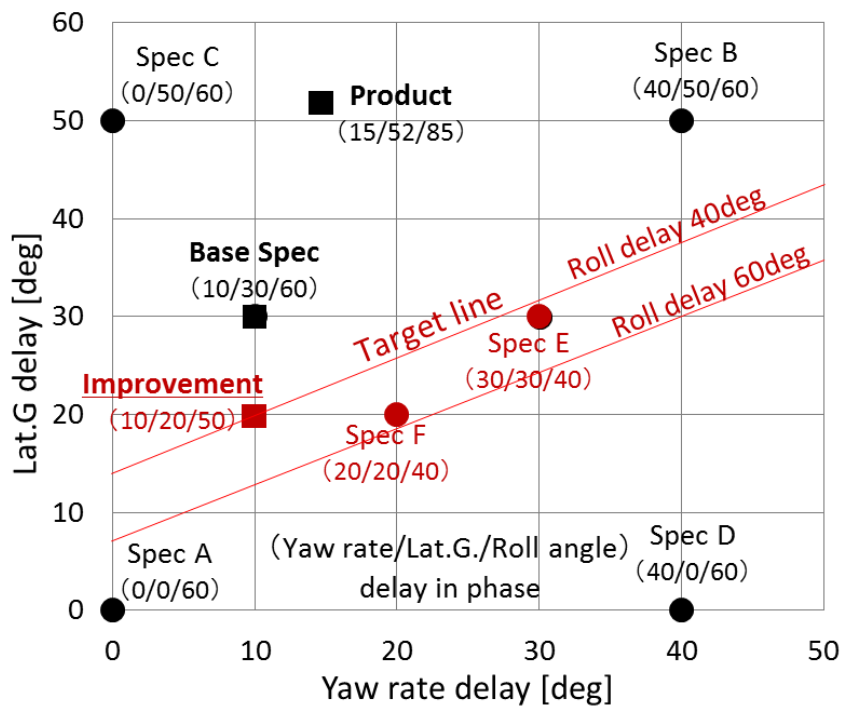


図 6-1 「ドライバが意のままと感じる」性能を効果的に向上できる車両特性

横加速度の遅れをゼロとした A 仕様や D 仕様は、カーブの進入で車両が内側に切れ込む傾向が見られたが、その後の素早い操舵による修正が、極めて容易に行うことができ、被験者からの評価が高かった。まさに従来手法による、修正操舵の少なさによる効果が確認できた。一方 F 仕様や改善仕様は、操作ミス等、なんらかの要因で車両が車線中央からずれてしまった場合の修正の容易さは、A 仕様や D 仕様に及ばないものの、目標とした走行ラインを正確にトレースできることで、それらと同等以上の評価となることが確認できた。

本研究のドライバモデルの同定においては、普段から通勤等で車を運転している 30 代～40 代の男性を被験者として選定したため、モデル間には大きなバラツキはなく、その中でも代表的なモデルを使った検討を進めることができた。しかしながら、年齢層差、性別差、運転頻度差等によって、そのバラツキは大きくなることが想像される。今後、さまざまな方のドライバモデルを同定することによって、それぞれのパラメータの特徴や相場感を把握し、それらの違いによる必要な車両特性への影響度を明確にしていく必要があると考える。

カーブの進入でドライバが目標とした走行ラインを正確にトレースできる操舵応答特性として、本研究では 70R への進入を題材に詳細検討を実施したが、旋回半径違いへの適応性について検討した。通常走行の場合、ドライバは 0.5Hz から、せいぜい 1Hz の間の操舵を実施している。この範囲であれば、操舵に対するヨーレイト、横加速度、ロール角の位相関係は、ほぼ線形で変化するので、今回抽出した関係は概ね適用できると考えられる。図 6-2 のグラフは、これまで検討してきた 70R 以外の、実験評価コースでも設定のある 90R、110R に対して、カーブの進入でドライバが目標とした走行ラインを正確にトレースできる車両応答特性の関係を、70R の時と同様にして算出したものであり、3 本のラインは、概ね同等になることが確認されている。DS 評価や実車評価でも、改善仕様がすべてのカーブで総じて良い評価になったことが確認されており、それはここからも説明できる。

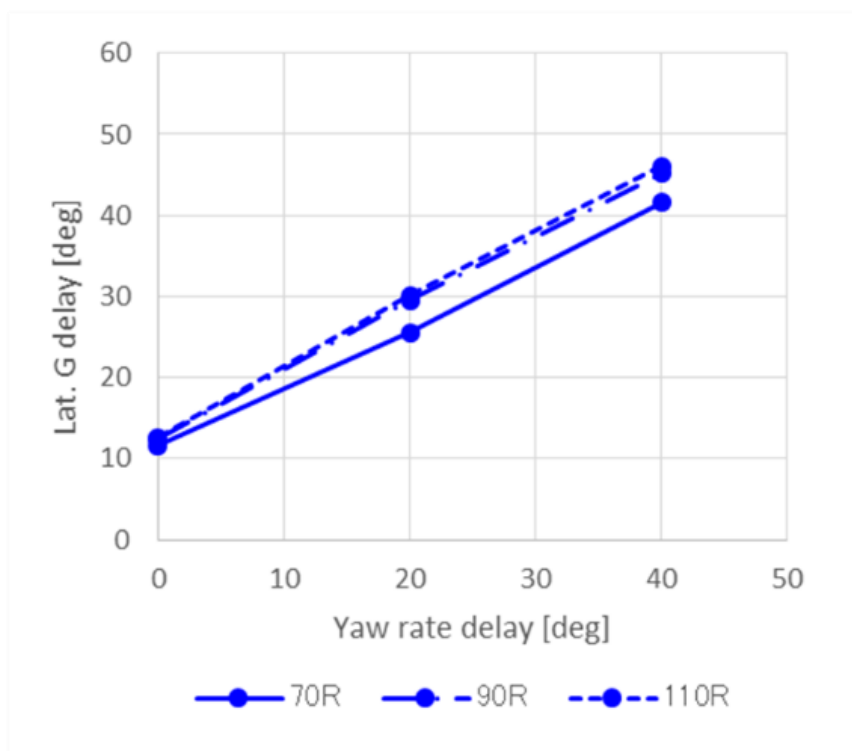


図 6-2 旋回 R 違いでの必要な操舵応答特性の変化

6.3 脳計測による官能評価の裏付け

本論では、ドライバが意のままと感じるためには、カーブの進入でドライバが目標とした走行ラインを正確にトレースできることが必要であることを、官能評価により検証を行った。ここでは、両者の関係について、脳計測^{[60][61]}を使ったそのプロセスレベルでの確認と解釈を通して、その確からしさについて掘り下げた^[62]。

6.3.1 fNIRS 計測

李は「自動車運転行動の特徴量抽出とドライバ脳活動計測による運転技量の評価」^{[63][64]}の中で、図 6-3(d)で示すような、直進からカーブに進入している車両走行実験で fNIRS 計測を行い、走行中のドライバの脳内の酸素消費量 (ΔCOE) を観測することによって、カーブの進入において、より滑らかな走行ができる熟練ドライバは、未熟練ドライバと比べて、視覚や体感などの情報を統合し、次の行動を決めるとされている部位である頭頂連合野、BA7 (図 6-3(b)) の活性化レベルに、図 6-3(a)(c)に示すような、明確な差が確認されたとしている。

