

Fig. 8 Driver-Vehicle Closed Loop Model



Fig. 1.1 ステップ状の目標横変位イメージ

名古屋大学・日本大学・神奈川工科大学 合同シンポジウム

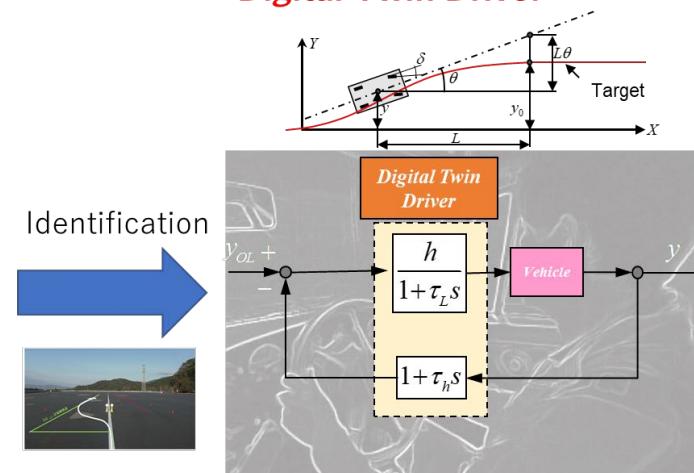
「3大学が考えるデジタルトランスフォーメーション～テスティング&シミュレーションの現状と将来～」

デジタルツインを用いた人間中心テスティング －ドライバの主観評価を定量化する－

Real Human Driver



Digital Twin Driver



2025.11.24
工学部 機械工学科
車両運動・制御研究室
山門 誠

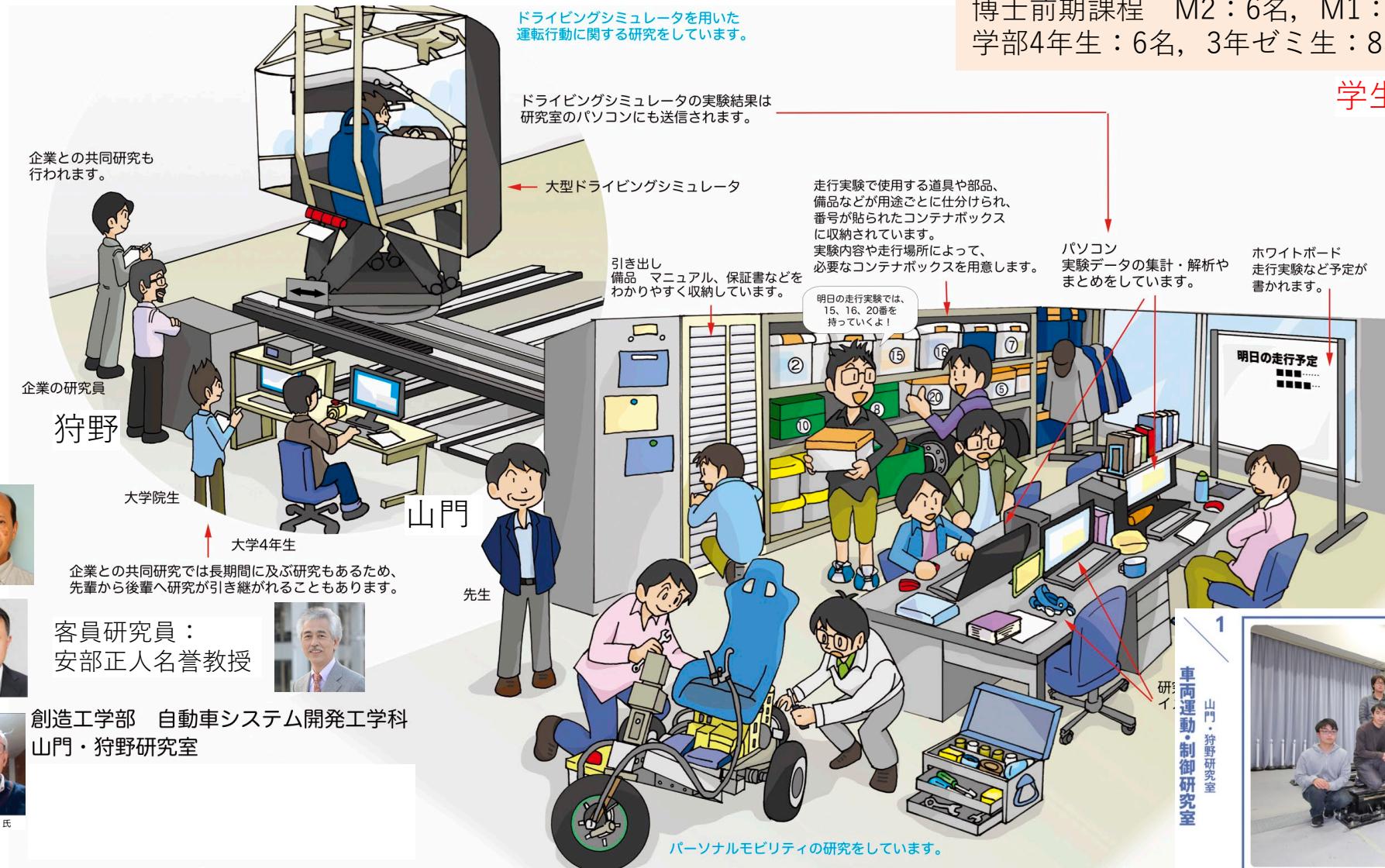


車両運動研究室の構成

インテリジェント化による次世代「人馬一体感」の創造

主な研究分野

■自動車のインテリジェント化 ■運動制御 ■ドライバー行動



車両運動・制御研究室で目指している方向性

人馬一体=車両単体とドライバサポートの作り込みで実現

もっといいクルマ創り



QOD
(Quality Of Drive)
次世代人馬一体感

完全支援
Driver状態
適応運転支援
障害物強制回避
危険強制回避
サポート
Pre-Crash
Braking
ドライバサポート

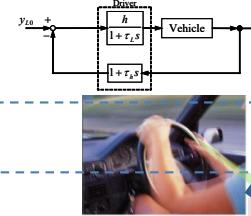
基本が
しっかりしている車

研究室として
注力する方向性

キーワード : Vehicle Dynamics, Human Inspired, Kansei



Evaluation



レベル4 Still be a driver!



半自動運転



Be a driver

レベル1



ロボット化のライン

Human
Inspired



現状の車両

ロボット化の
ライン

Robotized vehicle

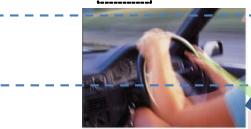
実用化されている安
全運転支援システム

加速・操舵・制動複数を同
時に自動車がおこなう状態

「加速・操舵・制動全てを
自動車が実施、緊急時のみ
ドライバが対応する状態」

「加速・操舵・制動全てをド
ライバー以外が実施、ドライ
バーが全く関与しない状態」

レベル2



レベル3



サポートの
質を上げて
量を減らす

アントレジュー
ン化の流れ

ドライバ-クラウド間の
インターフェース
(ドライビングシミュレータ)

Cloud should be a
expert driver!



クラウド大規模演算
Deep Learning

おもてなし
コンテンツ

ロボット
テクノロジー

センサ・アクチュ
エータの積み上げ

「加速・操舵・制動全てを
ドライバー以外が実施、ドライ
バーが全く関与しない状態」

レベル2

自動駐車

レベル3

レベル4

全自動(自律)

安全性・効率

別な乗り物！

Human Inspired
Controlの注入

Robot car

1. 技術の概要 τ_L とは
2. オープンイノベーション（共同研究＆自主研究）
3. 運動性能差の評価
4. 運転環境要因変化の評価
5. おわりに

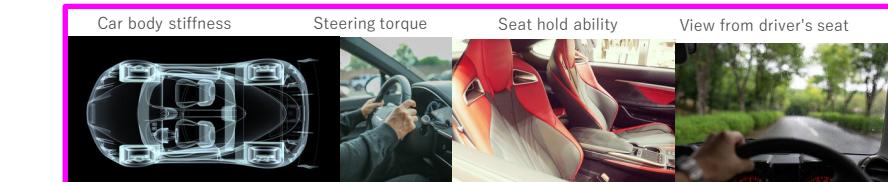
車両操舵特性評価手法（ τ_L 評価）の概要

デジタルツインドライバを用いた、もっといいクルマづくり

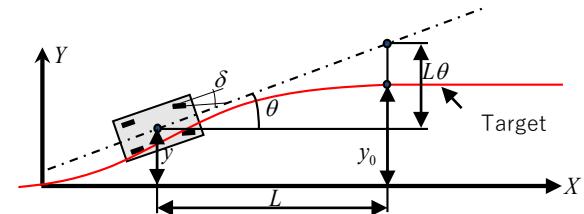
実際のドライバー

環境要因

体調

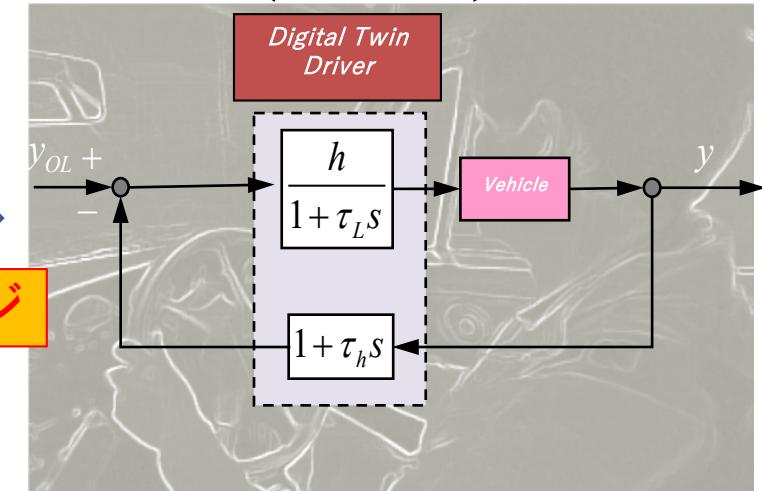


デジタルツインドライバー



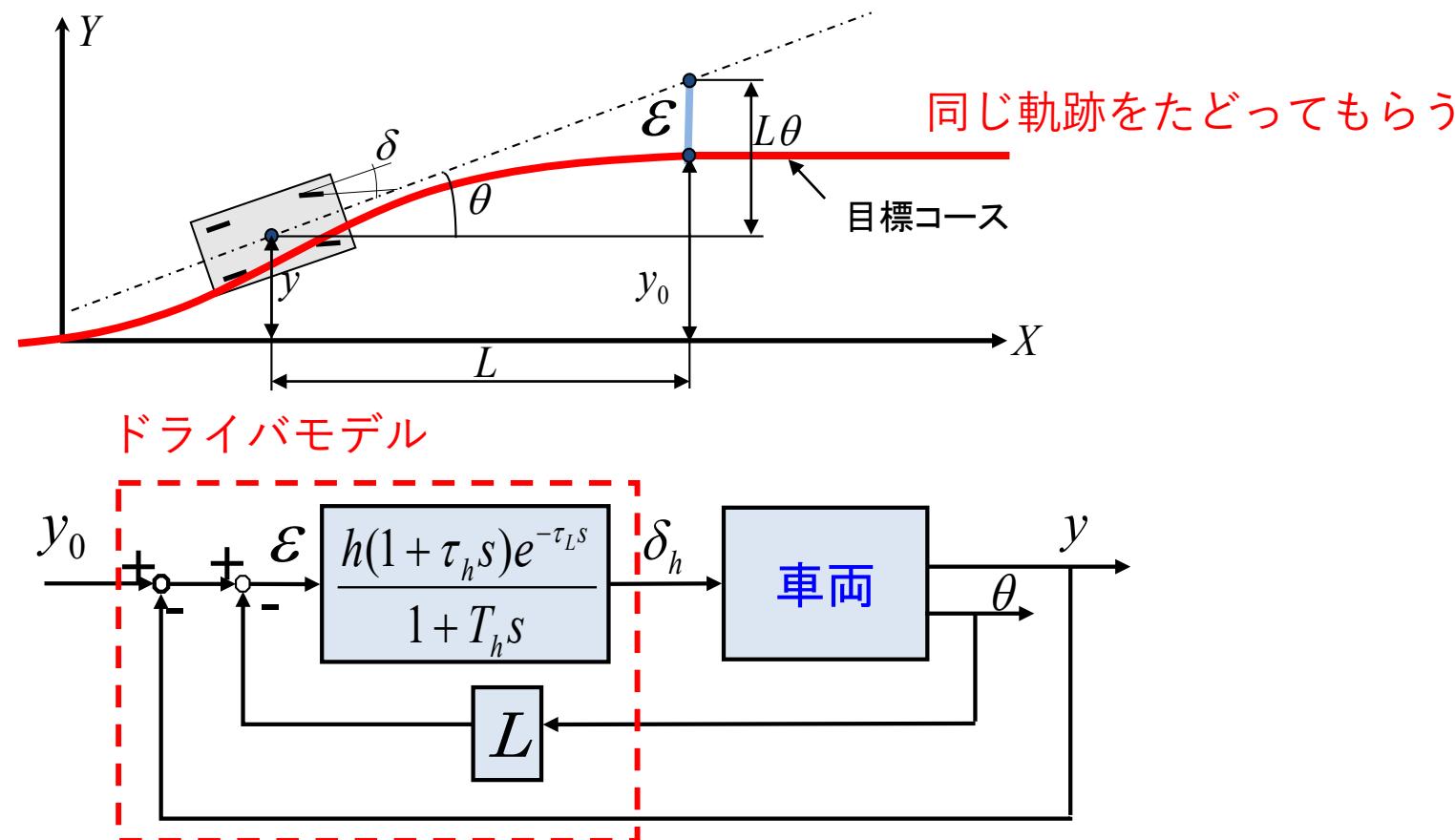
Identification

レーンチェンジ



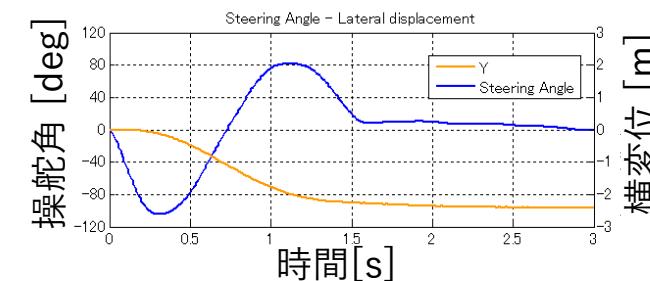
τ_L 評価とは、ドライバに言葉や点数で評価をしてもらうのではなく、実運転操作をデジタルツインドライバとして数式化・同定し、その構成パラメータにて車両の操舵特性を評価すること

