

機械学習とCAEによる官能評価の DX適用事例紹介

ESTECH

株式会社 エステック

Engineering Solutions and Technologies

2020年 宮代 大輔

機械学習とCAEによる官能評価のDX適用事例紹介

- **はじめに**
- **機械学習による走行試験分析**
- **高精度シミュレーションモデル開発**
- **台上試験による検証**
- **台上シミュレーション**
- **メカニズム解析**
- **まとめ**

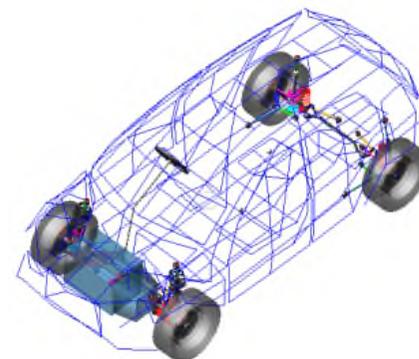
研究の背景

- 車体補強が運転者の感覚に影響を及ぼす現象は経験的に知られている。
- 車体補強が計測データに与える影響は微小なため、その影響を工学的に厳密に把握すること、その要因を解明することが求められている。

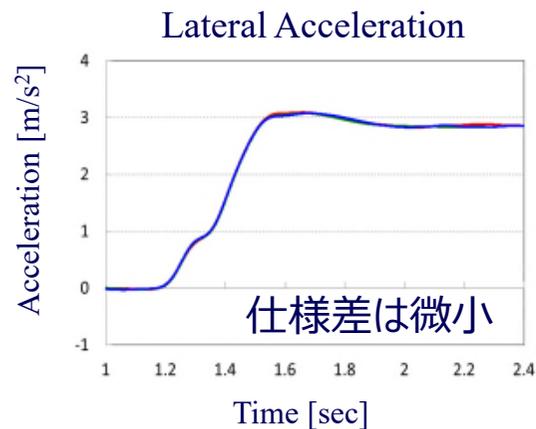
車体補強有無



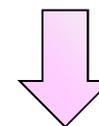
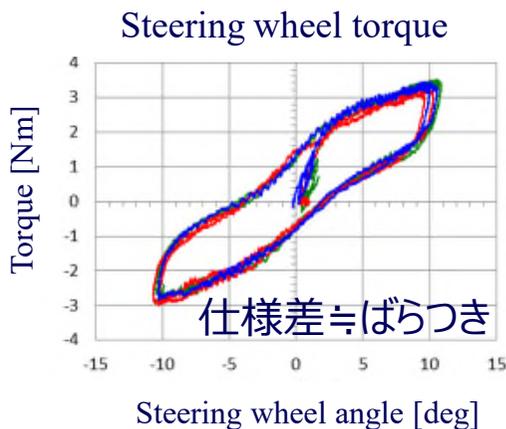
操舵フィールが明らかに変わった！



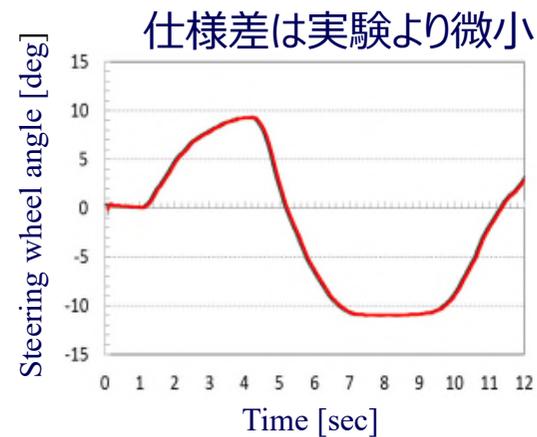
データの計測



仕様差かばらつきか？！



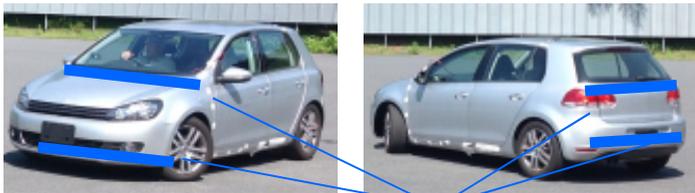
シミュレーション



研究の目的

- 官能評価にて有意差を感じられる車体補強仕様車を作製すること
- 車体補強差を表す物理量を実験データから抽出すること
- 車体補強による操縦安定性への影響メカニズムを調べること