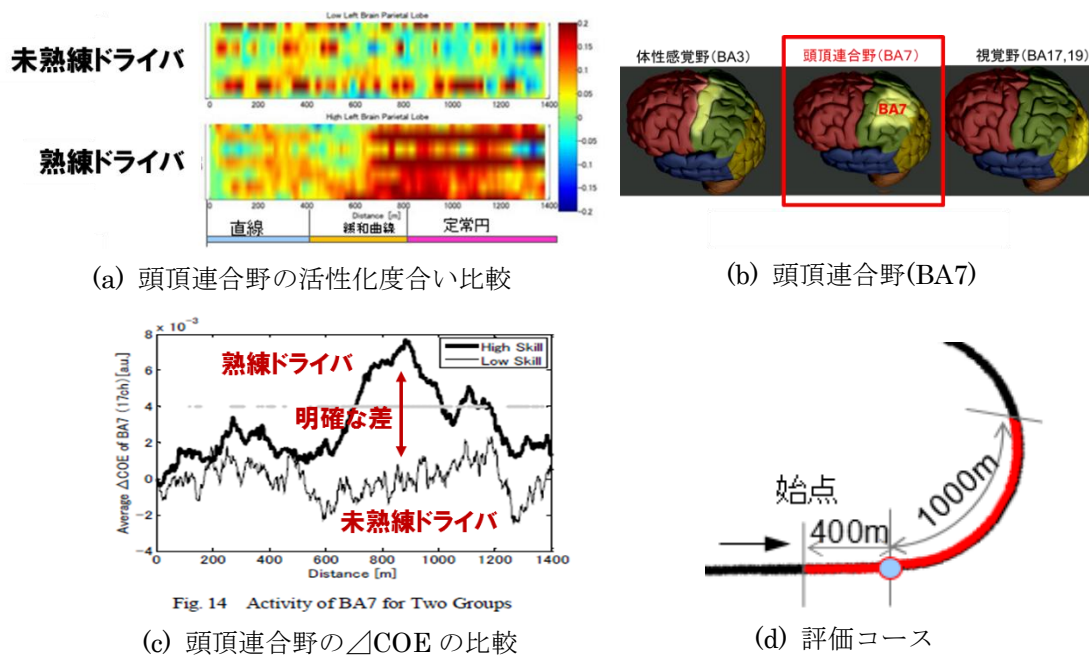


図 6-3 fNIRS を用いた脳計測の先行研究例^[63]

この先行実験のケースから、熟練ドライバは、ヨーレイトやロール角等から得られる視覚情報、横加速度や操舵力から得られる体感情報に対して、それらの情報の統合と次に実施すべき操作の指令を、容易に実行することができ、結果 BA7 が活性化していると解釈できる。この解釈をベースに、本研究では、カーブの進入でドライバが目標とした走行ラインをトレースすることが難しい仕様では、ドライバが、ヨーレイトやロール角から得る視覚情報、横加速度や操

舵力から得る体感情報を統合して正しい操舵を決めることがより難しく，BA7が活性化しにくい．一方，ドライバが目標とした走行ラインをより正確にトレースできる仕様は，視覚情報，体感情報を統合して正しい操舵を決めることが比較的容易であるため，BA7がより活性化しやすいという仮説を立て，第4章のDS検証実験と合わせてfNIRS計測を実施した．

図6-4に，その計測結果を示す．これは横軸に各仕様毎の，全7被験者，全4試行回の評価区間での Δ COEの平均値を縦軸に示したグラフであり，EおよびF仕様の値は，A仕様と同様に，他の仕様と比較して高い Δ COE値となることが確認されている．

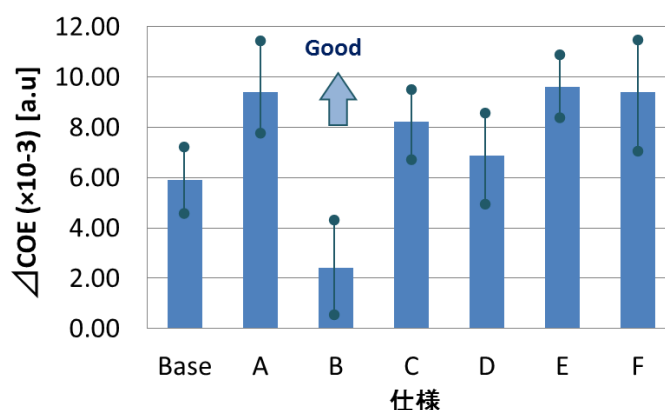


図 6-4 BA7 での Δ COE 平均値とバラツキ比較

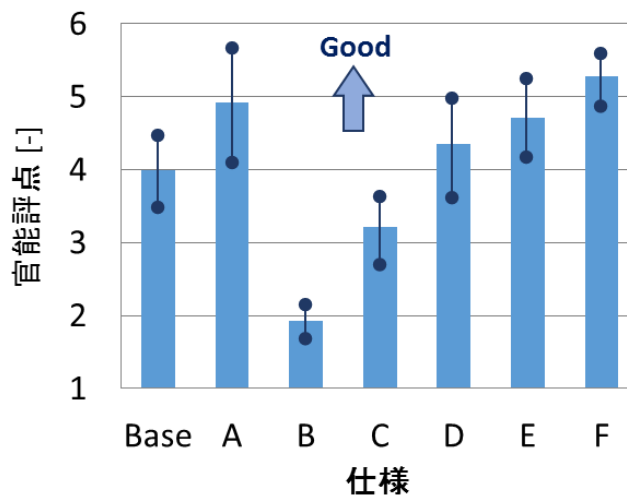


図 4-4 官能評価結果 7名平均値とバラツキ(再掲)

目標とした走行ラインをより正確にトレースできる仕様では，頭頂連合野 BA7 の活性化度合いが高いことから，視覚情報，体感情報を統合して正しい操舵を，より容易に決められていると解釈でき，その容易さが官能評価の向上につながっていると考えられる．

6.3.2 脳波計測

fNIRS 計測は、脳計測の中でも、脳のどの部位での活動が活発になっているかという空間分解能に優れた計測方法であるが、脳がどのタイミングで反応したかという観点から、時間分解能に優れた脳波計測によっても、官能評価結果を裏付けるメカニズムを確認している。人は、手を動かすなど、何か意志を持って行動を起こす1~2秒手前から、図6-5^[65]に示すように、頭頂部付近を最大に、Movement-Related Cortical Potential（以下、MRCP）、運動準備電位と呼ばれる、負の電位が発生することが知られており、打鍵実験などでその検証がされている^[66]。グラフは、右手の人差し指で自発的にボタンを押した場合のMRCPを計測したものであり、実際に手が動いた瞬間をゼロとして、横軸に時間を、縦軸に電位を表したものである。手が動き始める1~2秒くらい前からその電位が増大し始め、手の運動の直前で最大振幅（10~15 μ V）となっていることが確認されている。