レーンチェンジ時のドライバのモデル化・数式化

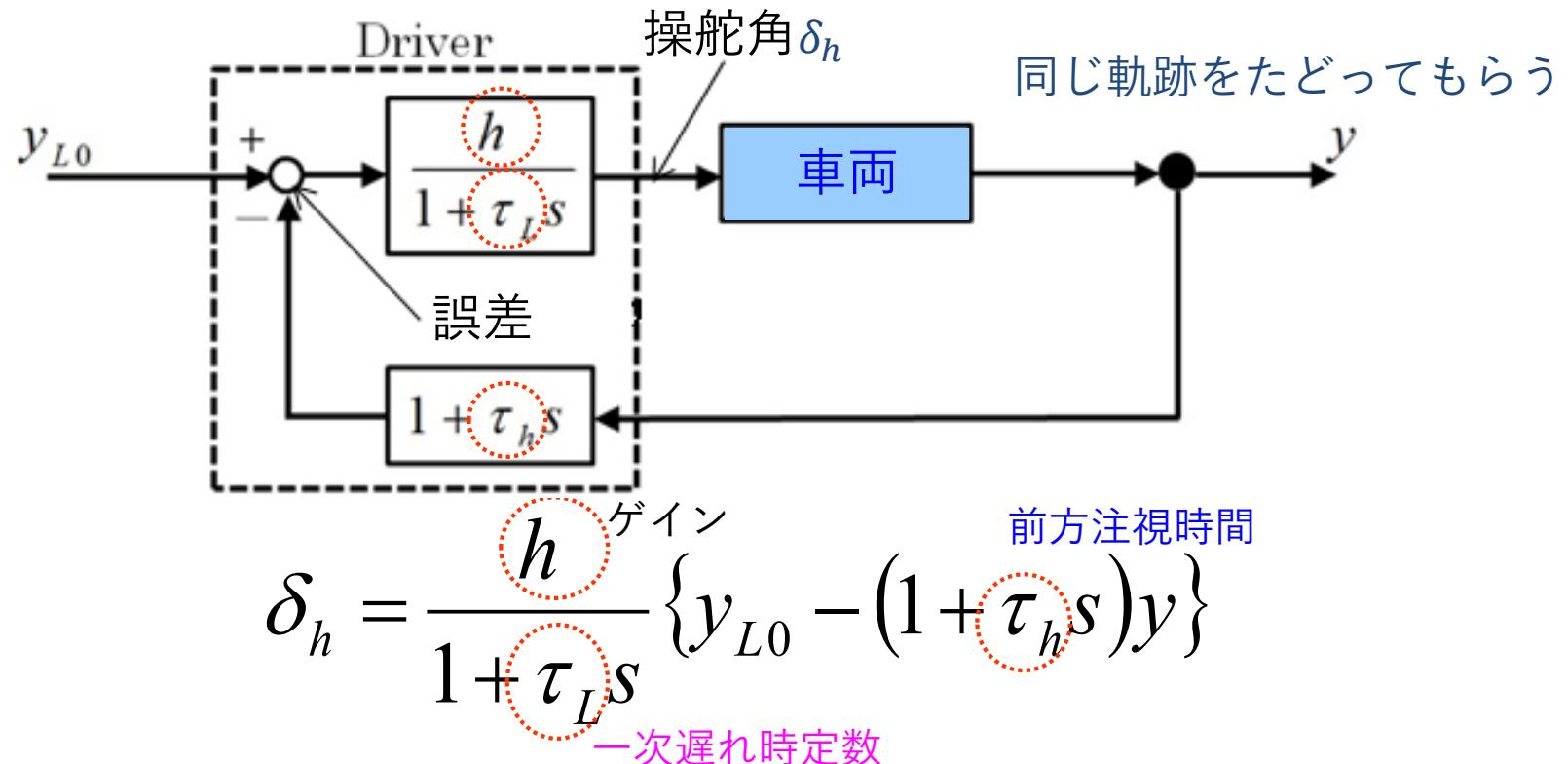


※レーンチェンジを評価対象とする理由

レーンチェンジには、切り込み（操縦性）と切り戻し（安定性）動作が含まれており、両方のバランス（操舵性）を一つの値（ τ_L ）で評価できるため。



単純化したレーンチェンジ時のモデル



ドライバは3つのパラメータで表現可能

※車両が変われば…

同じ軌跡をたどるためにには、ドライバが操舵角を調整する必要がある
例) 応答が悪い車両は素早い操舵操作が必要となり、
ドライバパラメータが変化する。このパラメータ変化を分析する。

パラメータ同定方法とパラメータの持つ意味

【ステアリングパラメータ同定】

CAN信号 ⇒ 操舵角 δ_h
DGPS ⇒ 横変位 y
(目標横変位 y_{OL}
レーンチェンジ幅)



操舵パラメータ
 τ_L, h, τ_h

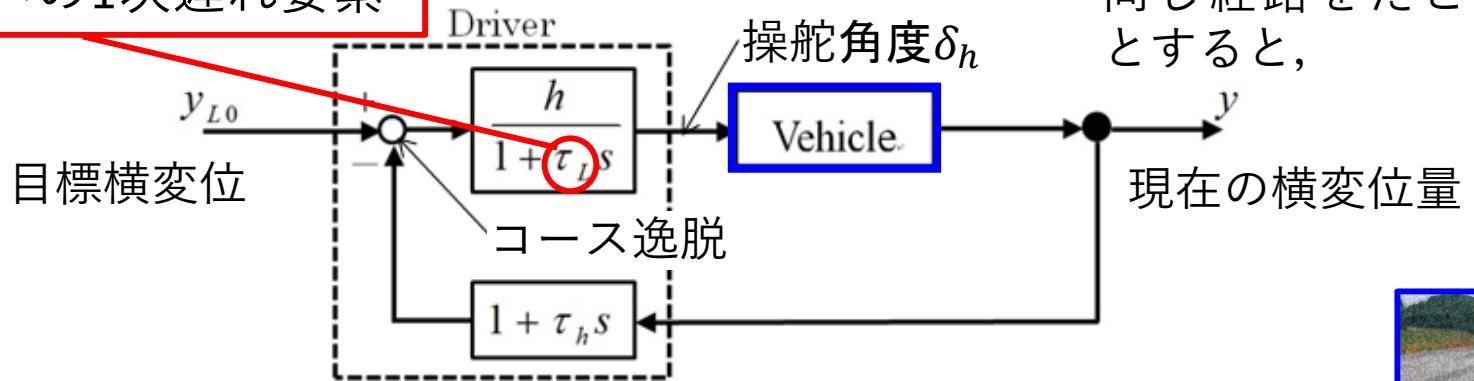
操舵パラメータの持つ意味

- | | |
|--------------|-----------------------|
| τ_L [s] | どれくらい余裕を持ってステアリングを切るか |
| h [rad/m] | どれくらいの割合でステアリングを切るか |
| τ_h [s] | どれくらい先を見ているか |

想定される状況に対して、適切な実験条件(速度、LC区間など)を設定し、その条件下で得られたデータ（操舵角・横変位）を用いて計算を行うことで初めて意味を持つパラメータとして扱うことができる