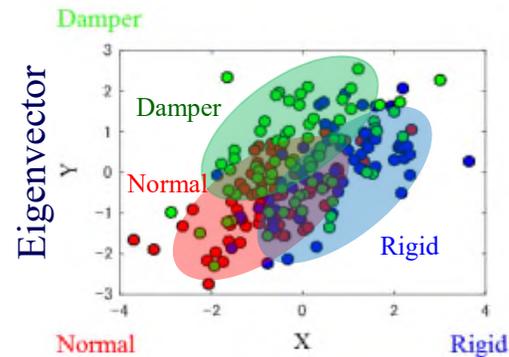
車体補強仕様車の作製



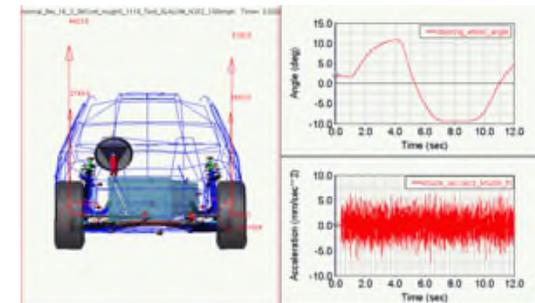
車体補強部材

- 実験仕様
 1. Normal仕様
 2. Rigid仕様
 3. Damper仕様

機械学習による仕様判別

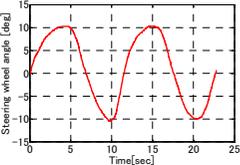


メカニズム解析



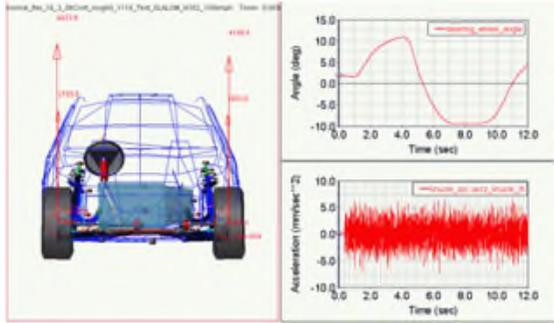
研究のアプローチ

走行試験
Driving experiment
Data analysis



A line graph showing the steering wheel angle in degrees over a 25-second period. The y-axis ranges from -15 to 15 degrees, and the x-axis ranges from 0 to 25 seconds. The curve shows a sinusoidal wave with an amplitude of approximately 10 degrees and a period of about 10 seconds.

走行シミュレーション



A 3D wireframe model of a car chassis is shown on the left. To its right are two graphs. The top graph plots 'Angle (deg)' on the y-axis (from -10 to 15) against 'Time (sec)' on the x-axis (from 0 to 12). It shows a smooth sinusoidal wave. The bottom graph plots 'Acceleration (mm/sec²)' on the y-axis (from -10 to 10) against 'Time (sec)' on the x-axis (from 0 to 12). It shows a noisy signal fluctuating around zero.

比較・検証

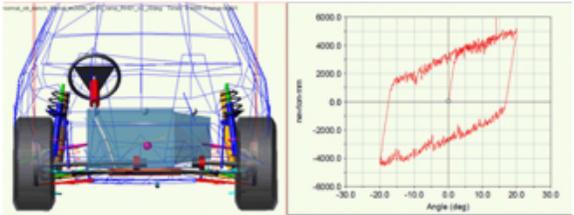
比較・検証

台上試験
Normal vs Rigid



A photograph of a car chassis mounted on a test rig in a laboratory setting. The rig consists of several vertical supports and sensors positioned around the chassis.

台上シミュレーション
Normal vs Rigid
Mechanism Analysis



A 3D wireframe model of a car chassis is shown on the left. To its right is a graph plotting 'mm/sec' on the y-axis (from -6000 to 6000) against 'Angle (deg)' on the x-axis (from -30 to 30). The graph shows a hysteresis loop, with the upper curve increasing from -2000 to 6000 mm/sec as the angle increases from -20 to 20 degrees, and the lower curve decreasing from 2000 to -6000 mm/sec as the angle increases from 20 to -20 degrees.