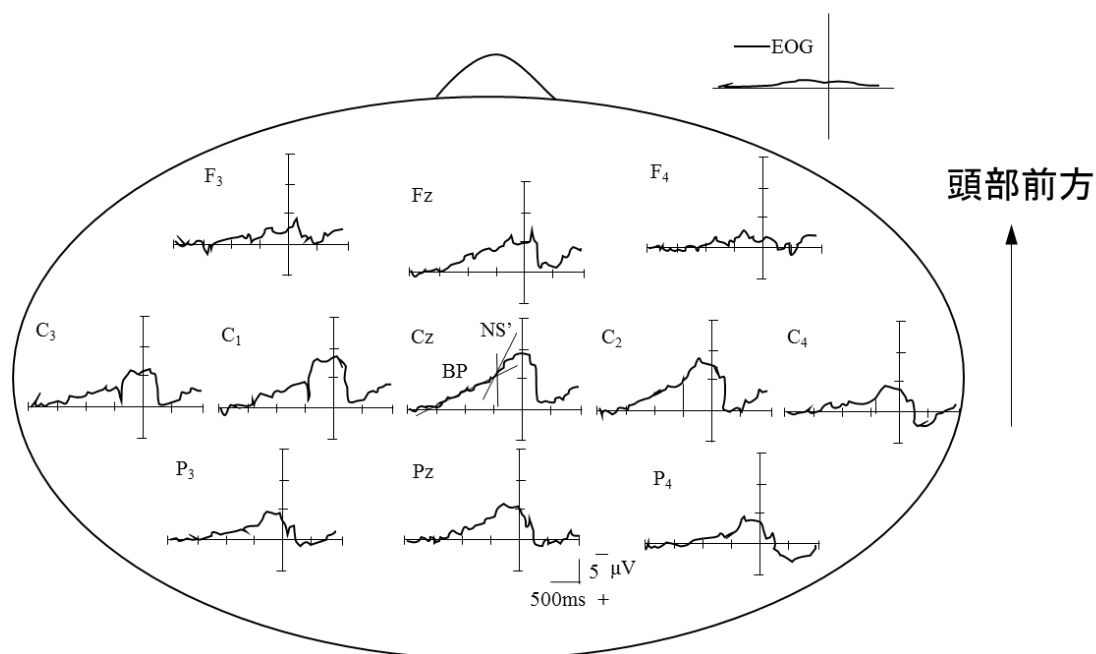
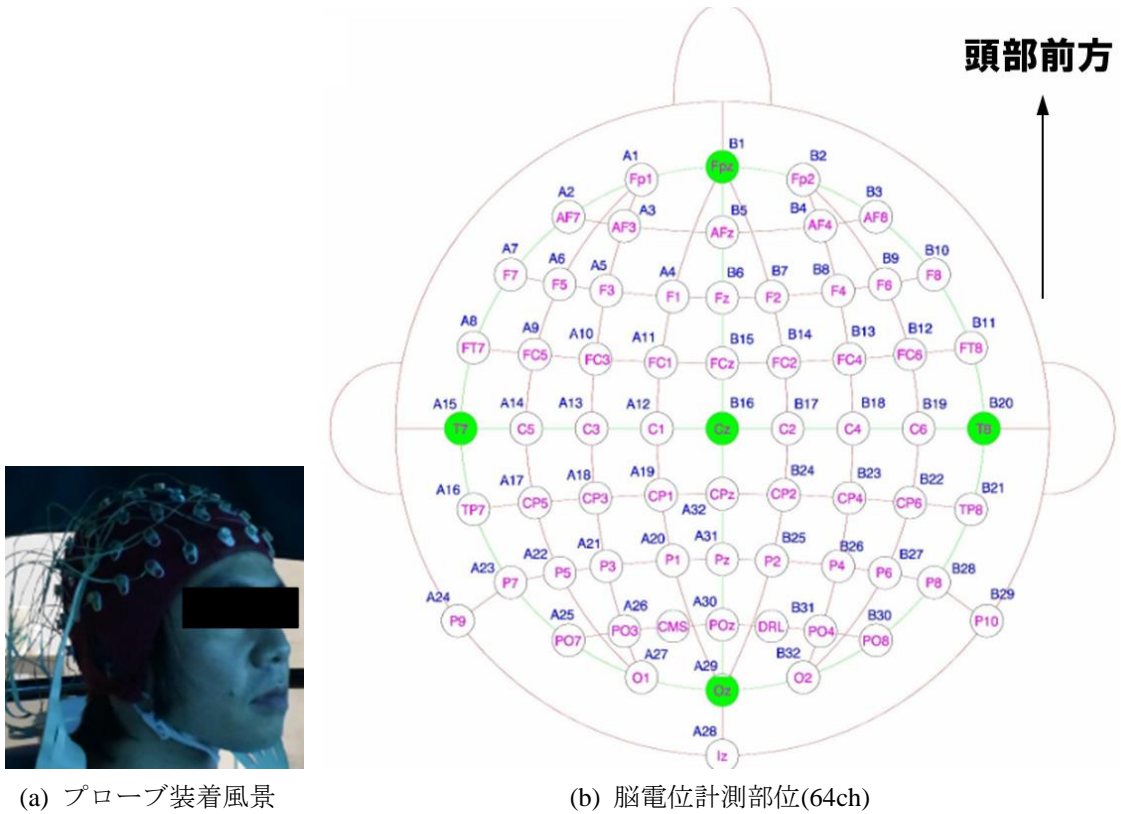


図 6-5 運動準備電位（MRCP）の計測事例^[65]

先行研究^[67]では、タッチパネル上の照準に指を合わせるという実験を行い、その操作が高い精度で実施できた場合には、MRCPの傾きが大きくなることが報告されている。本研究では、目標とした走行ラインを正確にトレースすることができる場合には、そうでない場合に対して、MRCPの傾きが大きくなるという仮説を立て、第4章のDSでの検証実験と合わせて脳波計測を実施した。

図 6-6(a)で示したようなプローブを被験者に装着し，図 6-6(b)に示した 64ch の部位を，256Hz のサンプリング周波数で計測した．ノイズの除去としては，脳活動の影響が最も出にくいとされる左右両端 T7,T8 の平均値を全体から差し引いた上，0.1~1Hz のバンドパスフィルタをかけた．また，まばたきや首を動かした時に現われる反応の除去として， $-50\sim+50\mu\text{V}$ のデータのみを採用した．計測器は Biosemi 社製の Active Two EEG を使用した．



(a) プローブ装着風景

(b) 脳電位計測部位(64ch)

図 6-6 脳波計測方法

図 6-7 は、あるドライバの、直進からカーブに進入する操舵の動作をした時の、操舵を開始したタイミングを 0s とした MRCP の観測結果事例であり、操舵開始の約 2s 手前あたりから、頭頂計測部 Cz の周辺に負の電圧が確認された。そして図 6-8 は、評価が良いとされる A 仕様と、そうでない B 仕様の、あるドライバによる、全 40 試行回の MRCP の加算平均値と、その標準偏差 (1σ) を、横軸を時間に示したものである。ライントレースの正確さに優れる A 仕様は B 仕様と比べて、試行回ごとの MRCP のバラツキ (標準偏差) が少なく、またその電位差 (勾配) も大きいことが確認できる。DS 装置が発生する高周波ノイズが懸念されたが、全 40 回の加算平均と 0.1~1Hz のバンドパスフィルタにより、低い周波数成分で構成される MRCP が抽出できたと考えられる。