ドライバパラメータ τ_L のもつ意味

ドライバの1次遅れ要素



同じ経路をたどると、

現在の横変位量

ドライバは運転を車両に応じて変容させる



τ_L : レーンチェンジ指示から操作終了までの全応答遅れ時間

τ_L が大きい場合は



ゆっくり、落ち着いた運転動作

余裕を持ってレーン
チェンジ動作を完結
できている

余裕ある運転操作ができる



ハンドリングへの高評価

τ_L の値が大きいとドライバの評価が良い

レーンチェンジテストのビデオデータ



GVC (G-Vectoring Control) 搭載車両の評価

— GVC (制御) あり

— 制御なし

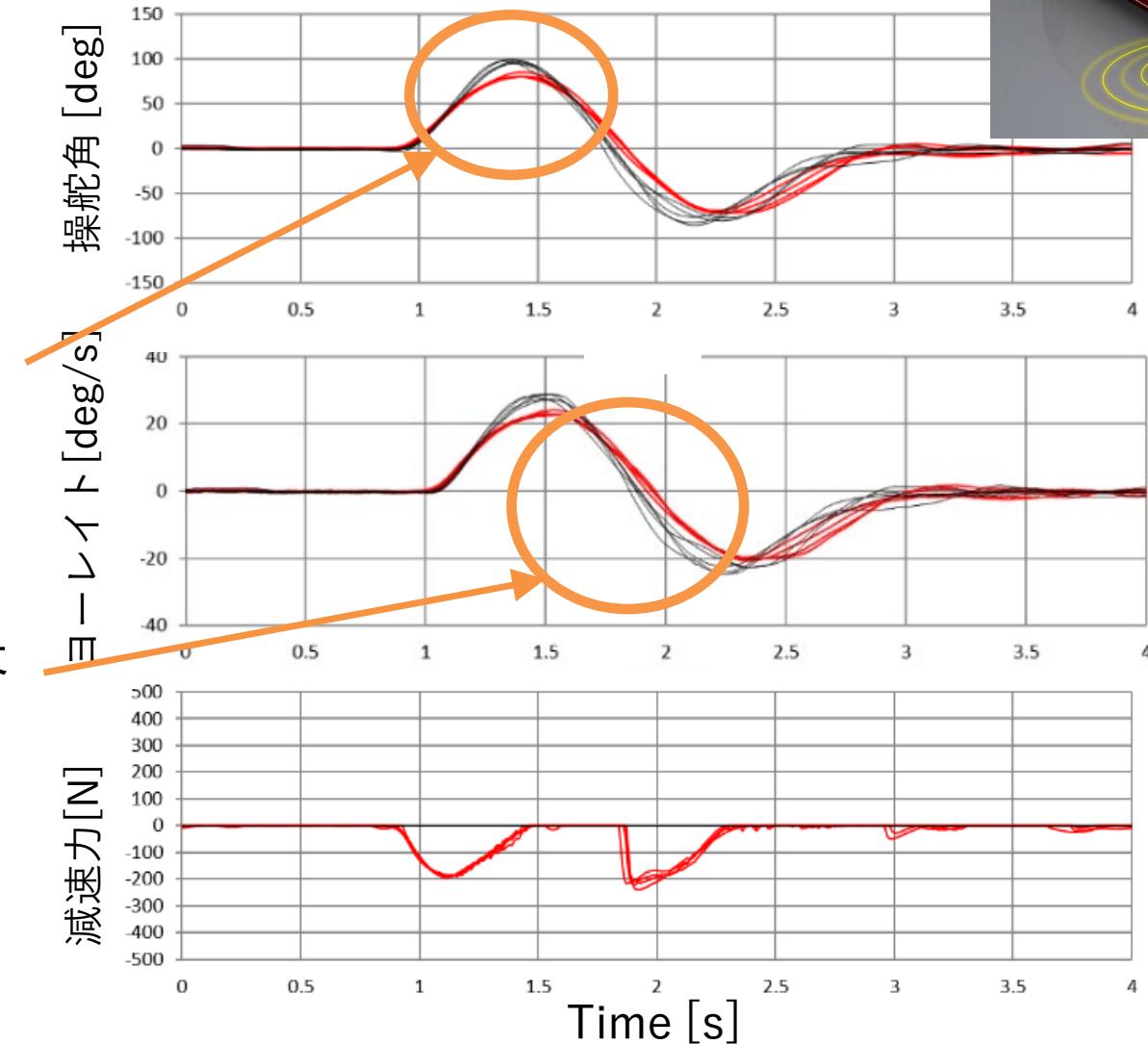
舵角が低減されている



スムーズなヨー応答

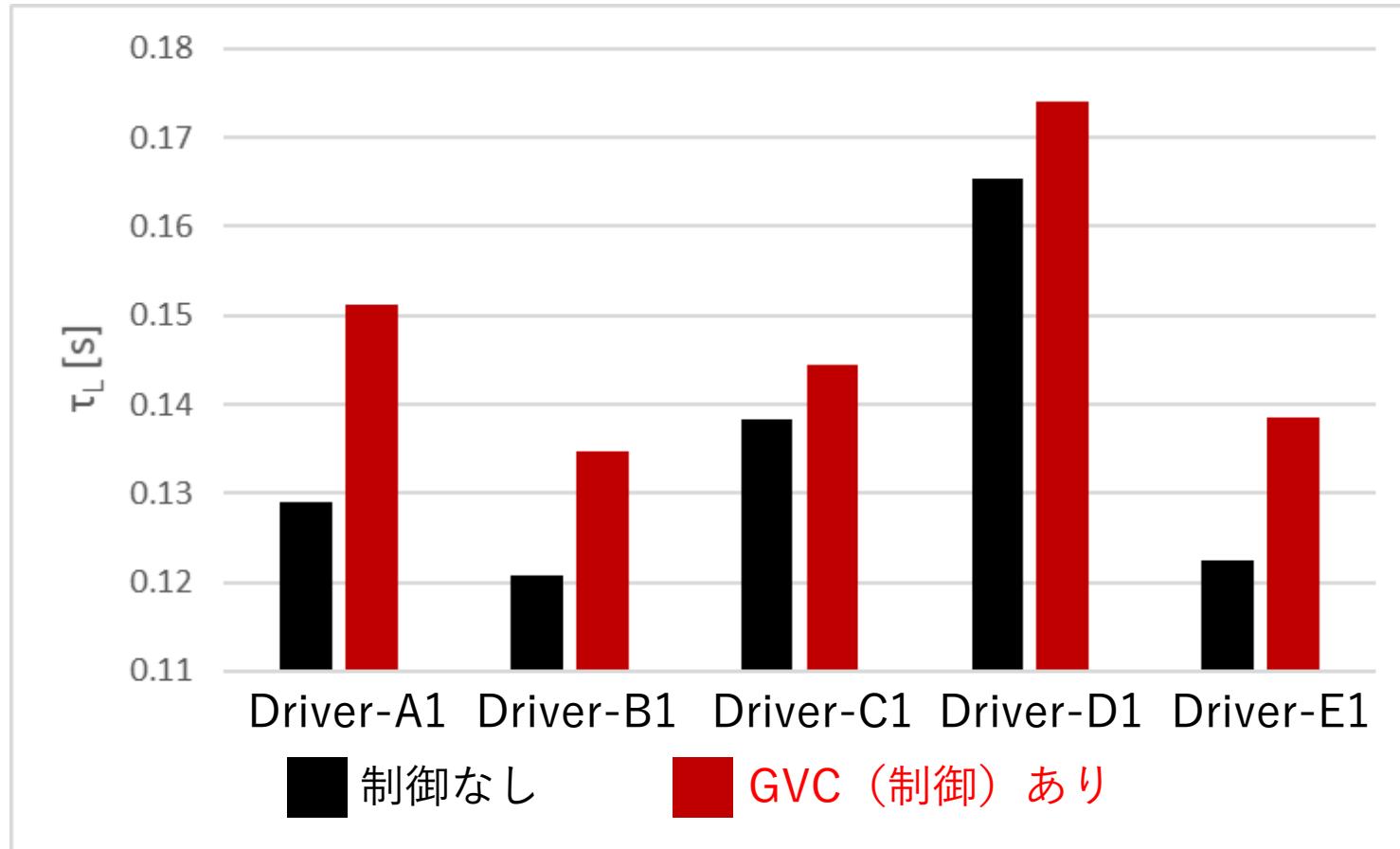


典型的なGVC効果が表れている



τ_L によるGVC搭載車両の評価

τ_L の値が大きいとドライバの評価が良い



全てのドライバにおいて、GVCありのほうが τ_L が大きくなっている。

市販車両での実験（ポルシェ 996GT3クラブスポーツ）



車外映像



車内映像

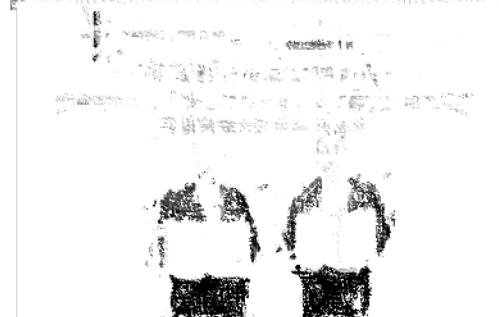
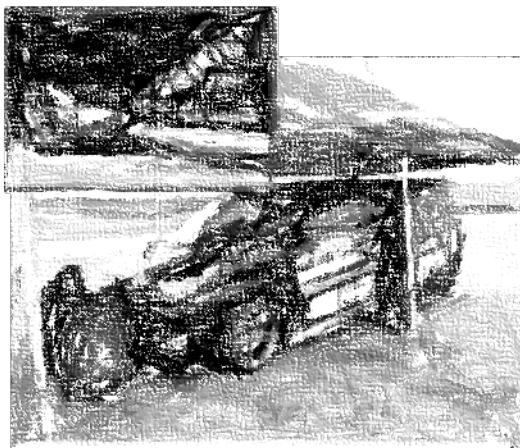
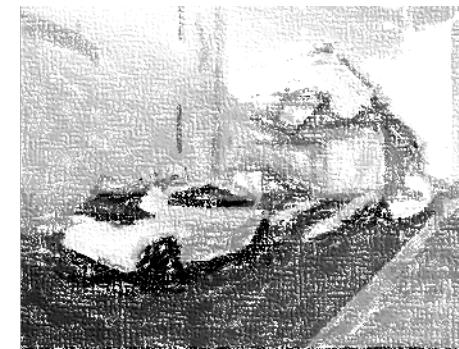
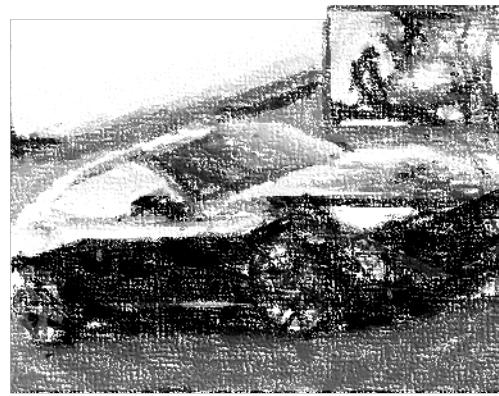
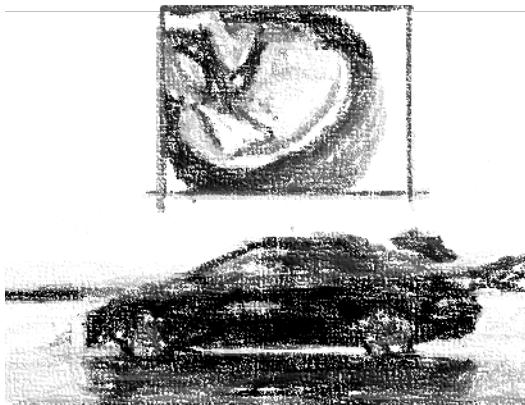


DSのバーチャル映像



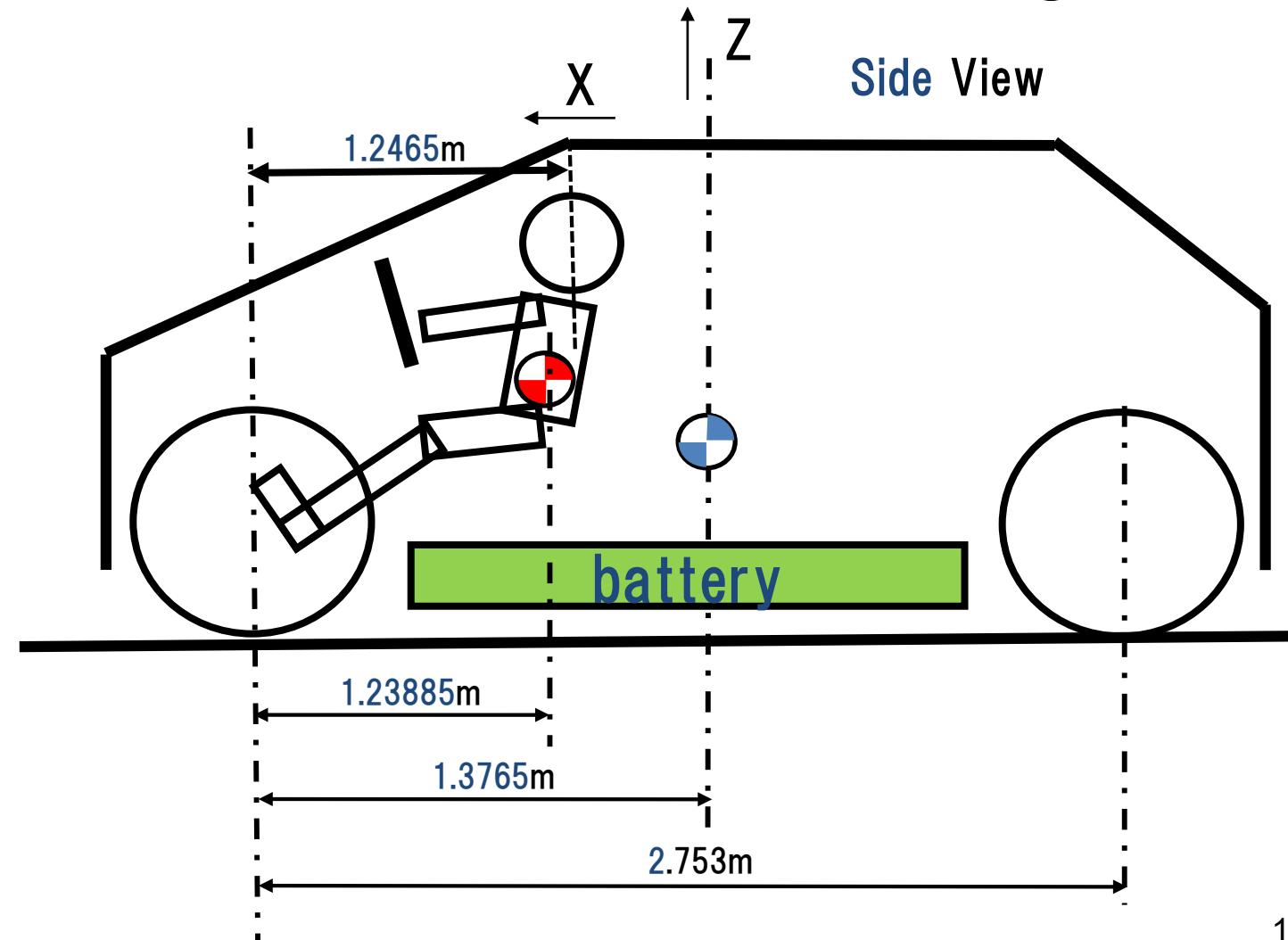
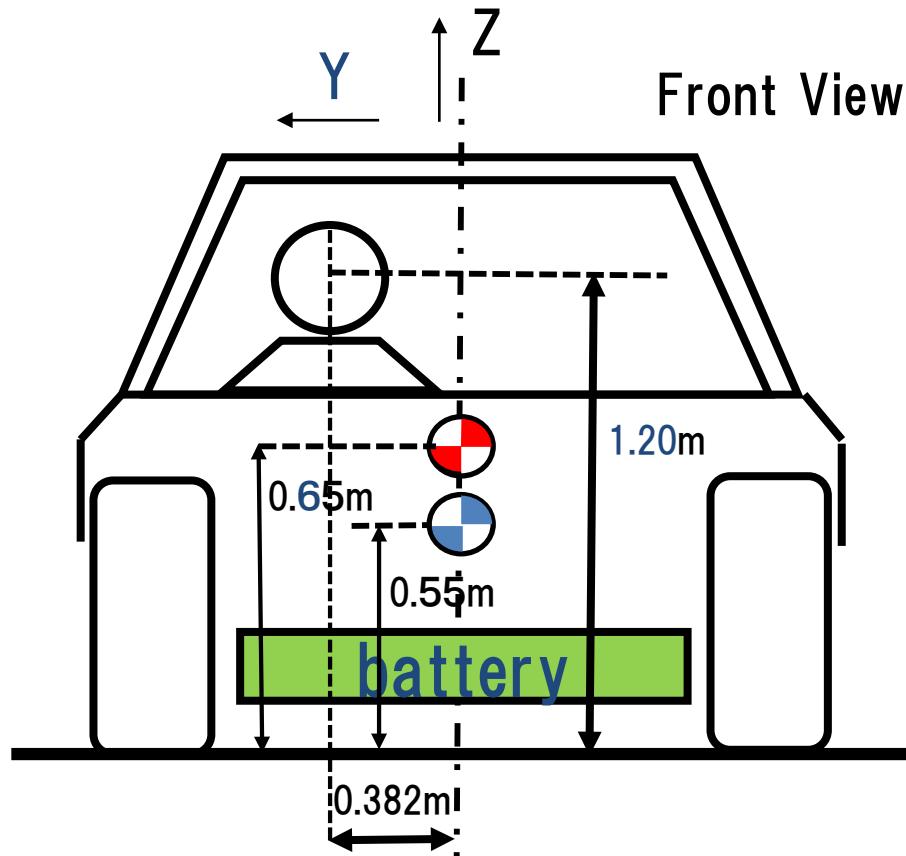
オープンイノベーション（共同研究 & 自主研究）

2022～23年度のτL計測の実績（共同研究案件）

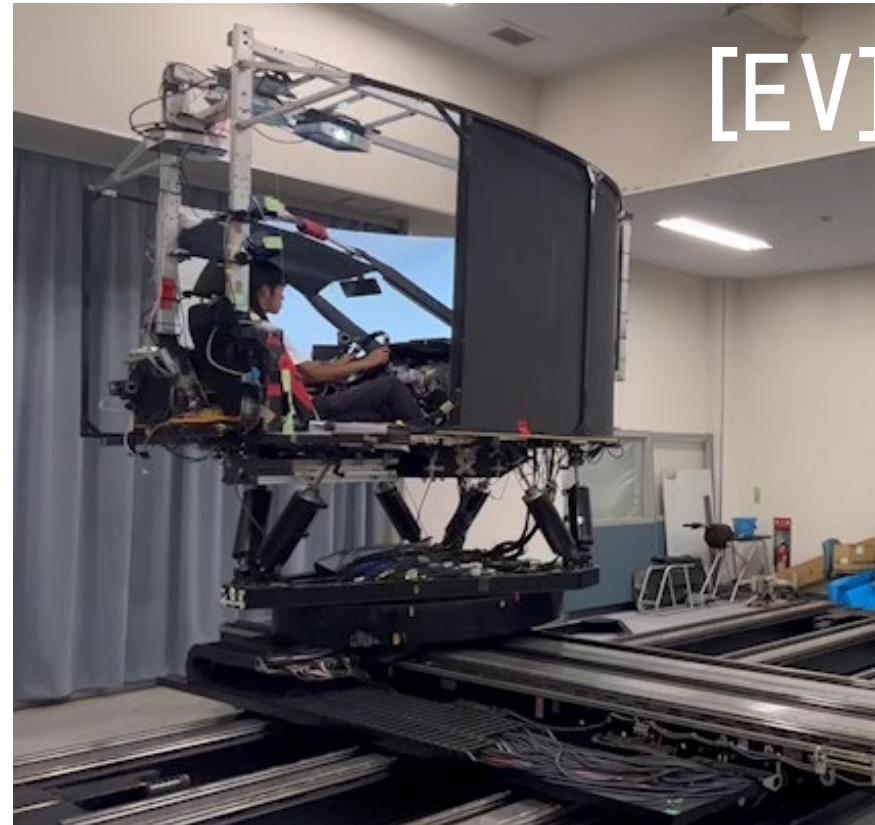
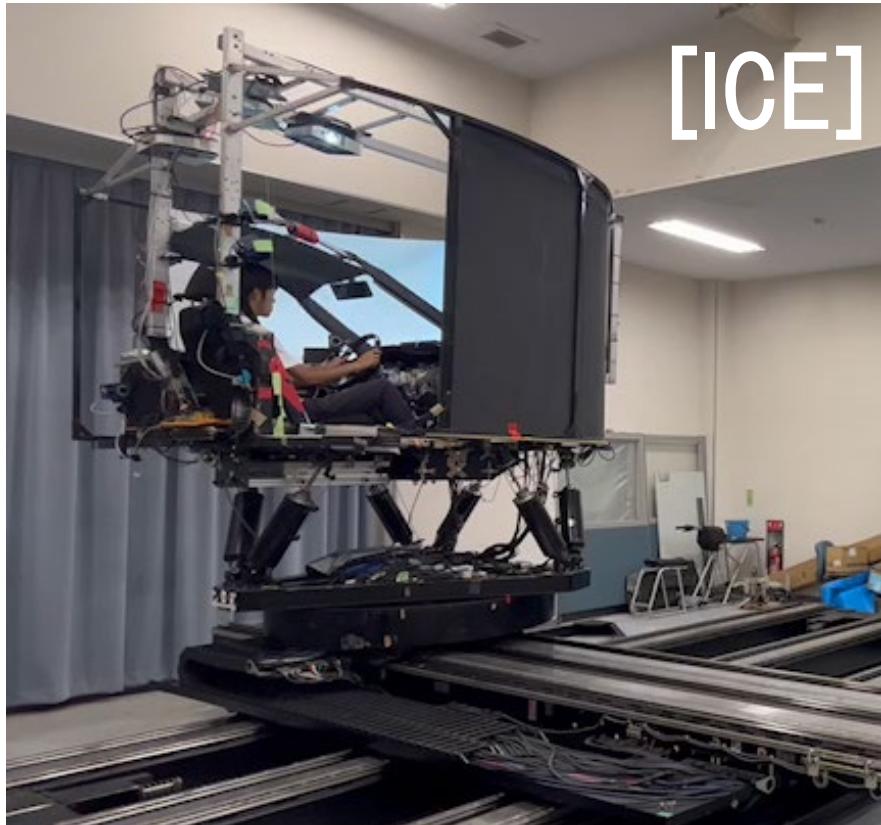