比較・検証

メカニズム解析

仕様差を表す物理量の抽出

機械学習とCAEによる官能評価のDX適用事例紹介

- はじめに
- **機械学習による走行試験分析**
- 高精度シミュレーションモデル開発
- 台上試験による検証
- 台上シミュレーション
- メカニズム解析
- まとめ

走行試験のアプローチ

評価仕様

- Normal
- Rigid
- Damper

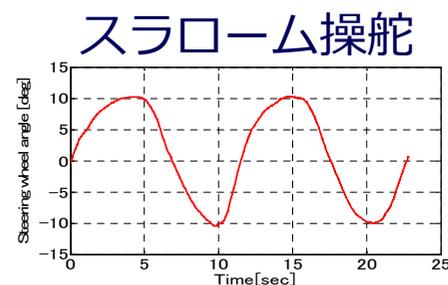
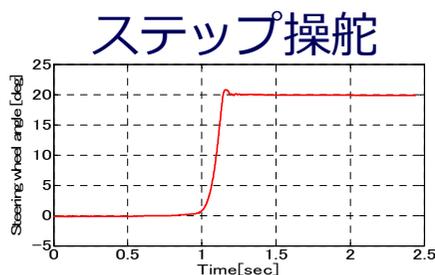


官能評価

- ブランド方式
- 仕様差の認識可否
⇒12人全員が仕様判別

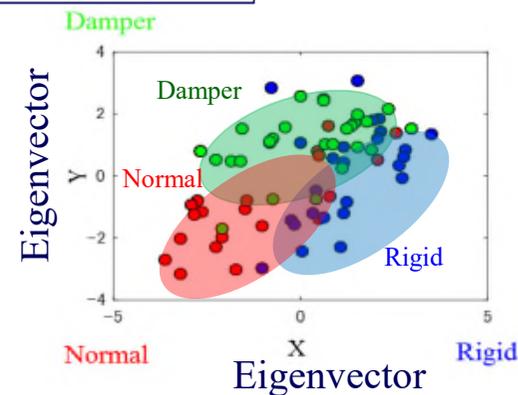
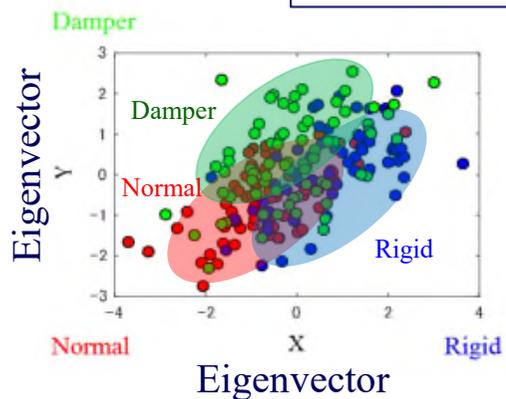