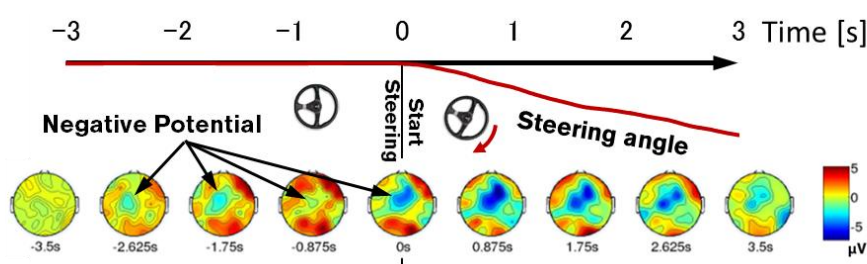
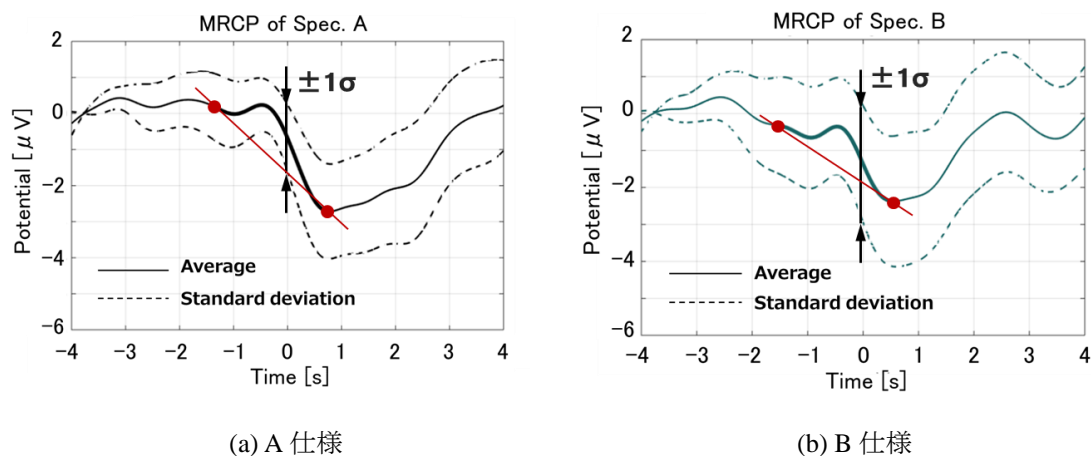


図 6-7 ドライバが操舵をするタイミングでの MRCP 計測結果



(a) A 仕様

(b) B 仕様

図 6-8 A 仕様と B 仕様の MRCP 加算平均値比較

MRCP の負勾配値は、同じく先行研究^[67]で定義されているものを使用した。図 6-8 の赤線で示したように、加算平均ラインにおける、操作開始後に最大負電位となる点と、その時間から 2 秒さかのぼった点とを結んだ直線の負勾配値とした^[67]。図 6-9 は、ベース及び A~F の各仕様ごとの、被験者 7 名の負勾配値の平均値を示しており、E および F 仕様の値は、A 仕様と同様に、他の仕様と比較して高い値となることが確認された。

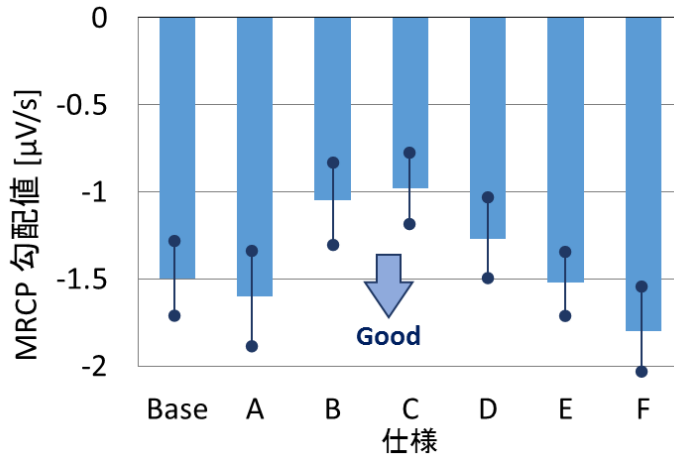


図 6-9 MRCP 負勾配の平均値とバラツキ比較

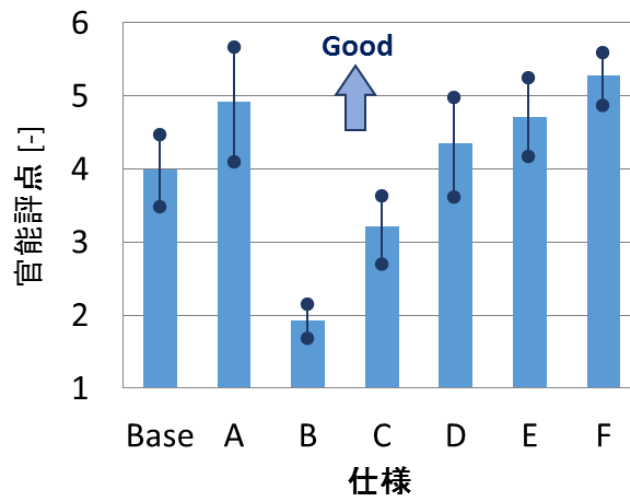


図 4-4 官能評価結果 7名平均値とバラツキ(再掲)

図 4-4 に示す官能評価と MRCP の負勾配値は、概ね良い相関がみられることから、この脳波計測の観点からも、官能評価の向上が説明できると考えられる。

以上、2 種類の脳計測を使って、DS 及び実車実験で検証した官能評価の確からしさを、より客観的な方法で、裏付けることができた。

これらの脳計測を使った分析手法は、バラツキや再現性の面での課題も少なくないものの、自動運転技術の発展に合わせて、ドライバーの意図を読み取る有力な方法の一つとして、その研究が盛んになってくると思われる。今回、研究の中で得られた知見や成果は、そういった領域にも大きく発展できる可能性があると考えられる。

6.4 車両運動性能のあるべき姿

これまでの車両運動性能技術の進化によって、現在量産されている車両では、ほとんどのユーザーが通常の使い方において、不満を感じないレベルの性能が実現できているようになってきた。カーブを走行した時にロールの嫌味を感じることはほとんど無く、アンダーステアによる曲がりにくさを感じることもまずない。しかし、それらの進化は、車両をいわば工業製品のごとく、主にその製品そのものの性能を向上させることによって実現されてきた。今後、我々が注力すべき領域は、ドライバ特性を考え抜いた車両を実現させることではないかと考える。そもそも車両の運転とは、目標の走行ラインに沿って、ドライバが操舵入力を車両に与え、車両が反応し、ドライバはその反応を見て次の操舵入力を与え、そしてまた車両が反応し、といった、いわば走行ラインという同じ目標に向けた、ドライバと車両の共同作業とさえ言うことができる(図6-10)。目標に向けて、ドライバが目標とした通りに車両が正確に反応するとともに、車両が次のドライバの操作を予測して、正確にその操作を実行できる情報や挙動をドライバに返す。そんなことができる車両を目指すべきではないかと考えると、やるべきことはまだまだ多く存在する。