【EV時代に向けた自主研究】車両重心とドライバポジション

○ ... ICE
○ ... EV

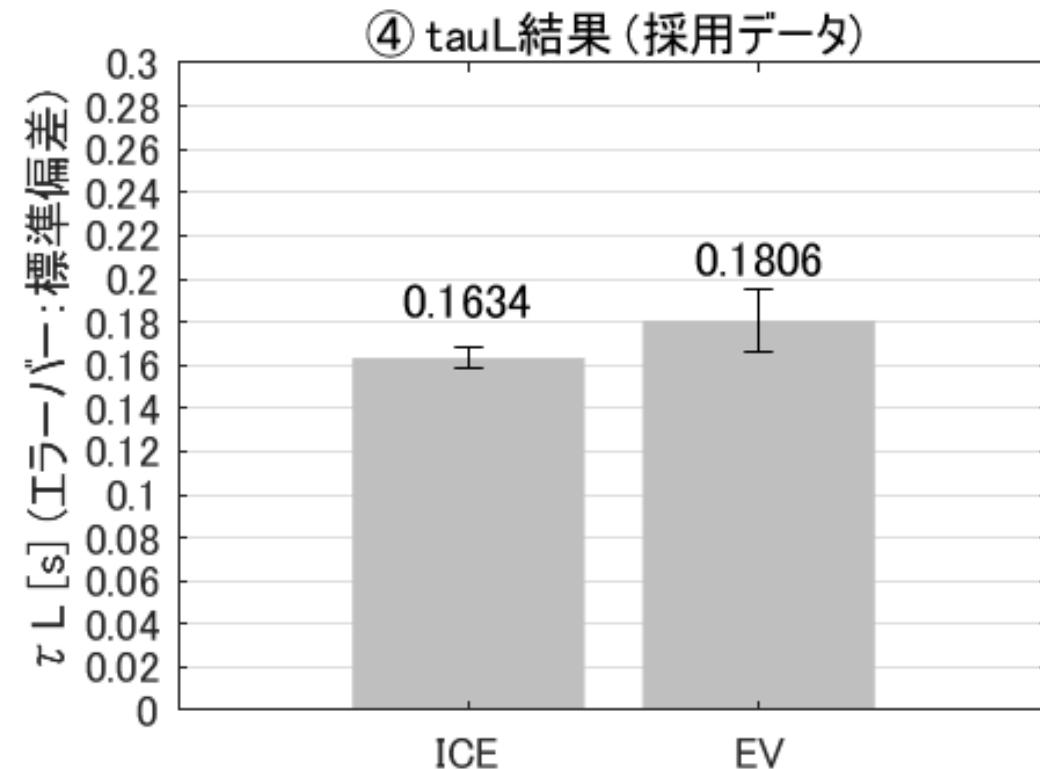
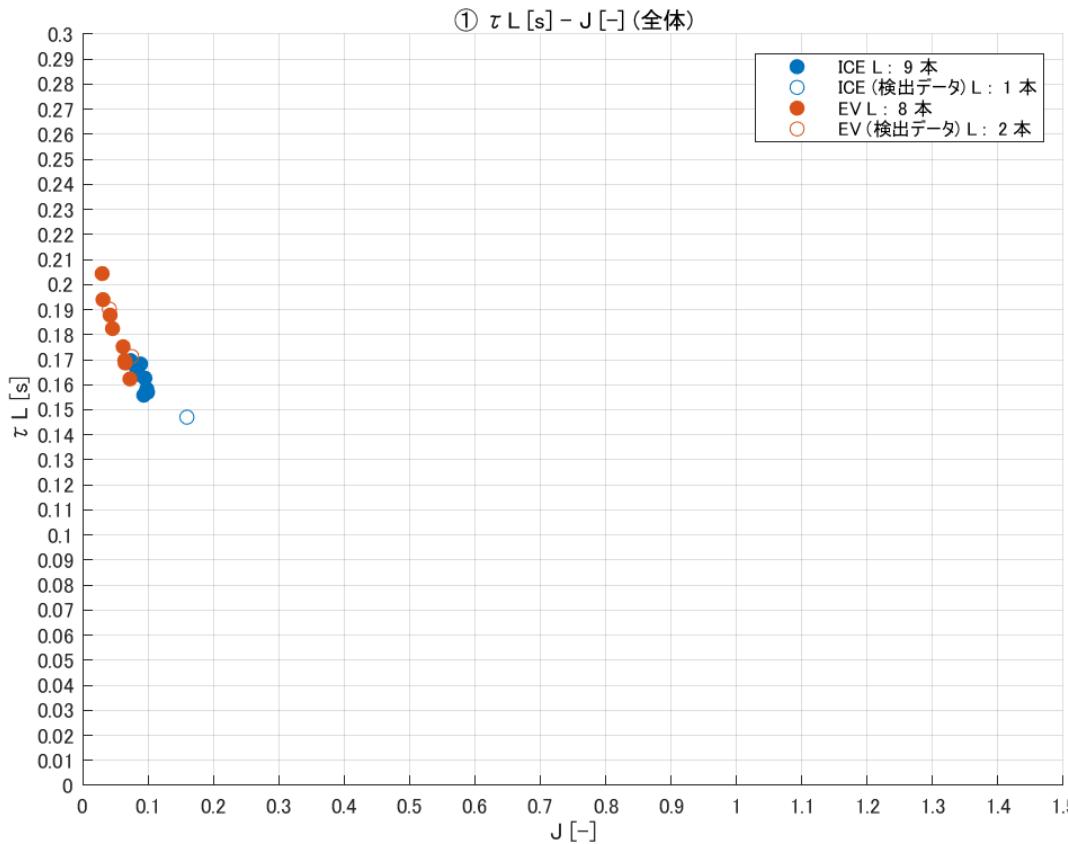


A Comparative Video of ICE and EV Reproduced in DS



It's a subtle difference, but the driver can feel it!

ICEとEV比較_TL_車速70[km/h]_LC区間35[m]



運動性能差の評価

- ・アシンメトリックLSD（ロードスター）
- ・ブレーキ・G-Vectoring制御

24YKN01

左右輪差動制限装置の機械特性が操舵特性評価に及ぼす影響

Effect of Mechanical Properties of Left and Right Wheel Limited Slip Differentials on Evaluation of Steering Characteristics



山本航輝ほか:LSD差動制限トルクによるヨー復元モーメントを活用した旋回挙動の安定化自動車技術会大会学術講演会講演予稿集, 20245022(2024)より引用

神奈川工科大学
創造工学部 自動車システム開発工学科

山門・狩野研究室
2131004 石井 遂也

実車実験でのS-LSDとAS-LSDの比較：実験車両

MAZDA ロードスター



白:スーパーLSD
(S-LSD)

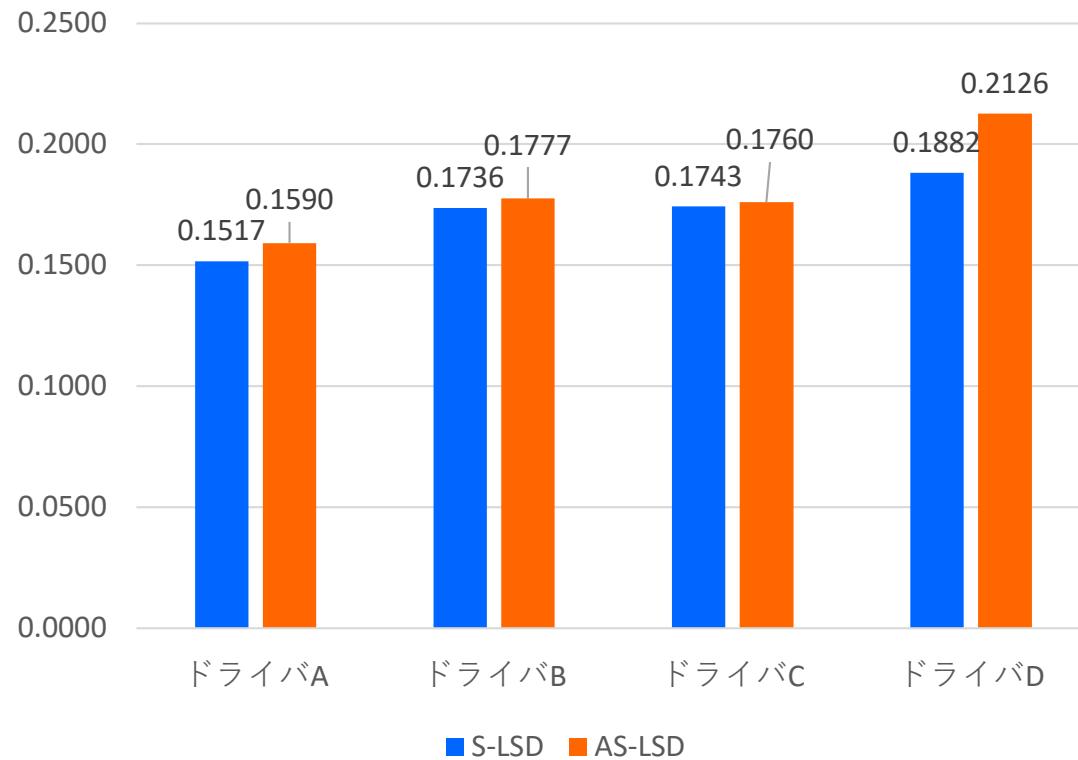
<https://car.motor-fan.jp/article/10005318?page=4>より引用

グレー:アシンメトリックLSD
(AS-LSD)

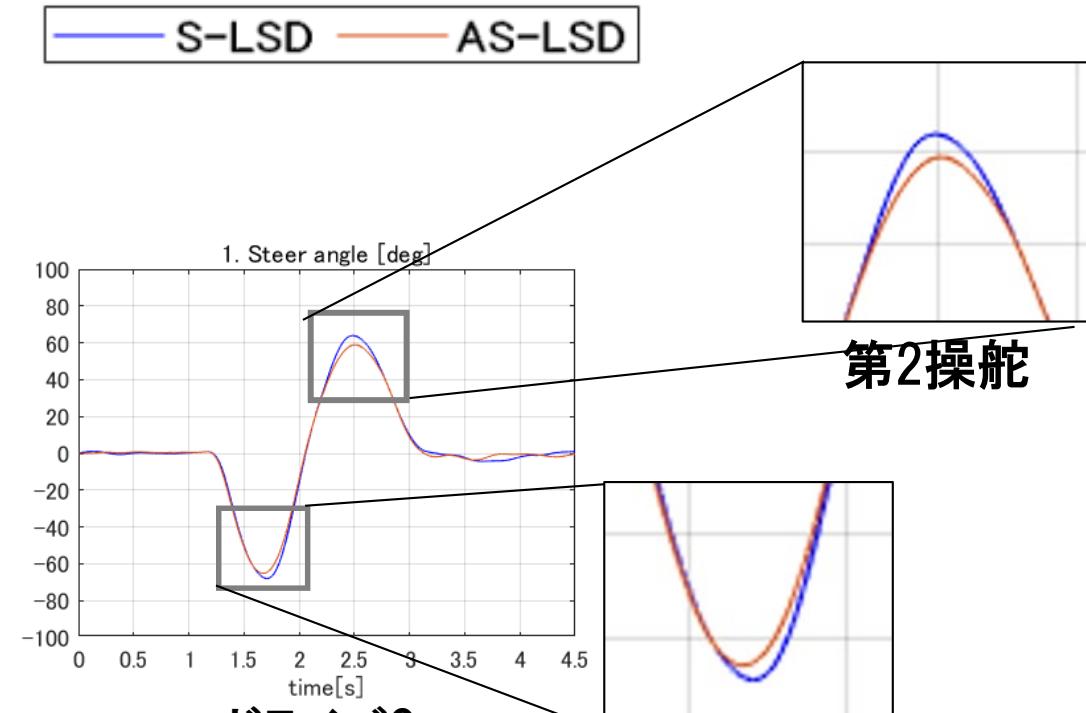


山本航輝ほか:LSD差動制限トルクによるヨー復元モーメントを活用した旋回挙動の安定化自動車技術会大会学術講演会講演予稿集, 20245022(2024)より引用

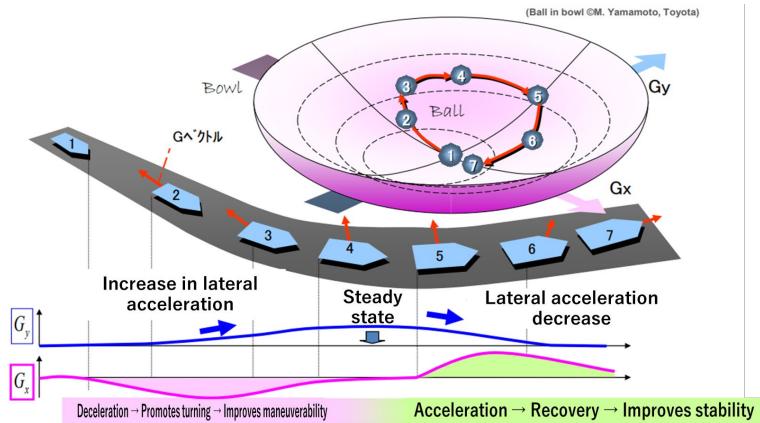
実車実験でのS-LSDとAS-LSDの比較：実験結果



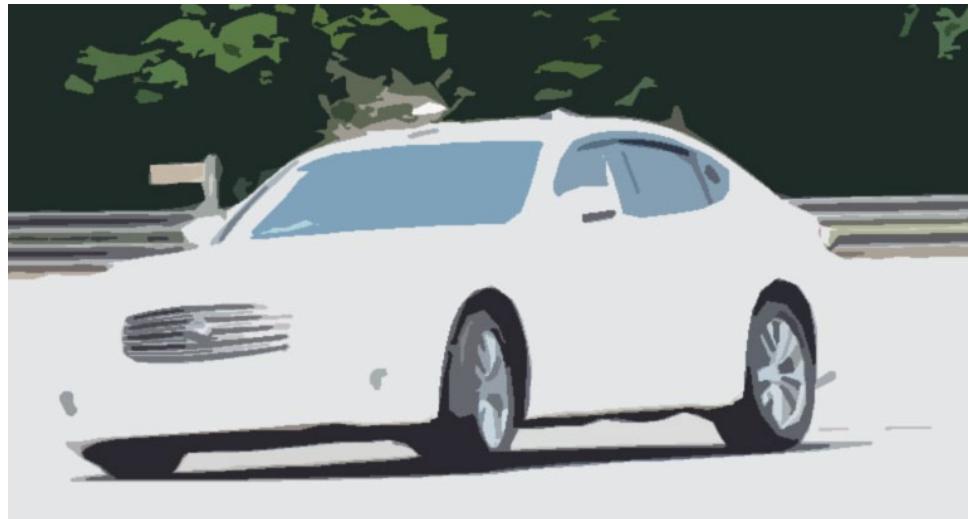
| 主観評価 | |
|-------|----------------|
| ドライバA | S-LSD < AS-LSD |
| ドライバB | S-LSD = AS-LSD |
| ドライバC | S-LSD > AS-LSD |
| ドライバD | S-LSD > AS-LSD |