計測データ分析



- 2日間かけて3仕様を6周回して計測

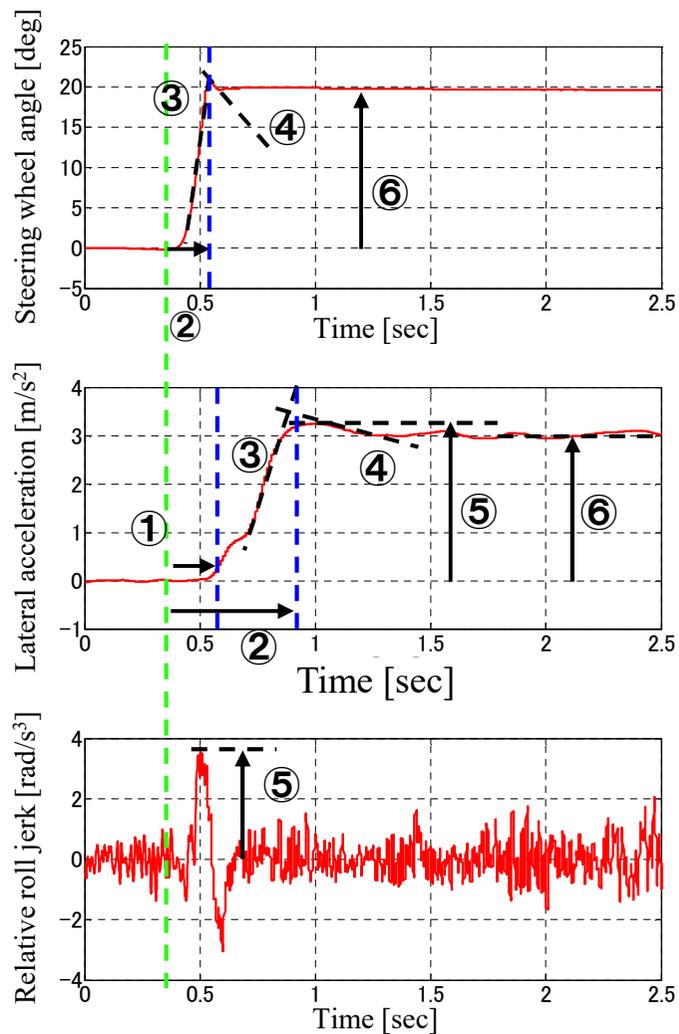
機械学習



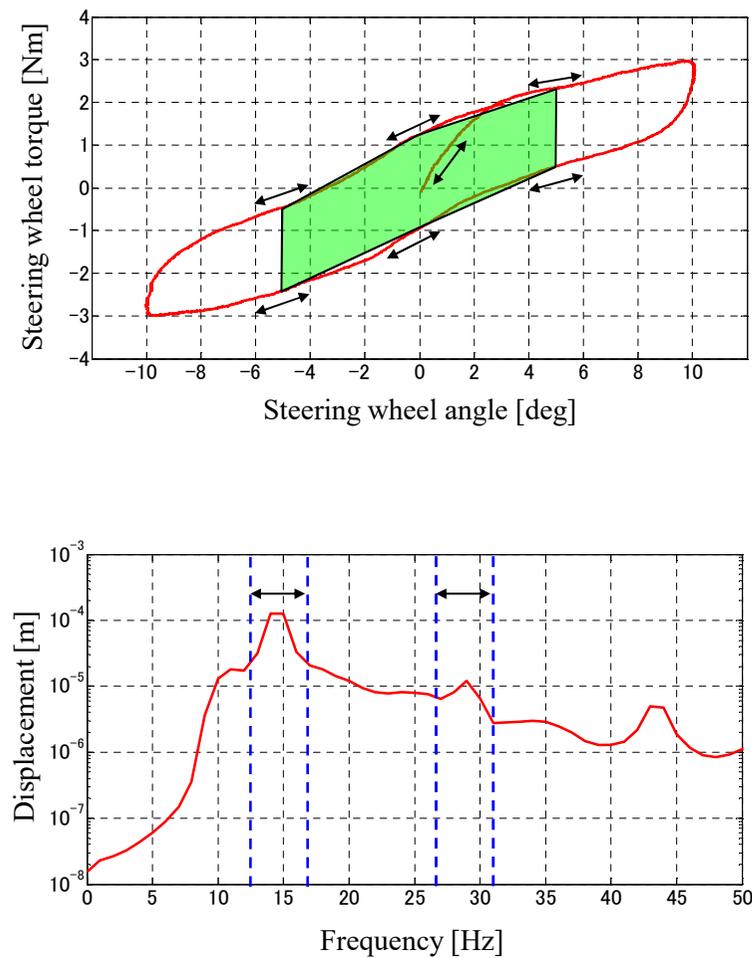
物理量の抽出例

- 走行時に計測した時刻歴データを比較検討し特徴量を抽出。

ステップ操舵



スラローム操舵



フィッシャー判別法

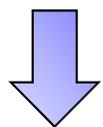
- フィッシャー判別法(FDA)は、対象の仕様群間差を最大にする固有ベクトルを推定することができます。