図 6-10 ドライバと車両のコミュニケーションのイメージ

今回の研究では、一定速度でカーブに進入するシーンについて、操舵角に対するヨー、ロール、横方向の3つの車両応答特性に着目して取り組んだ。今回取り組んだ手法を使って、今後、レーンチェンジや旋回加減速などへのシーンの拡大、操舵力やピッチ挙動などへの特性の拡大等、あらゆるシーンで、ドライバと車両が、阿吽のコミュニケーションを取りながら走行できるような車両を実現していくことへ、発展していくことが可能である。

タイヤの特性に関して、今回、その試作車両の仕様検討において、その横剛性が操舵応答特性に及ぼす影響を定量的に分析し、従来の2輪モデルをベースに、そのメカニズムを織り込んだ新たな車両モデルを構築した。今後、車両運動性能から、タイヤへの要求性能をより定量的に提示できるようになることで、タイヤ性能の技術がさらに加速することが期待できる。

ロール特性についても、その位相遅れがライントレース性に影響を及ぼすこと、またその定量的な影響代が明確になったことは、大きな成果であると考えられる。今回のコンベンショナルなショックアブソーバーでは具体的な性能向上方策を見出すことは難しかったが、冒頭でも説明した通り、昨今技術開発が進んでいる電子制御ショックアブソーバーを適用することによって、更なる性能向上が期待できる。当然それは、直進時には減衰力を下げて乗心地を向上させ、旋回時には減衰力を上げてロールを抑える、といった従来の性能向上の延長とは違った、ドライバの操舵特性を考えた場合の、そこから必要な減衰力特性という新しい要求特性になることは言うまでもない。

実車両での検証においては、筆者もその仕様の試乗体感をした。ベース仕様では、カーブの進入で若干ではあるが外側に膨らむ傾向があったが、改善仕様では、その感覚がほとんど感じられず、狙ったラインに吸い込まれるような、人とクルマが一体となって、まさに意のままに、カーブに進入していく感覚を体感できた。これは、これまでの車両性能そのものを向上する取り組みの中では感じられなかった現象であり、ドライバの事をもっと良く知り、その上でドライバの意に合う車両を開発することの重要性を、身を持って実感することができた。

以上、本研究の成果は、次世代の車両運動性能向上技術として、活用することが必要であり、具体的な特性および方策として、車両の設計へフィードバックすることが可能である。

第 7 章

結 論

意のままに操れる車両は、ドライバに走る楽しさや快適性を提供するだけでなく、走行中のふらつきや運転の負担と疲労を軽減し、事故を未然に防ぐことにも貢献できる。そういった車両を実現するためには、車両そのものの性能を向上させるだけでは不十分であり、ドライバの操作特性を把握した上で、それに合わせた車両の特性としていく必要がある。本研究は、車両の基本的な運動である「走る」「曲がる」「止まる」の中で、もっともそのメカニズムが複雑な「曲がる」に着目し、ドライバが意のままと感じる車両の操舵応答特性について検討したものである。

第1章では、本研究の背景として車両運動性能の発展、現状の課題と先行研究の状況、これらに基づいた本研究の目的、前提条件、そして論文の構成を述べた。また、目的達成に向けた、「操舵に対する車両のヨーレイト、横加速度、ロールの遅れを、ある適切なバランスで設定することにより、ドライバは目標とした走行ラインを正確にトレースできる。」「その特性とすることで、従来の応答遅れ低減による性能向上と合わせて、より効果的に「ドライバが意のままと感じる」性能を向上できる。」という2つの仮説を述べた。

第2章では、カーブを走行中の車両挙動に対するドライバの操舵のメカニズムを分析し、その時間に対する操舵角を精度よく再現できるドライバモデルの構築について述べた。ヨー、ロール、横方向、それぞれに高い感度を持つ、前方注視点誤差モデル、ロールフィードバックモデル、走行軌跡モデルを定義して組み合わせることにより、3つの車両特性が異なる車両仕様を走行した場合でも、その操舵角を精度よく再現できるドライバモデルとそのパラメータを同定できることを示した。また、DSというシステムの制約の中でも、実車の計測データと定量的に比較しながらそれを可能な限り合わせ込むことによって、カーブを走行中の操舵角波形およびフィーリング評価で、高い実車再現性が確認された。

第3章では、第1章で立てた定性的な仮説「操舵に対する車両のヨーレイト、横加速度、ロールの遅れを、ある適切なバランスで設定することにより、ドライバは目標とした走行ラインを正確にトレースできる。」に対して、第2章で定量的に把握したドライバの操舵特性を使って、解析によりその「適切なバランス」を定量的に算出した。カーブの進入で、3つのドライバモデルがどのように機能するのかについて考察し、操舵角に対する車両のヨーレイト、横加速度、ロール角の遅れ違いの車両走行軌跡、操舵パターンの変化をシミュレーションで分析することによって、そのバランスラインを算出した。

第4章では、第3章で定量的に算出した「ドライバが目標とした走行ラインを正確にトレースできる操舵応答特性」の仮説について、DS実験により検証した。また、その特性とすることで、従来の応答遅れ低減による性能向上と合わせて、より効果的に「ドライバが意のままと感じる」性能を向上できることを修正操舵量計測と官能評価により検証した。

第5章では、第4章と同じく、第3章で定量的に算出した「ドライバが目標とした走行ラインを正確にトレースできる操舵応答特性」を、実際に具現化した検証実車両を使って、その仮説を検証した。また、その特性とすることで、従来の応答遅れ低減による性能向上と合わせて、より効果的に「ドライバが意のままと感じる」性能を向上できることを修正操舵量計測と官能評価により検証した。検証実車両の試作においては、従来の2輪モデルに対して、タイヤの横剛性による車両応答への影響を考慮できる要素を加えた新たな車両モデルを定義し、目標の操舵応答特性を実現するための、タイヤ及びロードホイールの仕様を決定した。

第6章では、研究の目的の対する検証実験で得られた結果に対する解釈、制約条件や発展性等についてその考察を述べた。今後のレーンチェンジ等へのシーンの拡大、ピッチ挙動などの特性の拡大等への本研究の発展、ドライバモデルのバラツキに対する今後の課題、今回の特性の旋回R違いへの適用性、官能評価に対する脳計測による裏付けや自動運転技術への今後の応用、また、タイヤの横剛性やロールを制御するショックアブソーバー技術への期待、最後に実車両を試乗体感も含めて研究の有効性を述べた。

本研究では、操舵に対する車両のヨーレイト、横加速度、ロールの遅れを、ある適切なバランスに設定することにより、ドライバは目標とした走行ラインを正確にトレースできる。また、その適切なバランスの特性とすることで、従来の研究手法の操舵に対するヨーレイトや横加速度の応答遅れ低減による性能向上と合わせて、より効果的に「ドライバが意のままと感じる」性能を向上できる。という仮説を立てて、実験によりそれらの仮説の妥当性を検証してきた。

具体的には、まず、カーブを走行する時にドライバはヨー、ロール、横方向の3つの車両挙動を走行レーンとの関係を見ながら次の操舵を決めていると考え、それぞれの挙動に対応したドライバモデルを定義した。次に、定義したドライバモデルを前提に、カーブの進入でドライバが目標とした走行ラインを正確にトレースできる、車両操舵応答特性の関係を特性した。最後に、その特性を再現した車両のDS実験、実車実験でのデータ計測、官能評価、さらには脳活動計測による検証を完了し、下記の結論を得た。