AS-LSDのほうが
操舵角が小さい



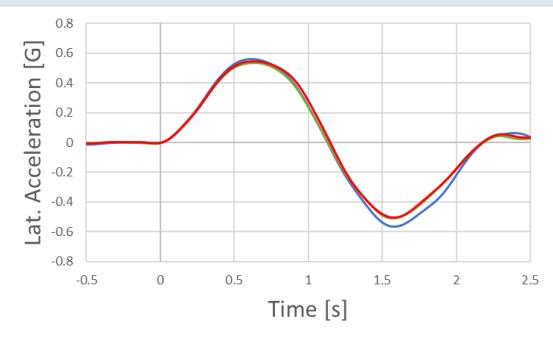
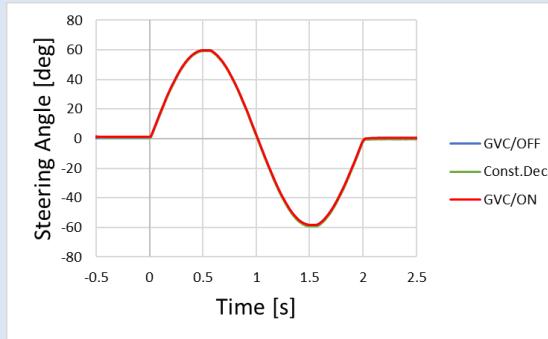
ブレーキG-Vectoring制御車両のロボット操舵試験と τ_L による操舵特性評価



神奈川工科大学
車両運動・制御研究室
源平伊吹
山本 真規 狩野 芳郎 安部 正人 山門 誠
トヨタ自動車株式会社
柴田 知寿

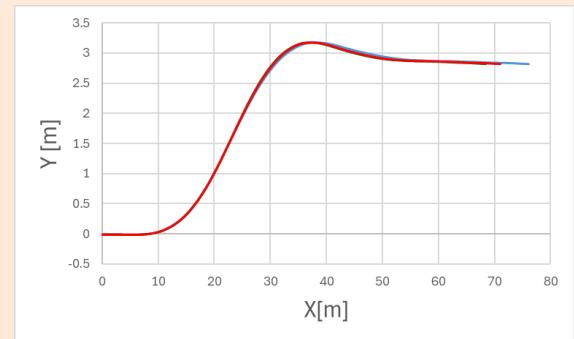
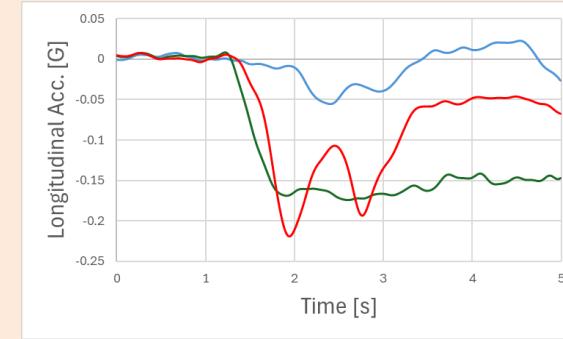
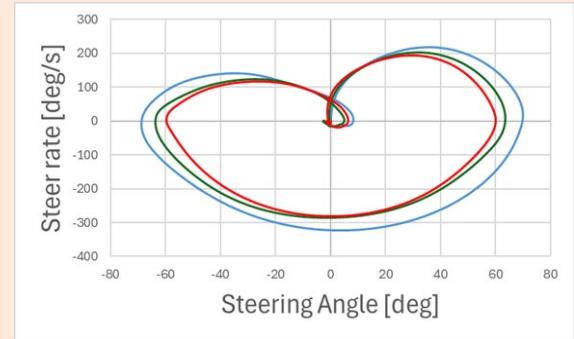
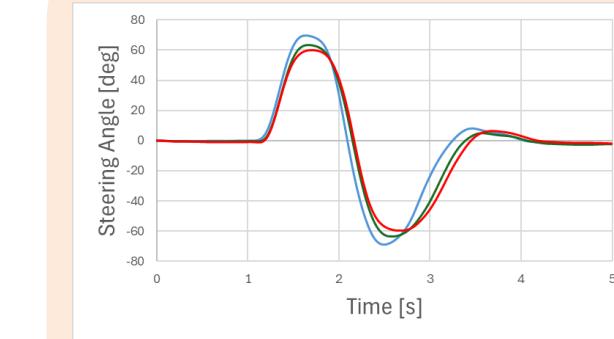
研究目的

1. ステアリングロボットによる実験



機械特性の差分の取得

2. 操舵特性評価による検討



ドライバの余裕度を定量的に評価

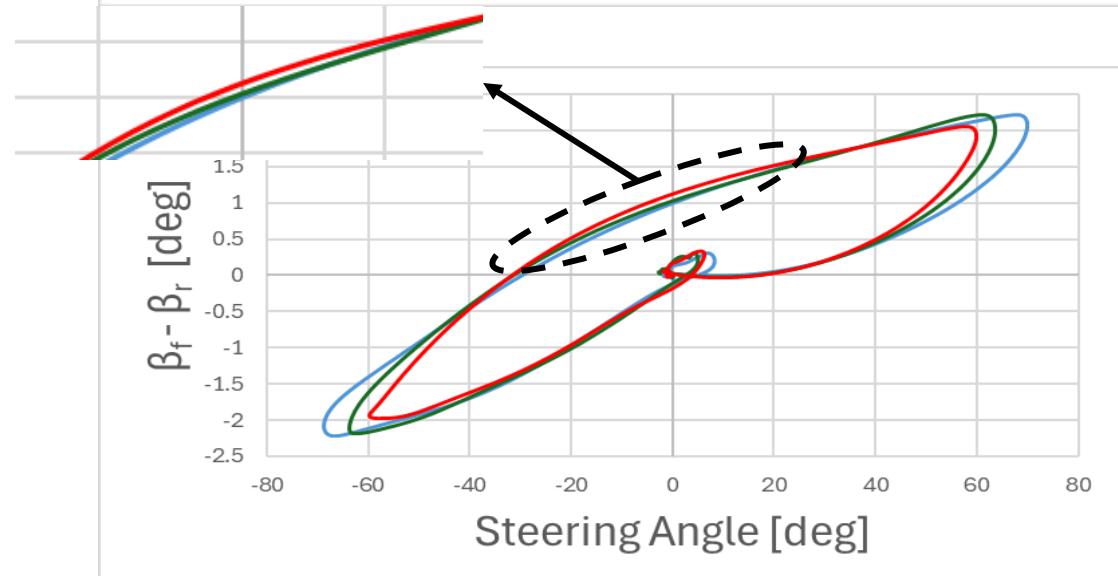
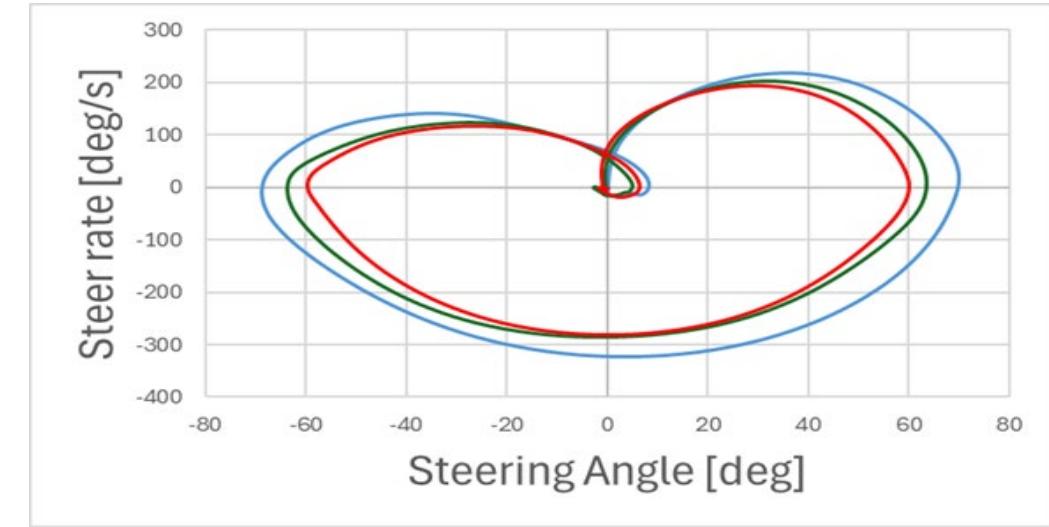
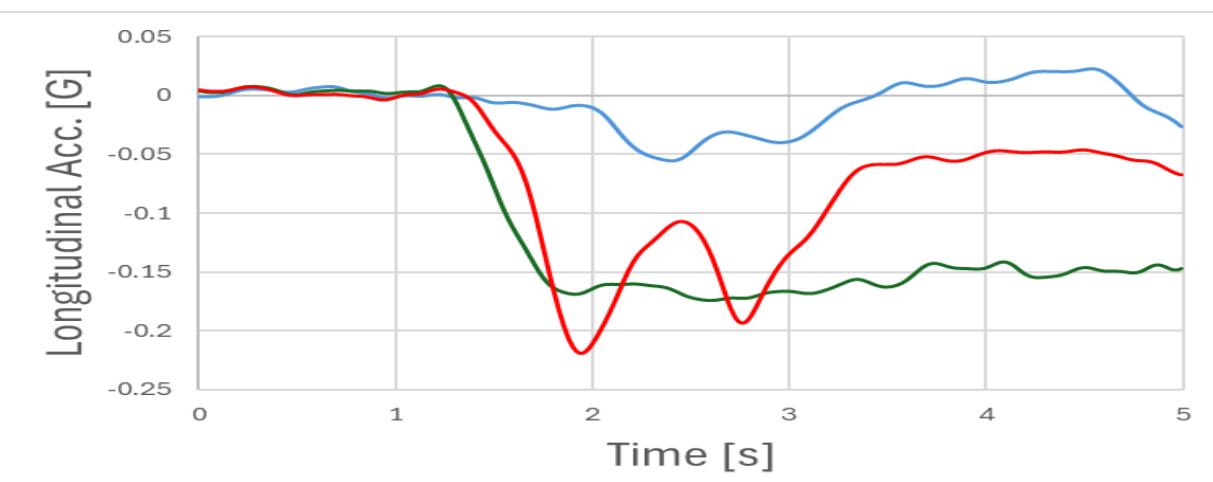
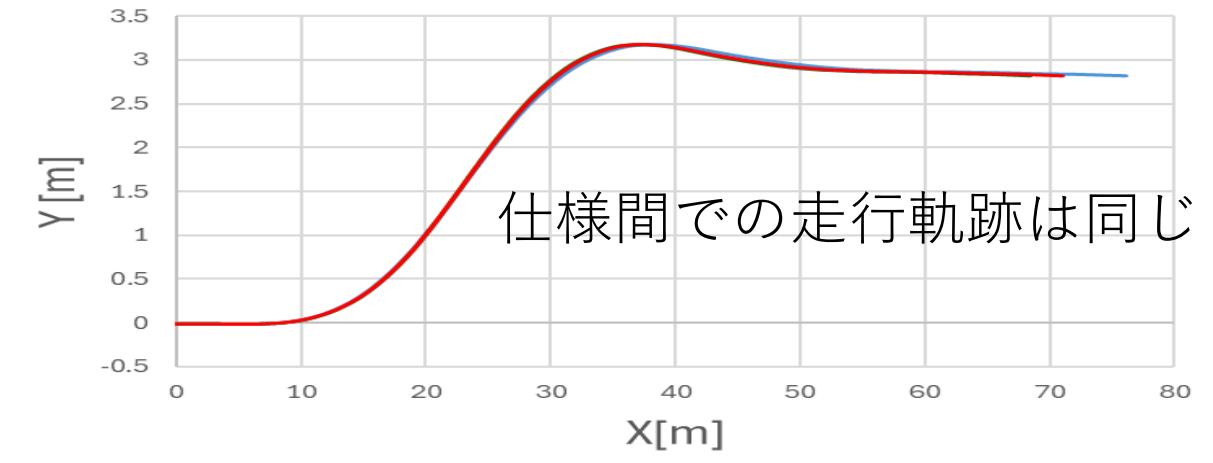
「車両の力学的特性」が「ドライバ挙動へ及ぼす影響」を可視化

「ドライバが意のままに操作しやすい」車両制御の在り方を検討する

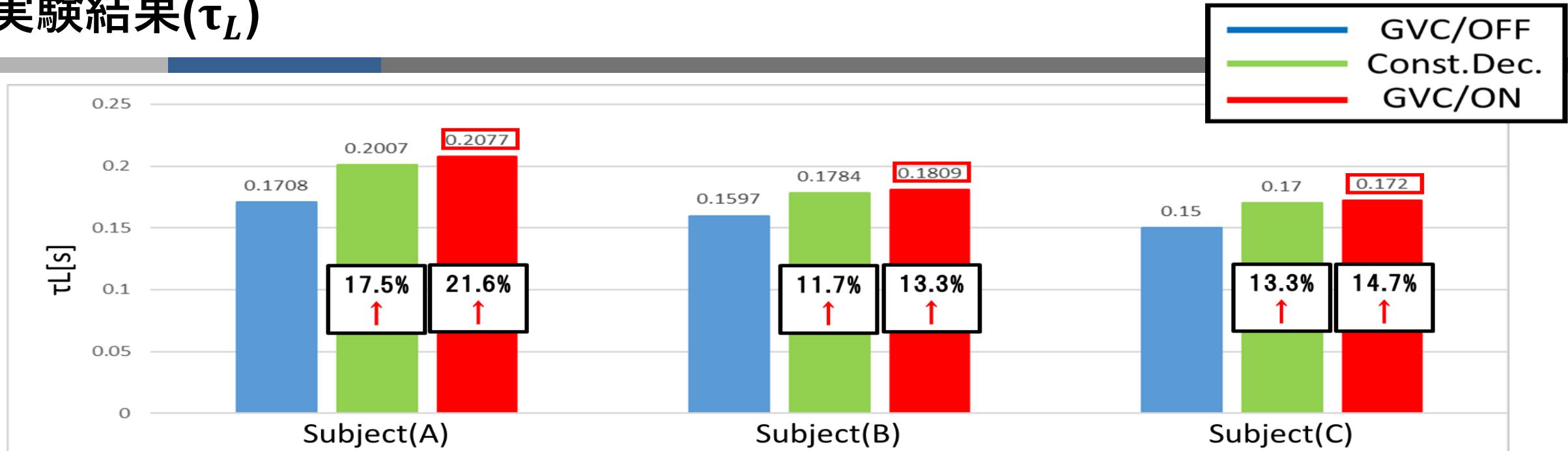
各仕様の運転データ



被験者(A)の操舵・走行軌跡の時系列データで分析を行う



実験結果(τ_L)



τ_L は被験者3名とも一定減速と比べGVCの方が大きかった

被験者コメント：一定減速よりもヨーの応答が良くなっているように感じ
安定してレーンチェンジ出来た



GVCが介入したことによる操舵に対する応答性の向上が τ_L を増大させた

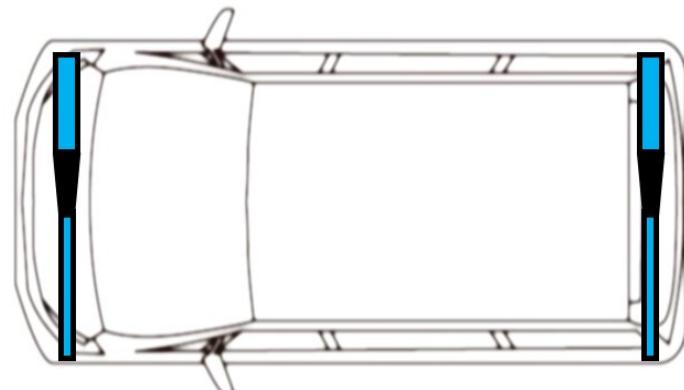
運転環境要因の評価

- ・パフォーマンスダンパー
- ・ドライバ視界

2023年 自動車技術会大会学術講演会(春季大会)