群内散布行列

$$S_w = \sum_{k=1}^K \sum_{n \in C_k} (y_n - \mu_k)(y_n - \mu_k)^t$$

群間散布行列

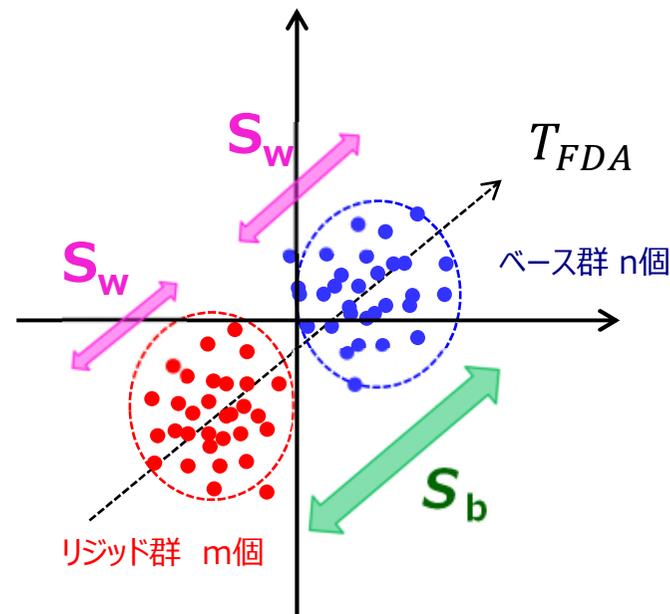
$$S_b = \sum_{k=1}^K N_k (\mu_k - \mu)(\mu_k - \mu)^t$$



FDA規準Jが大きくなる射影行列T

$$J(T) = tr \left\{ \frac{(T^t S_b T)}{(T^t S_w T)} \right\}$$

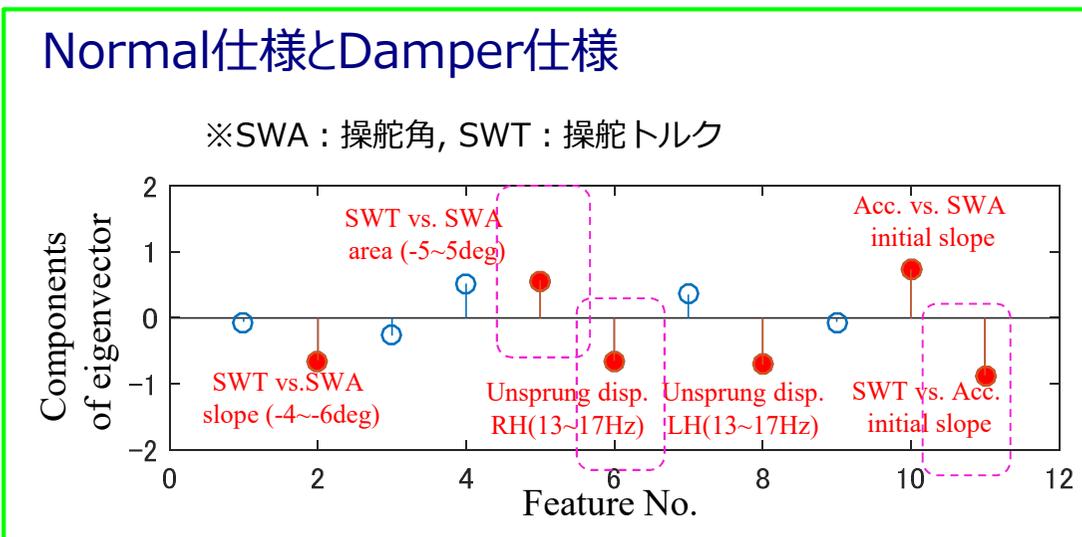
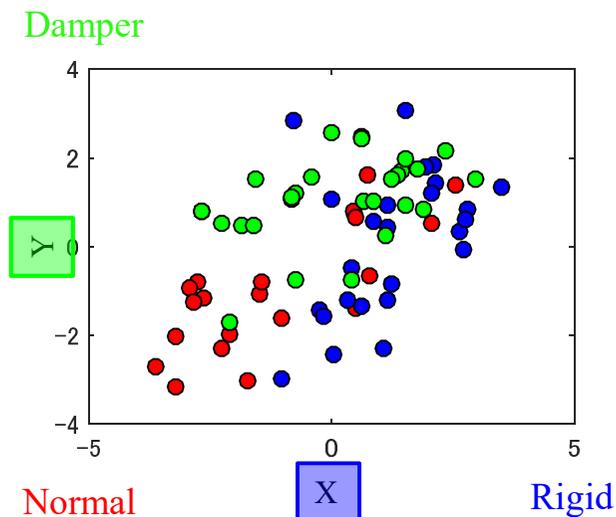
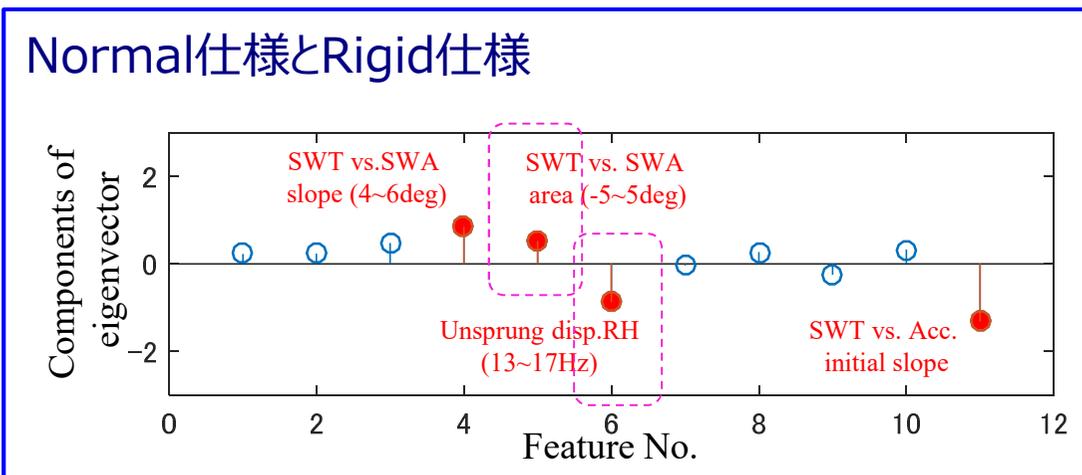
S_b / S_w が最大となる固有ベクトル T_{FDA}