- 車両のヨー方向，ロール方向，横方向，3つの挙動に対するドライバの操舵特性を把握し，それらを組み合わせたドライバモデルを構築した．実験結果との比較によりモデルのパラメータを同定することによって，カーブを走行中のドライバの時間に対する操舵角を精度よく予測できることを確認した．
- ドライバの操舵特性を把握した上で，ドライバと車両が直進からカーブに進入していくときのドライバの操舵と車両挙動の関係，そしてそれらの走行軌跡への影響を知ることで，ドライバが目標とした走行ラインを正確にトレースできる，車両ヨーレイト，ロール角，横加速度の遅れのバランス関係があること，その定量的な関係を明らかにした．
- カーブの進入で，ドライバが目標とした走行ラインを正確にトレースできる車両応答特性とすることによって，従来の研究手法の操舵に対するヨーレイトや横加速度の応答遅れ低減による性能向上と合わせて，より効果的に「ドライバが意のままと感じる」性能を向上できることを，DS実験と実車実験で明らかにした．また，脳計測を実施し，仕様毎のドライバの生体反応を比較することで，官能評価の確からしさを裏付けた．

以上，シーンと現象を限定するものの，従来の研究と合わせて，より効果的に性能向上が可能な，「ドライバが意のままと感じる車両の操舵応答特性」を解明することができた．

今後の展望として，これまで進化してきた車両性能そのものの更なる進化に加えて，昨今盛んになっている電子制御デバイスの活用しながら，今回解明してきたドライバが意のままと感じる性能を，あらゆるシーン，あらゆる現象へ発展させていく．そして，任せて安心できる自動運転への応用はもちろんのこと，自動運転が普及した時代にも，走る楽しさを提供し続けられるよう，そして事故のない社会に貢献できるよう，本研究を発展させていく．

付録
研究に使用した
ドライビングシミュレータ

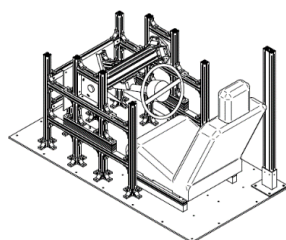
研究に用いた軽量・高応答の6自由度スチュワートプラットフォーム式DSについて、その概要を説明する^[63]。図8-1にその全体像を示す。



(a) 実験用 DS 全景



(b) 走行シナリオ



(c) 運転席



(d) 動揺装置

図8-1 実験用DS^[63]

図8-1(a)は実験走行様子を示している。3つのプロジェクタで構成される投影システムにより、カーブ時の前方視界などを再現している。図8-1(c)に示す運転席では普通車両と同じ座席、ハンドル、ブレーキ、アクセル装置を用いている。図8-1(d)には6自由度スチュワートプラットフォームを表している。これで車両運動を模擬し、ドライバにとって現実味を帯びた動きを体感できるようになっている。以下DSの仕様を詳細に述べる。

動揺装置

図 8-1(d)に、研究で使用した三菱プレシジョン製 MMS-612E2 の動揺装置を示した。これは、三菱プレシジョン製電動アクチュエータ P8160193 を 6 本、スチュワートプラットフォームに区合わせたものであり、6 自由度の運動が可能である。アクチュエータの瞬時最大推進力は 21.5KN、最高速度は 333mm/s、可動範囲は 300mm である。動揺装置の可動範囲、最大速度、定格加速度を表 8-1 に示す。

表 8-1 動揺装置の可動範囲、最大速度、定格加速度^[63]

	可動範囲	最大速度	定格加速度
前後	-200mm~+180mm	300mm/s	0.5G
左右	±190mm	300mm/s	0.5G
上下	-190mm~+230mm]	300mm/s	0.5G
ロール	±12deg	20deg/s	
ピッチ	-11deg~+12deg	20deg/s	
ヨー	±11deg	20deg/s	

質量は約 1000kg、最大可搬重量は 1500kg であり、寸法は、幅 2600mm、奥行き 2300mm、高さは 1500mm 以下である。アクチュエータ、制御装置、センサー等の異常が発生した際には、すぐに DS を止められるよう、運転者の手の届く位置、および実験従事者の手の届く位置に非常停止装置が備えられている。また、運転者にはシートベルトの装着を義務付けている。

アッパーフレーム、運転席

アッパーフレームには、安全のため柵が取り付けられているが、運転席を取り付けられるように、幅 900mm、長さ 1700mm の空間が空いている。合計 18 箇所 M12(直径 12mm)のボルトとナットで固定される。三菱プレシジョン社の設計の下、可搬重量に対して十分な強度を有している。

図 8-1(c) に示す運転席を、鉄製の板(幅 900mm、長さ 1700mm)上に取り付け、動揺装置上に定められたボルトによって定められた箇所に固定して取り付けられる。なお運転席は、ミスミ社のアルミフレーム(EFS8-4040)で構成され、座席、ハンドル、アクセルおよびブレーキペダル、3 点式シートベルトが取り付けられている。座席は、実際の自動車のシートを流用している(トヨタ、プリウス)。ハンドルは、株式会社 JTEKT 社製のステアリングコラムと操舵反力制御装置(E1030103)を使用している。ペダルは、三菱プレシジョン社製のペダルユニットを使用している。運転席後部にはスピーカーを設置し、模擬走行音を出力する。

ドライバの操舵角入力に対して、接続された車両モデルで車両挙動を計算し、これら DS の映像装置、動揺装置でそれらの挙動をリアルタイムに再現する(図 8-2)。車両モデルには、バーチャルメカニクス社のカーシムモデルを使用し、今回着目している 3 つの車両特性の計算結果それぞれに対して、そのゲインと遅れを、任意に変更できる要素を付加したものとした。