車体制振ダンパーが ドライバの操舵特性評価に及ぼす影響

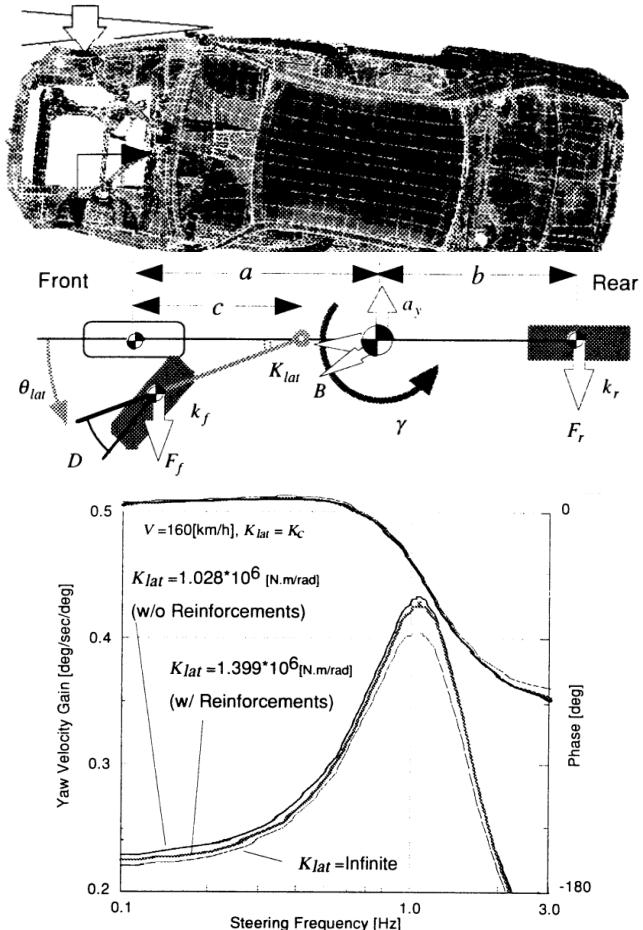
“Influence of Vehicle Body Vibration Damper on Driver’s Evaluation of Steering Characteristics”



ボディ補強により操縦感覚は向上するが、操舵応答特性には明確な差が出ない

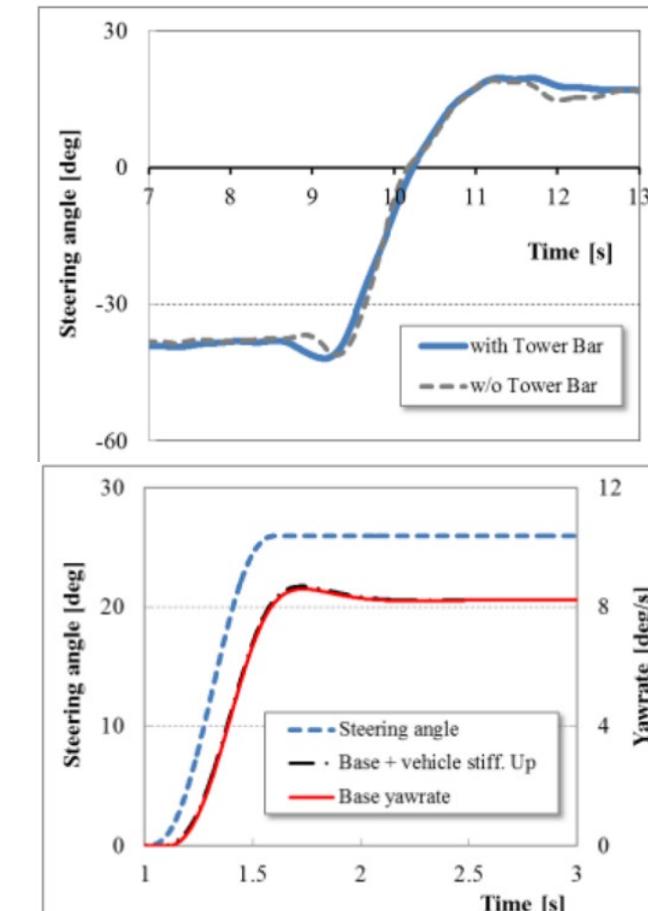
「ハンドリングへのボディ弾性の影響」

長久 真樹, 日下 騒, 皆川 正明
自動車技術会学術講演会前刷集(1999)



「修正操舵を低減する車両剛性に関する研究」

田尾 光規, 大元 一弘, 他
自動車技術会論文集(2015)



車体制振ダンパーとは

走行中の車体変形や不快なノイズ・振動を効果的に吸収する自動車用パーツ

サスペンション等に用いられている
単筒式ショックアブソーバをベースに
設計・開発

サスペンション用ダンパとの違い

・ストローク量

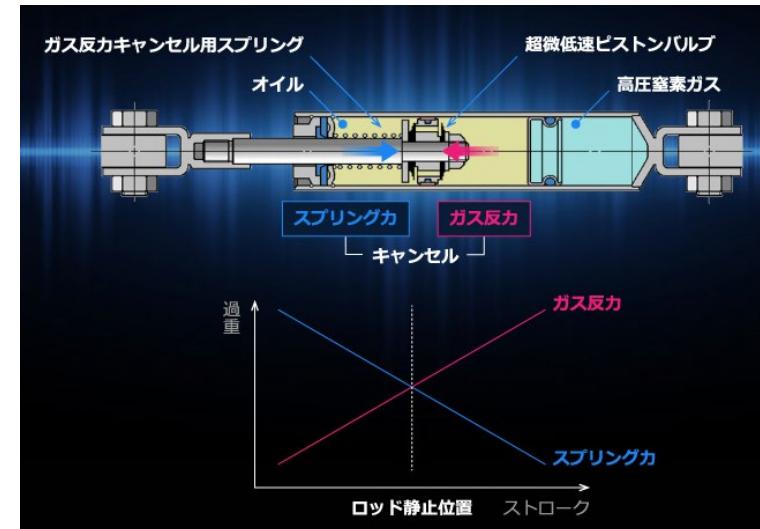
サスペンション用ダンパ：cmオーダー
車体制振ダンパー : **1mm以下**

・減衰力特性

サスペンション用ダンパ：ピストン速度に比例
車体制振ダンパー : **ほぼ一定(飽和特性)**



<https://www.yamaha-motor.co.jp/pd/about/>



<https://www.yamaha-motor.co.jp/pd/about/structure/>

車体制振ダンパー取付の様子



前後に1本ずつ
車両進行方向に対して
横向きに取付

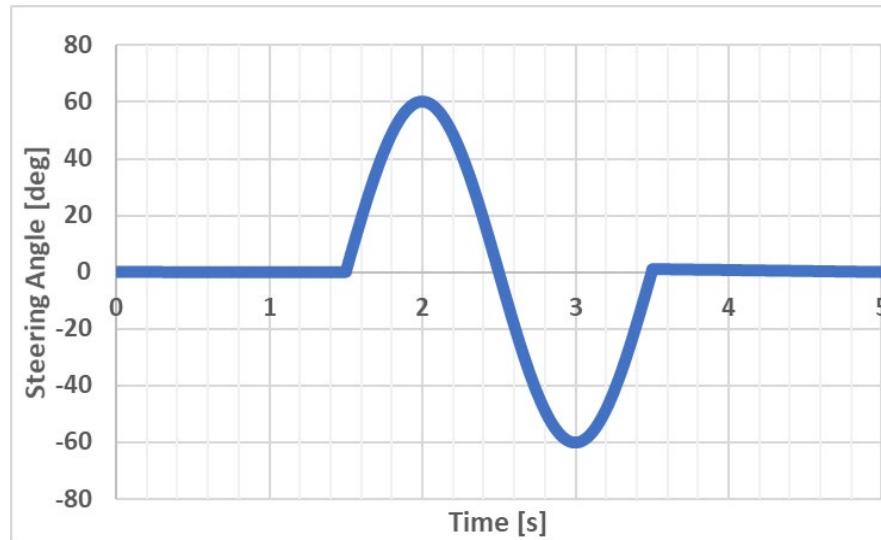
車体制振ダンパー

同日に2仕様行うため
現地で車体制振ダンパーの
取り外しを行う

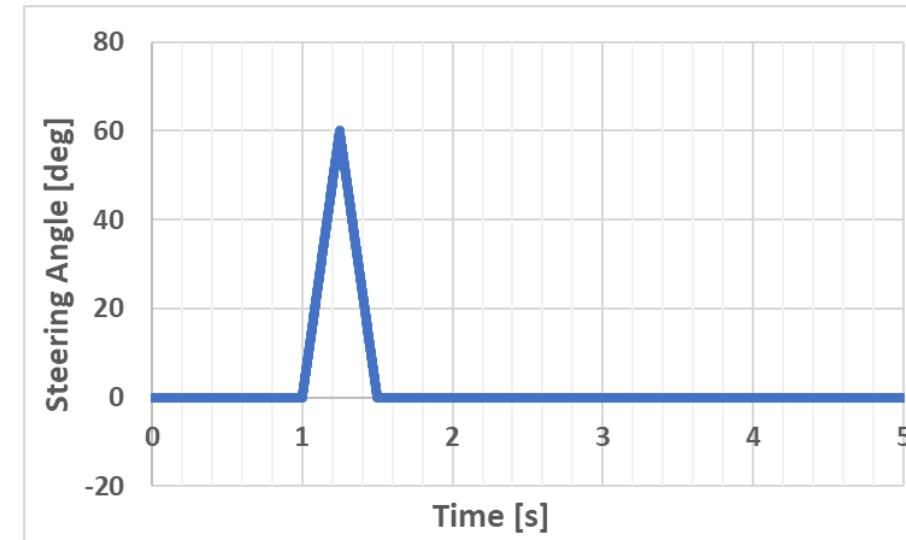


ドライバが介入しない開ループでの影響をステアリングロボットを用いて調査

- ・正弦波操舵入力試験
(周波数0.5[Hz], 振幅60[deg])



- ・周波数応答試験
(パルス幅0.5[s], 振幅60[deg])

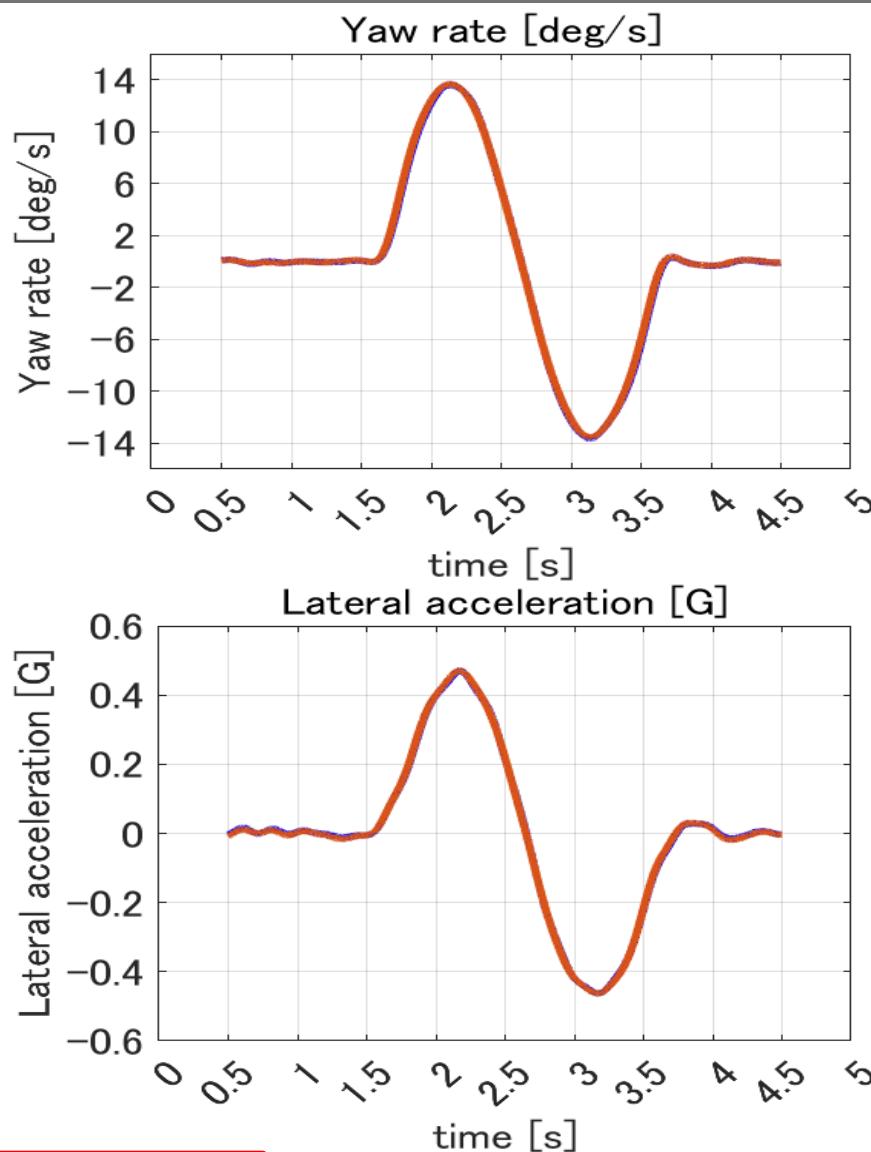
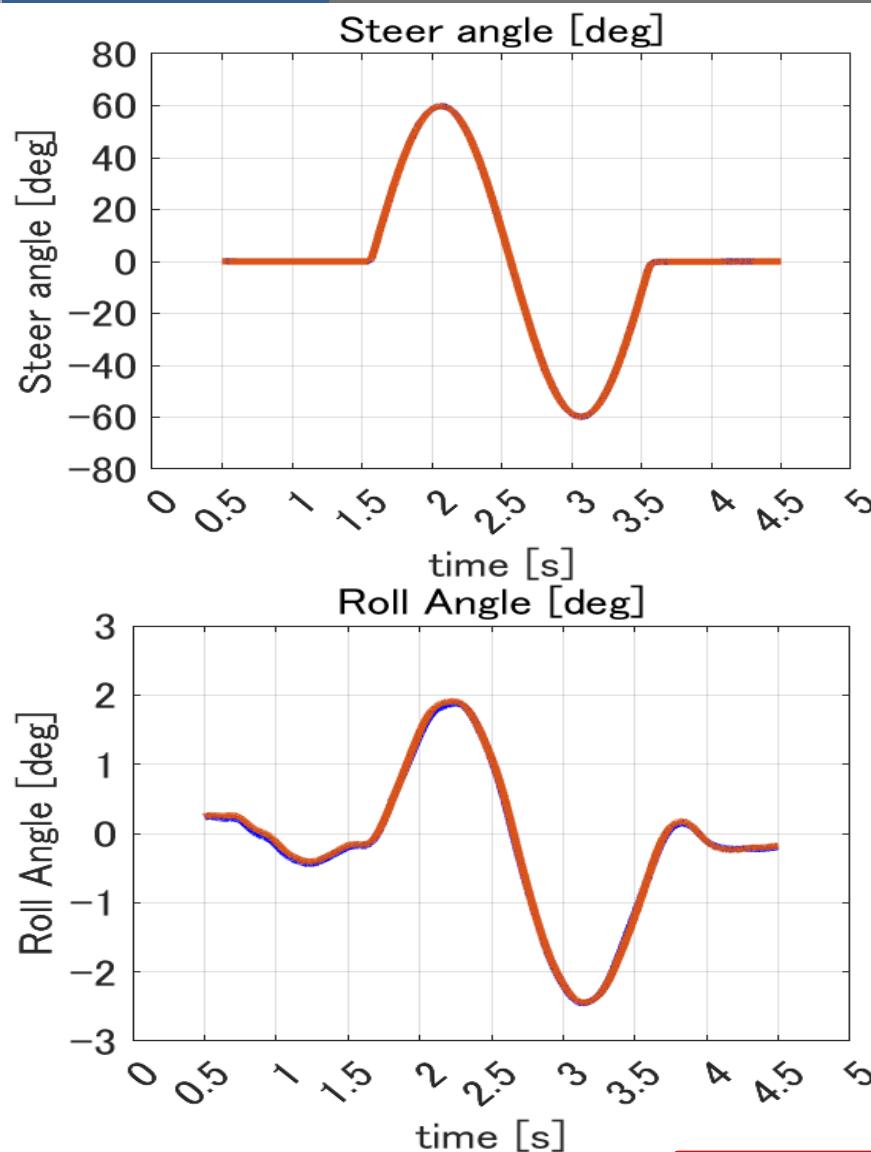