統計分析例：スラローム操舵試験

- フィッシャー判別法(FDA)結果より、対象の仕様群間差を最大にするパラメータを推定し着目すべきパラメータを抽出することが可能

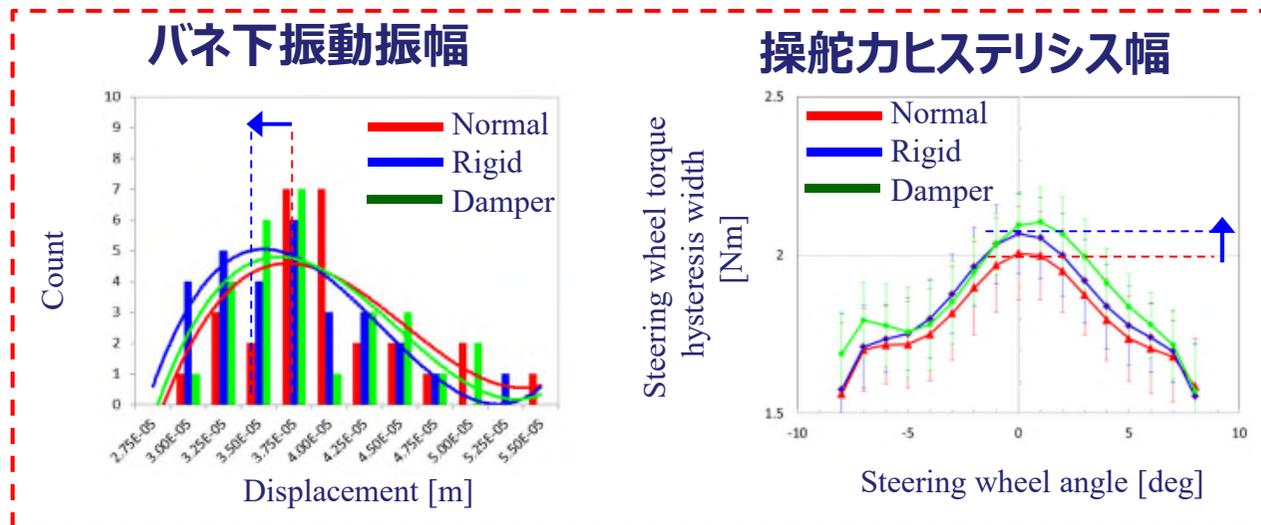
- 抽出できたパラメータ
 - 操舵角vs操舵トルクの面積
 - バネ下振動レベル
 - 操舵角vs横加速度の立上り傾き