図 8-2 DS システム概要

参 考 文 献

- [1] 山本真規, 運動性能温故知新, トヨタ・テクニカル・レビュー, Vol55, No.1, pp.6-13(2006)
- [2] 景山一郎, 三本和彦, 寺沼潤, 加藤光治, 横井英夫, 家田仁, 20世紀に自動車をもたらしたものの, 自動車技術, Vol54, No.1, pp.5-12(2000)
- [3] 近森順, ほか, モーターファン・ロードテストからみた自動車性能の長期的変遷, 自動車技術, 56(11), 84-88, 2002-11-01
- [5] 特許庁ホームページ, 自動車の操縦安定性向上技術に関する特許出願技術動向
http://www.jpo.go.jp/shiryou/pdf/gidou-houkoku/car_soujuuantei.pdf (2018年1月1日アクセス)
- [4] 吉本達也, 深尾隆則, 横小路泰義, 伊能寛, 松本平樹, 乗り心地と追従性を両立する自動車の自動操舵制御, 自動車技術会論文集, Vol47(4), pp.997-1002 (2016)
- [5] 佐々木政治, 自動制動装置に対するドライバの安心感に関する実験的検討, 日本機械学会交通・物流部門大会講演論文集, No.01-36, pp.423-426(2001)
- [6] 矢崎経済研究所ホームページ, 自動運転システムの世界市場に関する調査を実施
<https://www.yano.co.jp/press/press.php/001633> (2018年1月1日アクセス)
- [7] 警察庁ホームページ, 交通事故死者数 <https://www.npa.go.jp/publications/statistics/index.html> (2018年1月1日アクセス)
- [8] 後藤新一, 自動車用燃料に関する地球エネルギー資源の現状と将来展望, 自動車技術, Vol54, No.9, pp.4-10(2000)
- [9] 穂高武, タイヤによる低燃費化技術: 自動車側からみた現状と課題, 自動車技術, Vol67, No.4, pp.39-44(2013)
- [10] 山岡俊樹, ヒューマンデザインテクノロジーによる人間中心設計, 自動車技術, Vol58, No.1, pp.81-86(2004)
- [11] 増山英太郎, 人間の感性の評価法, 自動車技術, Vol47, No.3, pp.61-69(1993)
- [12] 梅原清和 他, 感性工学に基づいた運転者の自動車操縦性評価, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.33-02, pp.9-12(2002)
- [13] 永井正夫, マン・マシン・システムの理論, 自動車技術, Vol39, No.5, pp.486-492(1985)
- [14] Ulrich Habock, Jochen Schwenninger, Andreas Redepenning, Claudia Buchner, Human-centred Engineering Future of the Technology Industry, ATZ, pp.45-47(2017)
- [15] 赤松幹之, 高橋宏, 岩男真由美, 金森等, 吉田倫幸, ヒューマンセンタード, 自動車技術, Vol57, No.1, pp.4-10(2003)
- [16] 貴島孝雄, 感性重視の車開発, 自動車技術, Vol61, No.6, pp.50-56(2007)
- [17] 佐野彰一, ほか, 車両のヨー応答特性と横加速度応答特性が人間-自動車系の性能に及ぼす影響, 自動車技術会論文集, No.26, pp.135-141 (1983)
- [18] 久岡雄二, ほか, ドライバにとって望ましい車両応答と操舵トルクに関する研究, 自動車技術会論文集, Vol28(4), pp.61-66 (1997)

- [19] 原田宏, 人間-自動車系の操舵安定限界と操縦安定性評価 -車線変更走行における後輪操舵の効果-, 自動車技術会論文集, Vol23(3), pp.81-86 (1992)
- [20] 原田宏, 操縦性/安定性技術を振り返る - 操安性定量評価の試み, 自動車技術, Vol49, No.12, pp.34-40(1995)
- [21] 上原繁, ほか, ドライバフィーリングと操安特性との関連, 自動車技術, Vol.41 No.3 pp.341-347 (1987)
- [22] 青木康浩, ほか, 基礎的車両応答パラメータと操舵特性評価に関する研究, 自動車技術会学術講演会講演予稿集, No. 20115817, pp.15-18 (2011)
- [23] 中谷弘能, 自動車の望ましい応答特性について, 国際交通安全学会誌, Vol10(2), pp.62-70 (1984)
- [24] 中谷弘能, 車両の操舵応答特性の最適化に関する研究 - 操舵力, ヨー角速度及び横加速度の関係について -, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.924-3, pp.193-196(1992)
- [25] 浅井彰司, ほか, 高速旋回時の安心感と車体スリップ角特性との関係, 自動車技術会論文集, Vol44(2), pp.467-472 (2013)
- [26] 風間恵介, ほか, ドライバの操舵に対する車両挙動の位相遅れと高周波ゲインが運転しやすさに及ぼす影響, 日本機械学会論文集, No. 78-794 (2012)
- [27] 平松金雄, 操舵フィーリングの数値化, 自動車技術会論文集, Vol45(3), pp.12-18 (1991)
- [28] 宮本勝祥, 他, タイヤコーナリング特性に依存して車両の基本諸元が操舵特性評価に及ぼす影響, 自動車技術会学術講演会講演予稿集, No. 20145286, pp.23-26 (2014)
- [29] 小野英一, 他, 高周波ボデー振動が自動車の操縦感覚に及ぼす影響解析, 日本機械学会, 第26回交通・物流部門大会(TRANSLOG2017) 講演論文集 No.17-53 (2017)
- [30] 井口雅一, 人間-機械系 -人による機械の制御-, 情報科学講座 B・9・2, 共立出版 (1970)
- [31] Dario D Salvucci, A two-point visual control model of steering, Perception, volume 33, pp 1233 - 1248 (2004)
- [32] 景山一郎, 自動車におけるドライバ特性の活用 -機械工学からの課題と展望-, 自動車技術, Vol68, No.3, pp.10-15(2014)
- [33] 栗谷川幸代, 景山一郎, ドライバモデルを用いた操舵状態パラメータ推定, 自動車技術, Vol70, No.4, pp.85-91(2016)
- [34] 栗谷川幸代, 景山一郎, ドライバ特性解析用ドライバモデル, 自動車技術, Vol64, No.10, pp.53-59(2010)
- [35] 岡田和幸, 景山一郎, ドライバモデルパラメータのオンライン推定に関する研究, 日本機械学会交通・物流部門大会講演論文集, No.07-51, pp.279-282(2007)
- [36] 栗谷川幸代, 景山一郎, ドライバモデルを用いた運転動作評価に関する研究, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.123-11, pp.11-16(2011)

- [37] 清水俊喜, 栗谷川幸代 (日本大学), 景山一郎, ドライバモデルを用いた運転特性推定に関する研究, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.110-12, pp.1-4(2012)
- [38] 栗谷川幸代, 基礎セミナー「自動車の運動力学」ドライバモデル, 日本機械学会, 交通・物流部門 (2012)
- [39] Andrew MC Odhams and David J Cole, Models of Driver Speed Choice in Curves, AVEC'04
- [40] 景山一郎, 自動車の運動性能に関する研究動向, 自動車技術, Vol54, No.11, pp.4-9(2000)
- [41] 伊能寛, 深尾隆則, オプティカルフローモデルを利用した操舵制御システムの開発, 自動車技術, Vol70, No.12, pp.59-64(2016)
- [42] Marco Cipelli, Driver-in-the-loop simulations with parametric car models, Vehicle System Dynamics Vol.46, Supplement, pp.33-48 (2008)
- [43] MANFRED PLÖCHL, Driver models in automobile dynamics application, Vehicle System Dynamics, Vol.45, Nos.7-8, pp.699-741 (2007)
- [44] AY Ungoren, An adaptive lateral preview driver model, Vehicle System Dynamics, Vol.43, No.4, pp. 245-259 (2005)
- [45] Charles C. Macadam (2003): Understanding and Modeling the Human Driver, Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 40:1-3, 101-134
- [46] Günther Prokop, Modeling Human Vehicle Driving by Model Predictive Online Optimization, Vehicle System Dynamics, Vol.35, No.1, pp.19-53 (2001)
- [47] 景山一郎, 渡辺良則, 大和田克幸, ニューラルネットワークを用いた人間-自動車系のモデル化, 自動車技術, Vol48, No.12, pp.5-11(1994)
- [48] 安部正人, 自動車と運動の制御(第2版) 東京電機大学出版局 (2012)
- [49] 安部正人, 「人と自動車」の研究 : ドライバの操舵特性に関する研究を例にして, 自動車技術, Vol62, No.6, pp.2-3(2008)
- [50] 市川紘基, 石尾 準, 狩野芳郎, 安部正人, ドライバ操舵モデルパラメータと車両運動性能の関係, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.104-08, pp.1-4(2008)
- [51] 阿部翔太, 水貝智洋, 平田淳一, 狩野芳郎, 山門誠, 安部正人, ロールの大きさがドライバの操舵特性評価に及ぼす影響, 自動車技術会 2015 年春季大会 学術講演会 講演予稿集, No.31-15S, pp.764-768(2015)
- [52] Johannes Edelmann, A passenger car driver model for higher lateral accelerations, Vehicle System Dynamics, Vol.45, No.12, pp.1117-1129 (2007)
- [53] Eunhyek Joa, A lateral driver model for vehicle-driver closedloop simulation at the limits of handling, Vehicle System Dynamics, Vol.53, No.9, pp.1247-1268 (2015)
- [54] 下山修, 自動車の運転技量差に注目したドライバ特性の研究, 東京大学博士論文, 2014
- [55] Steven D. Keen & David J. Cole (2011): Application of time-variant predictive control to modelling driver steering skill, Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 49:4, 527-559