ステアリングロボット取付の様子



正弦波操舵入力試験

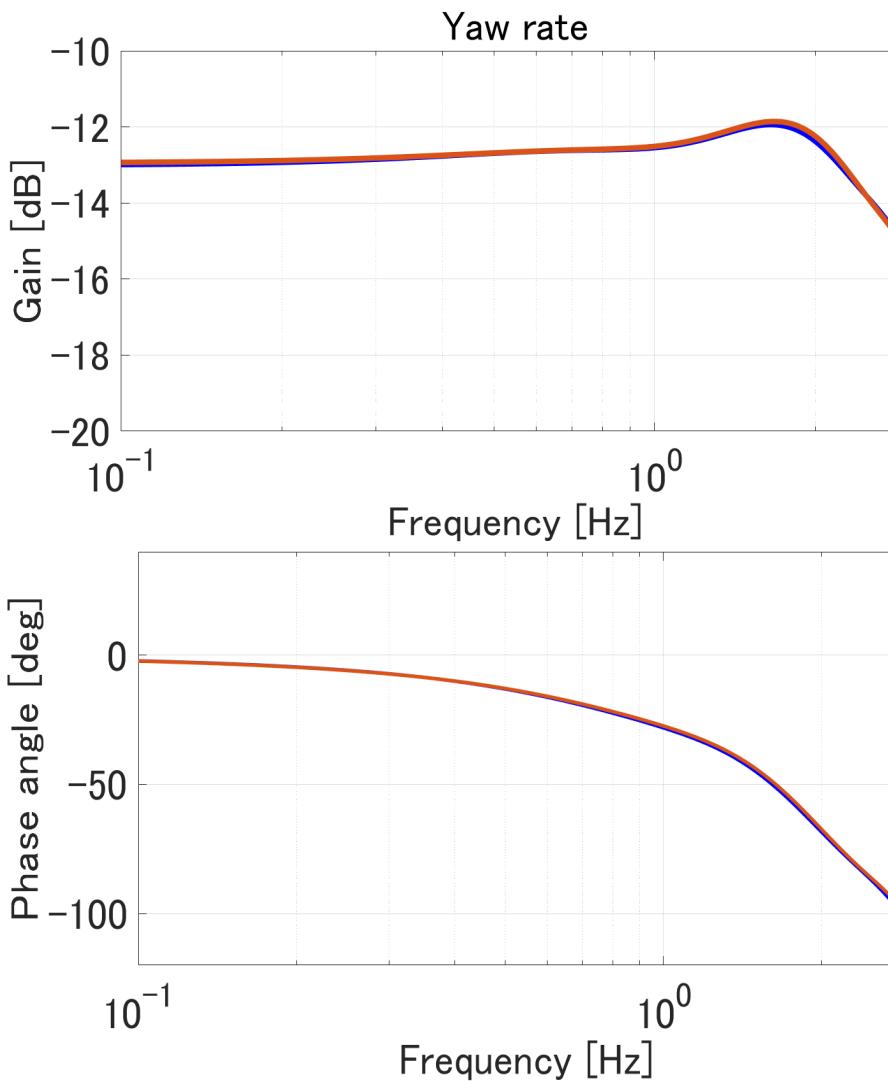
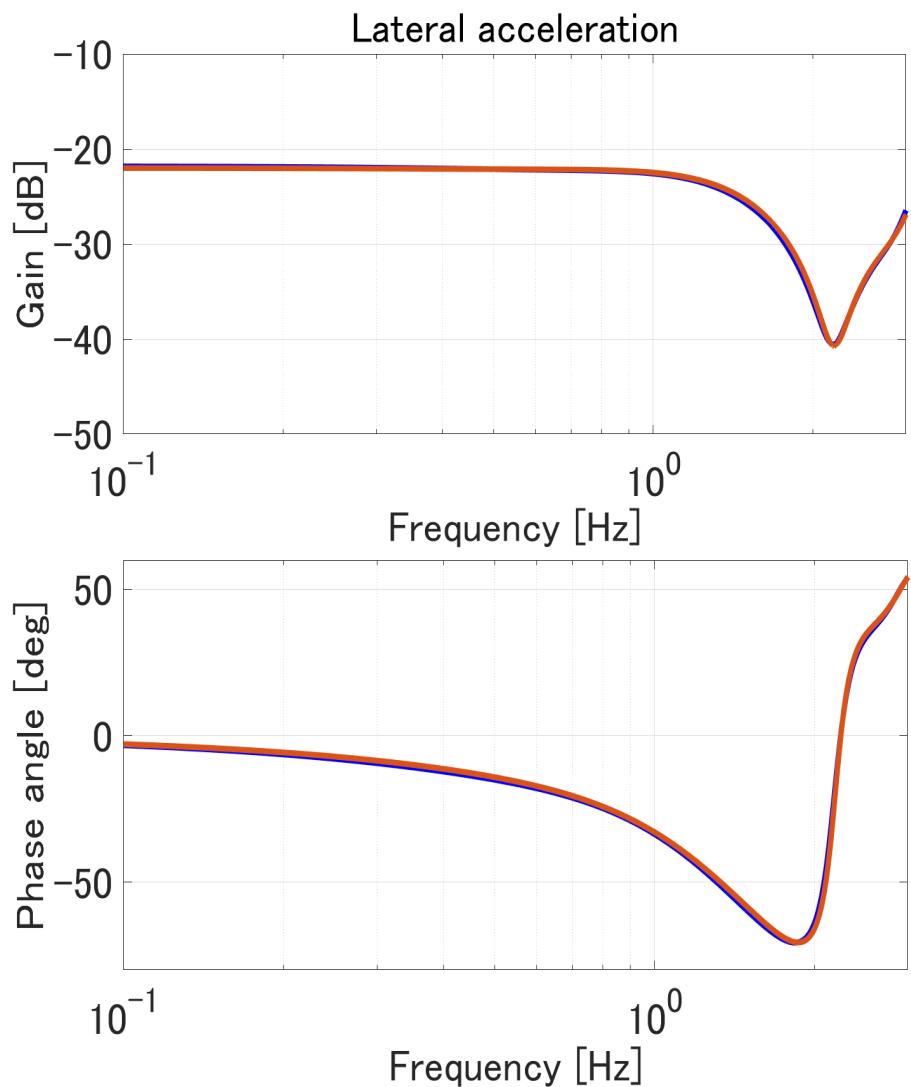
- 車体制振ダンパー有
- 車体制振ダンパー無



明確な差は見られず

周波数応答試験

- 車体制振ダンパー有
- 車体制振ダンパー無



横加速度、ヨーレイトとともに明確な差が見られず

被験者情報

| Driver | M/F | Age | Drive experience | Drive frequency |
|--------|-----|-----|------------------|-----------------|
| A | M | 23 | 5years | Daily |
| B | M | 25 | 5years | 1 / week |
| C | M | 24 | 5years | 1,2 / week |
| D | M | 23 | 5years | Daily |
| E | M | 41 | 22years | Daily |
| F | M | 25 | 5years | Daily |
| G | M | 47 | 25years | Daily |
| H | M | 51 | 32years | Daily |

車両、試験に対する習熟度を高めたうえで試験を実施

試験の様子



車体制振ダンパーの主観評価

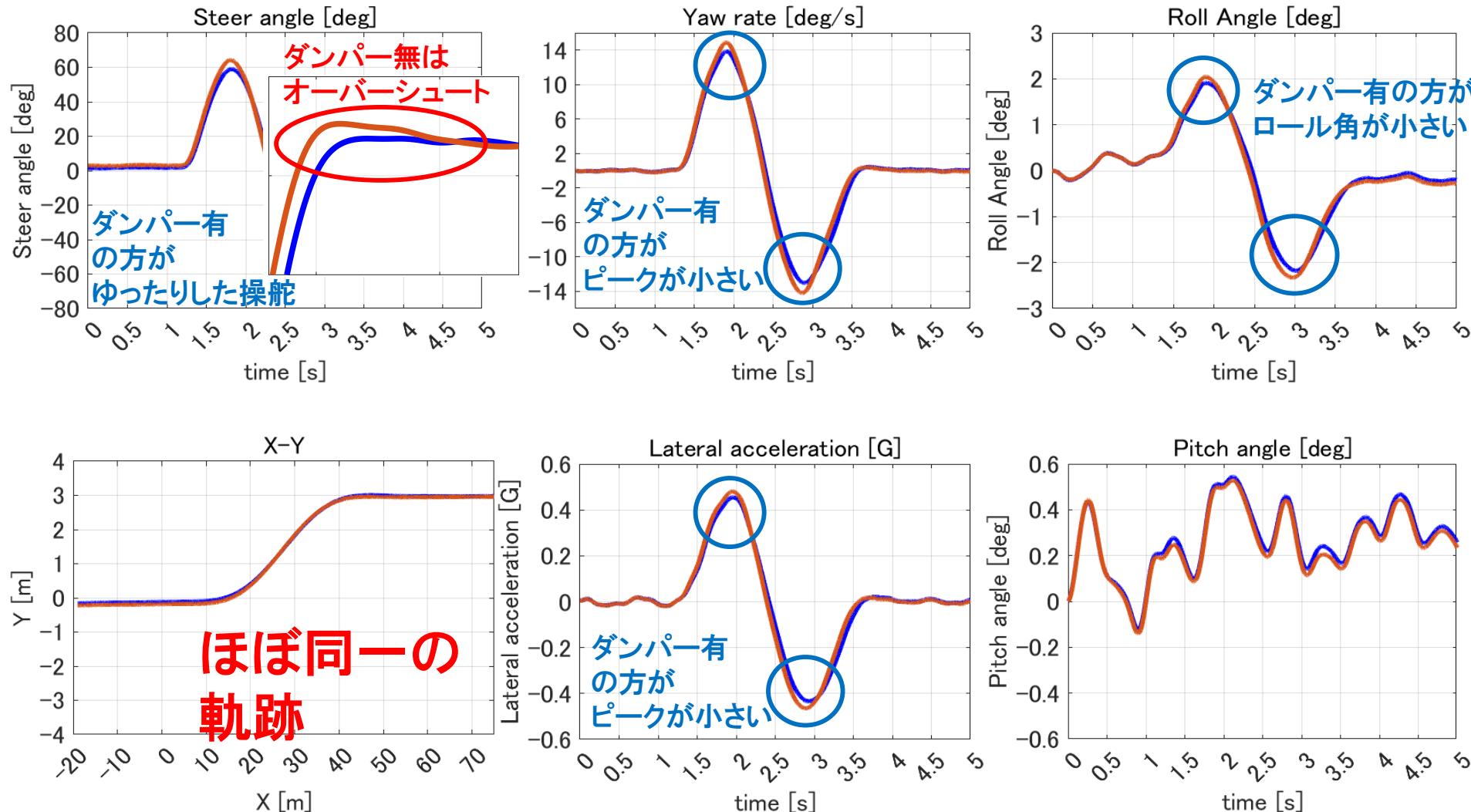
- ・ステアリングのもっさり感が低減
- ・ステアリングの緩みが減少してダイレクト感が向上
- ・あらゆる領域で車内の静粛性が向上
- ・路面からの入力に対する収束性が向上
- ・ロール感が減り
車両の収束性が向上