走行試験結果まとめ

- 走行データを統計的に分析した結果、車体補強によって以下の結果を得ることができた。

1. Rigid仕様でフロントバネ下振動減少
2. Rigid仕様で操舵力ヒステリシス幅増加
3. Damper仕様で切り始めの横加速度増加
4. 静的かつグローバルな車体変形の差異は微小



機械学習とCAEによる官能評価のDX適用事例紹介

- はじめに
- 機械学習による走行試験分析
- **高精度シミュレーションモデル開発**
- 台上試験による検証
- 台上シミュレーション
- メカニズム解析
- まとめ

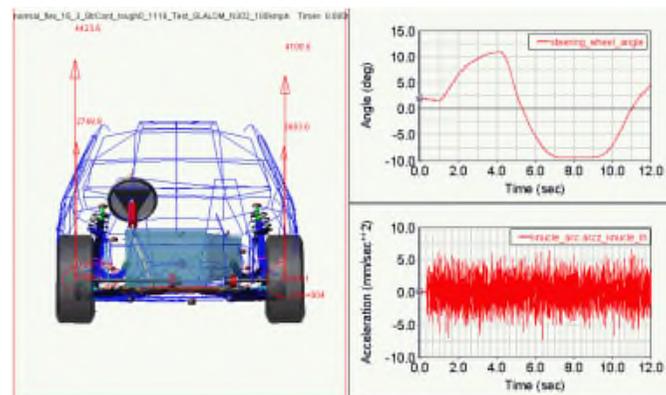
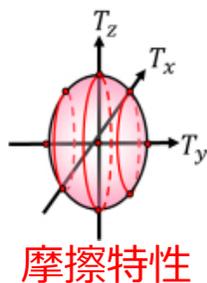
リバースエンジニアリングを活用したモデル化技術

- 実験で計測した基本特性を基に高精度なCAEモデルを構築します。



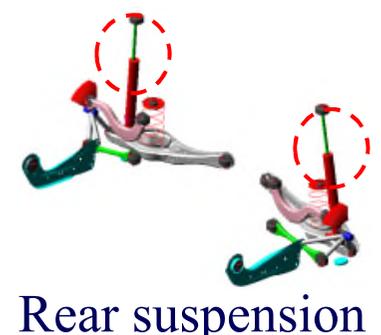
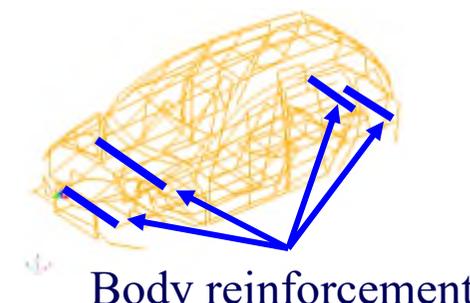
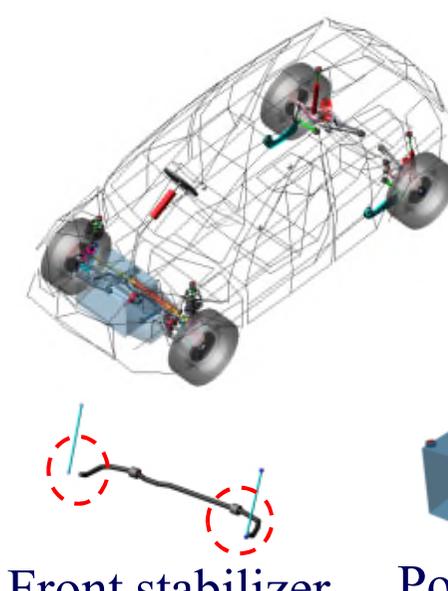
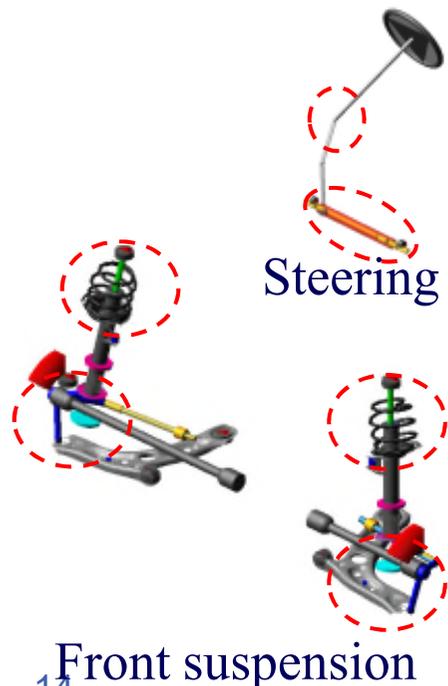
車両シミュレーションモデル