- [56] 下山修, 須田義大, 山口太助, ドライバモデルによる運転技量差の解析, 日本機械学会交通・物流部門大会講演論文集, No.09-65, pp.243-246(2009)
- [57] 小野英一, 天野真輝, 服部義和, 生物に学ぶ移動関連技術②—コウモリの飛行から前方注視モデルの本質に迫る—, 自動車技術, Vol66, No.3, pp.76-80(2012)
- [58] 田尾光規, ほか, 修正操舵を低減する車両剛性に関する研究, 自動車技術会論文集, Vol46(2), pp.413-418 (2015)
- [59] 服部義和, ほか, 人間の感受性を考慮した4輪アクティブステア制御, 自動車技術会論文集, Vol39(2), pp.39-44 (2009)
- [60] Toshiyuki Shimizu, An exploratory study of the driver workload assessment by brain functional imaging using onboard fNIRS, SAE, No. 01-0592 (2012)
- [61] Toshiyuki Shimizu, Tatsuyoshi Nanbu, Takashi Sunda, fNIRS の車載による脳機能画像を用いた運転負担評価の実験的検討, SAE Paper, No.2011-01-0592(2011)
- [62] 福田忠彦, 人間工学と感性, 自動車技術, Vol61, No.6, pp.4-9(2007)
- [63] 李曙光, 自動車運転行動の特徴量抽出とドライバ脳活動計測による運転技量の評価, 東京大学博士論文, 2016
- [64] 李曙光, 杉町敏之, 山邊茂之, 中野公彦, 田淵義彦, 須田義大, 高橋秀喜, 折野好倫, 山本浩司, 吉野加容子, 岡徳之, 加藤俊徳, ドライビングシミュレータを用いた脳の計測に基づくドライバの運転特性, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.6-14, pp.3-8(2014)
- [65] 宮田洋, ほか, 新生理心理学, 北大路書房, pp.113-114 (1998)
- [66] 堀忠雄, 生理心理学 培風館 pp.135-136 (2008)
- [67] Satoshi Suzuki, The possibility of determination of accuracy of performance just before the onset of a reaching task using movement-related cortical potentials, Med. Biol. Eng. Comput. 48, pp.845-852 (2010)
- [68] 江副俊樹, 景山一郎, 藤井宏之, タイヤの横剛性を考慮したタイヤ動特性モデルに関する研究, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.952, pp.117-120(1995)

謝 辭

本論文は、著者が東京大学大学院学際情報学府学際情報学専攻博士課程在学中に、東京大学生産技術研究所における研究をまとめたものです。

本研究は、東京大学生産技術研究所 須田義大教授のご指導の下、行われたものです。温かいご指導および多大なるご助言をいただきましたことを心より感謝いたします。

東京大学大学院工学系研究科 金子成彦教授、小竹元基准教授、東京大学大学院情報学環・学際情報学府 中野公彦准教授、大石岳史准教授には、本論文をまとめるにあたり、貴重なご助言を頂きました。深く感謝申し上げます。

本研究の遂行に当たりまして、大変多くの方々にお世話になりました。

三菱プレジジョン株式会社の大貫正明様、株式会社ジェイテクトの皆様には、ドライビングシミュレータに関わる技術サポートをしていただきました。深く感謝いたします。

脳の学校株式会社の岡徳之様には、脳計測実験実施にあたり、脳科学に関する深い知見から、そのデータ取得や分析方法についてアドバイスをいただきました。深く感謝いたします。

須田研究室の皆様にも大変お世話になりました。

杉町敏之 特任助教には、研究実施にあたり全面的なご協力をいただきました。研究の方針決定における相談から、節目ごとの手厚いフォロー、DS の操作の使い方等に至るまで、研究関係のあらゆることを、いつでも快く教えてくださいました。深く感謝いたします。

李曙光様には、博士課程の先輩として、実験の進め方、論文の書き方、参考文献の調べ方等の基礎的な事柄から、DS でのシナリオ作成や脳計測を行う上で必要となる知識や技術まで、非常に多くの役立つ情報を惜しみなく提供してくださいました。大変感謝いたします。

後輩の李金燦さんには、DS 実験のオペレーションからデータ分析まで、非常に多くの内容を正確にそして迅速に対応・処理していただき、本当に助かりました。感謝いたします。

日産自動車からの社会人ドクターとして、上司の方々からの温かいサポート、そして、多くの方々のご協力にも支えられました。

浅見孝雄 専務執行役員には、本博士課程への入学を、ご推薦いただいたことをはじめ、研究進捗報告でのいつもポジティブなアドバイス、そしてまとめの時には、本研究の社会的貢献についても評価してくださいました。おかげさまで常にモチベーションを高く持って、研究に取り組むことができました。本当に深く感謝いたします。

長岡宏 常務執行役員には、研究成果である実車両（改善仕様）にご試乗いただき、その出来栄えを絶賛くださいました。人間をもっと調べてクルマ作りをすることの重要性について共感いただくとともに、今後、更に適用範囲を広げて実施していくようご指示をいただきました。おかげさまで、自分たちが取り組んできたことに、自信を持つことができました。

先行車両性能開発部 高橋信彦 部長には、直属の上司として、業務と学生の両立をいつもご配慮くださいました。3年という長期間の間、私が研究に専念できる環境を確保してくださいましたことに対して、本当に深く感謝いたします。

実験技術部 味村寛 部長には、操安分野の長として、技術面そして実験評価の面で、多大なるサポートをいただきました。いつも進捗を気にかけてくださったおかげで、何とかここまでやりきることができました。いつも感謝しております。

同じく実験技術部 濱田貴司 課長、評価ドライバの小西健司さん、水口満雄さん、土屋春義さんには、DS実験での再現性向上の貴重なアドバイス、改善仕様の実験評価等、評価面でご支援いただきました。本当に深く感謝いたします。

モビリティサービス研究所 ギョルゲルチアンシニアリサーチャー、佐久間壮リーダー、清水俊行さん、紙透義治さんには、脳計測を伴う実験にご協力いただくだけでなく、データ分析や結果の導出においても多大なるご支援をいただきました。本当に深く感謝いたします。

同じ車両動性能先行開発グループの加藤大輔 課長、芝田興史さんには、車両モデルの作成から、ドライバモデル同定、実験計画、実験結果の整理に至るまで、全面的に研究へのご支援をいただきました。本当に深く感謝いたします。

最後に、この社会人ドクター生活を支えてくださったすべての皆様に心よりお礼申し上げます。特に、私生活を含めて、いつも励まし支えてくれた家族に、深く深く、感謝いたします。

田尾 光規