試験結果

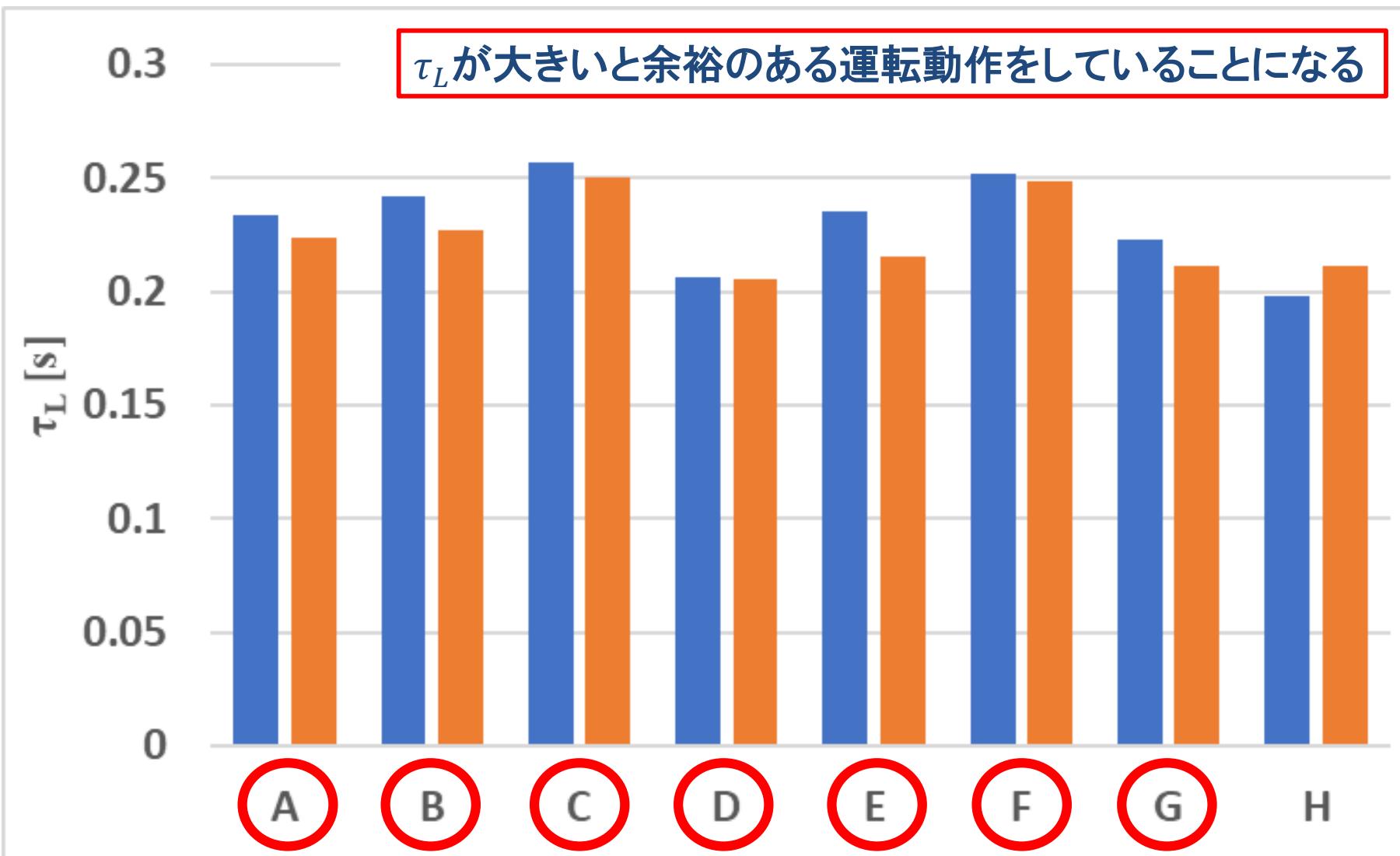
- 車体制振ダンパー有
- 車体制振ダンパー無

Driver A 取得データ(平均データ)



試験結果

- 車体制振ダンパー有
- 車体制振ダンパー無



τ_L が大きいと余裕のある運転動作をしていることになる

8名中7名が車体制振ダンパーにより τ_L が向上

24YKN05

前方視界の違いが操舵特性評価に及ぼす影響

Effect of forward visibility differences on the steering characteristics



創造工学部
自動車システム開発工学科
山門・狩野研究室
2131019 木下優音

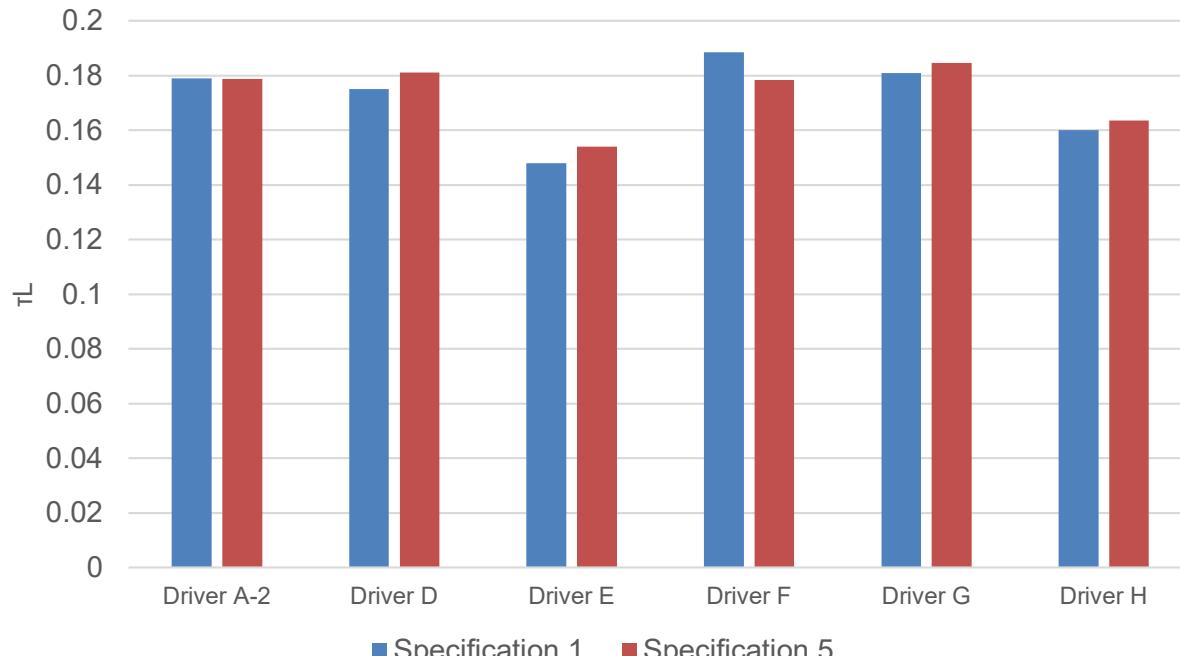
通常視界と視界制限仕様の比較



視界 1



視界5



被験者4名の仕様5の τ_L が最も
大きくなつた

視界制限が操舵特性評価に及ぼす影響

ここまで結果からドライバ上部の視界を逆三角形
に隠す仕様5の τ_L が大きい

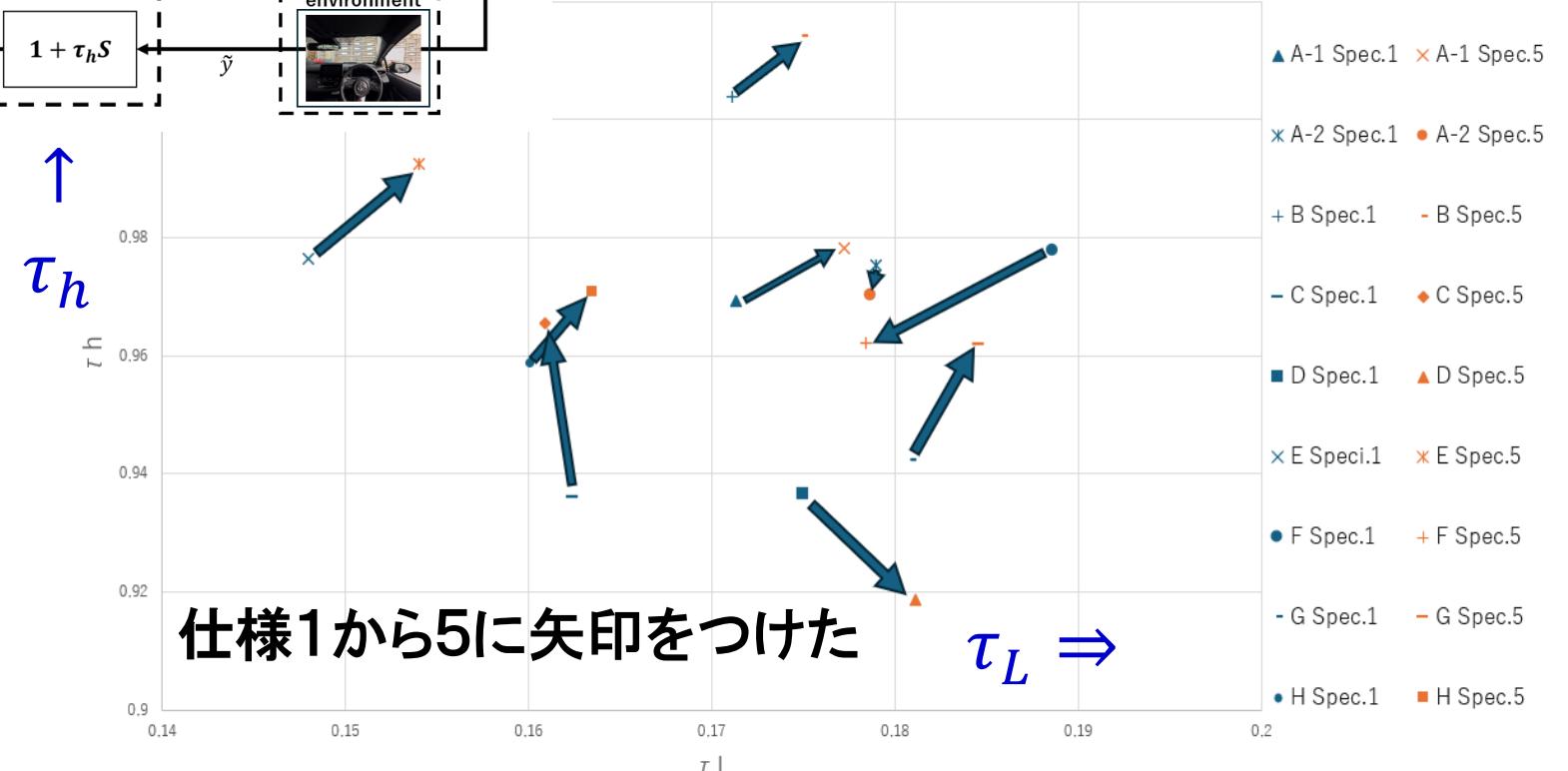
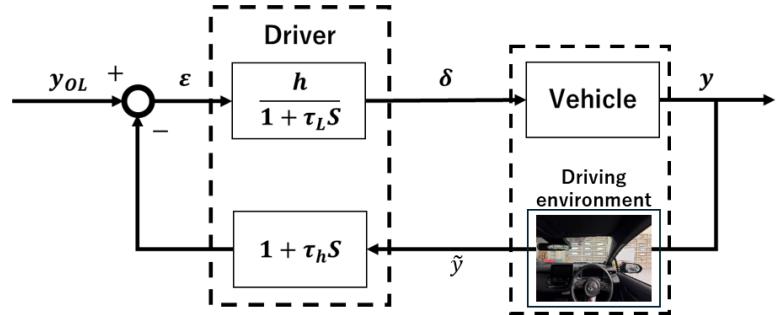


「視界は広い方がいい」
一般的な考えとは異なる結果となった



視界制限が操舵特性評価に与えた影響とは？

視界制限が操舵特性評価に及ぼす影響



被験者5名 τ_L が大きくなるとともに τ_h が大きくなっていることを確認

無意識のうちに τ_h を大きくしている

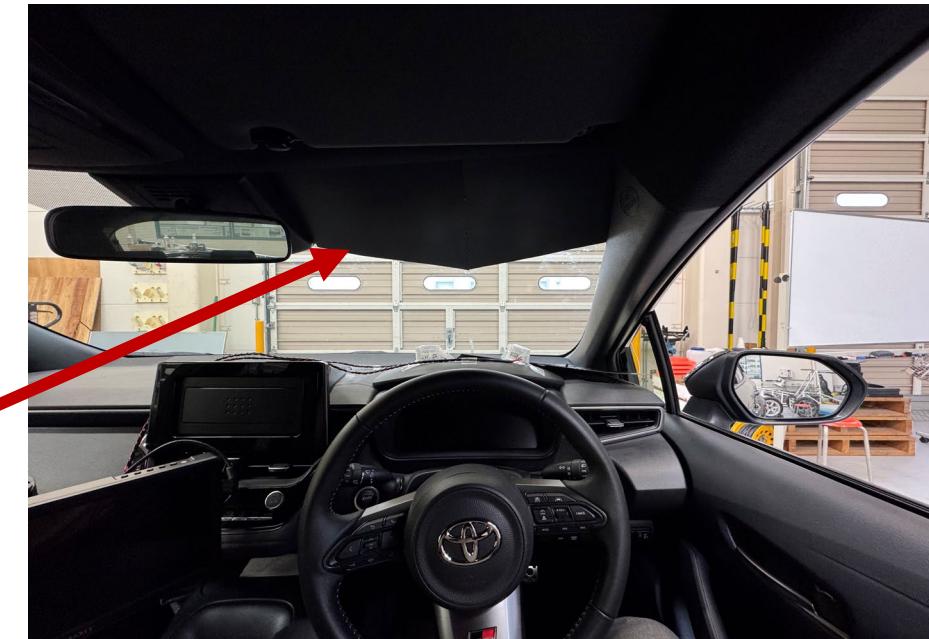
視界制限が操舵特性評価に及ぼす影響

この直線によりドライバの視線の散乱が
抑えられる効果アリ



本田技研工業株式会社 特願2007-
221965 車両用フロントウィンドウ
図3(a)より引用

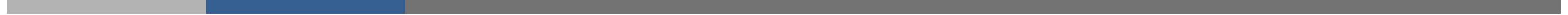
視界制限により視線
の散乱を抑制



仕様5:視界5

↓
ドライバが先を見る余裕が生まれた

↓
その余裕が τ_L が大きくなった要因



おわりに

『人間の感性をデジタル化する τ_L 』

DX × テスティング × シミュレーション が重なる領域へ
自動運転・自動化が進んでも,
ドライバーは“わずかな車両運動・環境の違い”を鋭く感じ取る。
この“人の感じ方”を**定量的**に扱い,
テスティングとシミュレーションの両側に橋渡しするのが τ_L

τ_L により実現したいこと

“乗り味”と“人の感性”をモデル化
自動運転における“受け入れられる制御”的基準づくり
デジタルツインへの「人間中心設計」の接続

結局、クルマは「人が乗ってなんぼ」のもの！
人間以外、「いいクルマ」を決めることはできない。

既にサプライヤ、OEMでの利用段階へ…

【9:30～11:35】

16 車両の運動と制御Ⅰ

Vehicle Dynamics and Control I

<OS> 座長：高橋 純也（日立製作所）

066 シート特性違いによるドライバ遅れ時間(τ_L)の確認

奥田 哲大・加藤 朋弥（トヨタ紡織）

067 ドライバ着座位置が操舵特性評価に及ぼす影響

服部 元治・安部 正人・狩野 芳郎・山本 真規・
山門 誠・西村 直哉（神奈川工科大学）

【14:20～16:00】

102 車両の運動と制御Ⅲ

Vehicle Dynamics and Control III

座長：占部 博之（本田技術研究所）

071 操舵と路面凹凸の複合入力下における操縦安定性の解析

田中 歩武・芝端 康二・山門 誠・山本 真規・
安部 正人・狩野 芳郎（神奈川工科大学）

072 車両運動特性の変化がドライバーの運転操作に与える影響の 解析

前田 義紀（トヨタ自動車）



先進技術研究所

K 神奈川工科大学

第四期研究テーマ 成果概要

車両操舵特性評価手法の高精度化および一般化（通称： τ （タウ）L評価オープン・イノベーション）

研究代表者 自動車システム開発工学科 山門誠教授

共同研究者 自動車システム開発工学科 狩野芳郎助教、安部正人名誉教授

名古屋大学・日本大学・神奈川工科大学 合同シンポジウム

「3大学が考えるデジタルトランスフォーメーション～テスティング&シミュレーションの現状と将来～」

デジタルツインを用いた人間中心テスティング
– ドライバの主観評価を定量化する –

2025/11/24

工学部 機械工学科
車両運動・制御研究室