- 実機に基づく高精度な車両シミュレーションモデルを作成した。
 - ジオメトリ
 - 質量特性
 - 剛性特性
 - モーダル特性
 - 摩擦特性



モーダル特性

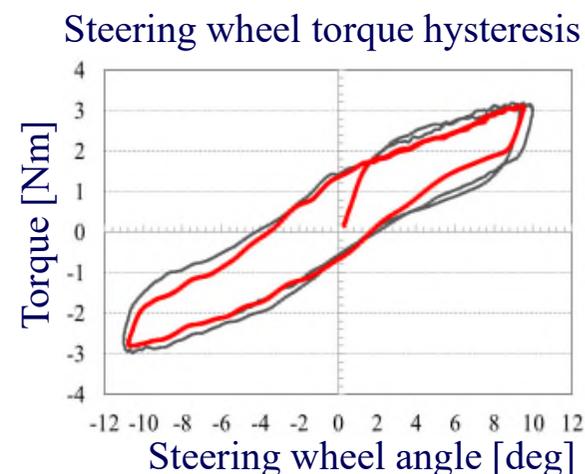
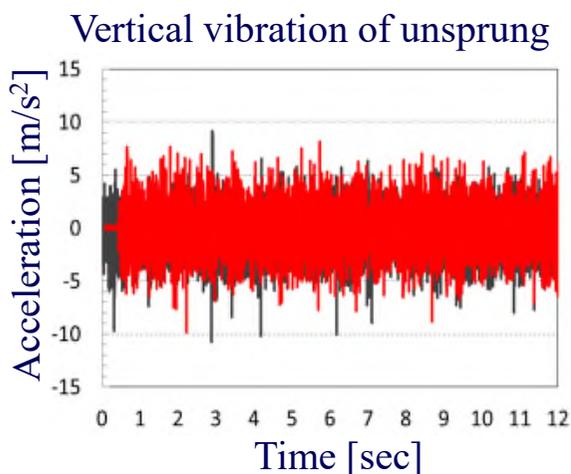
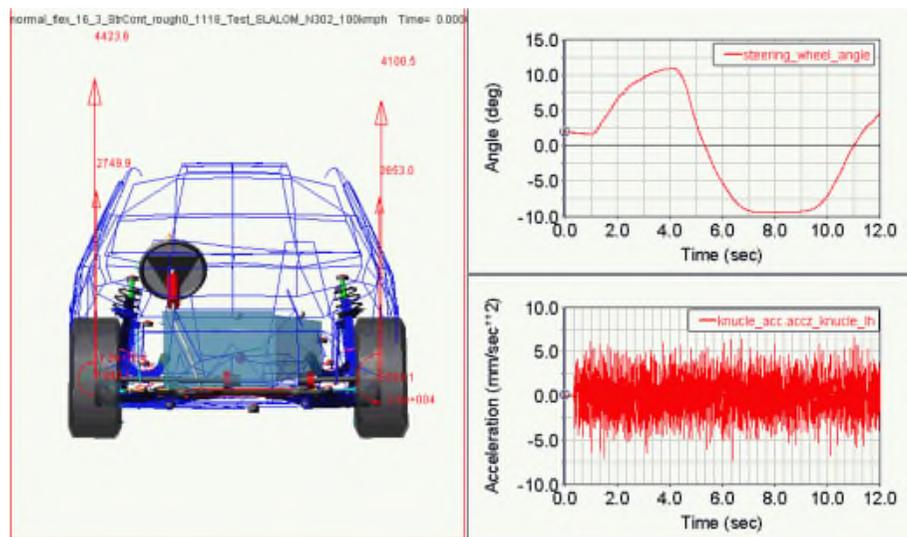
Running Simulation



走行試験結果との比較

- 走行試験と同等の走行シミュレーションを実施

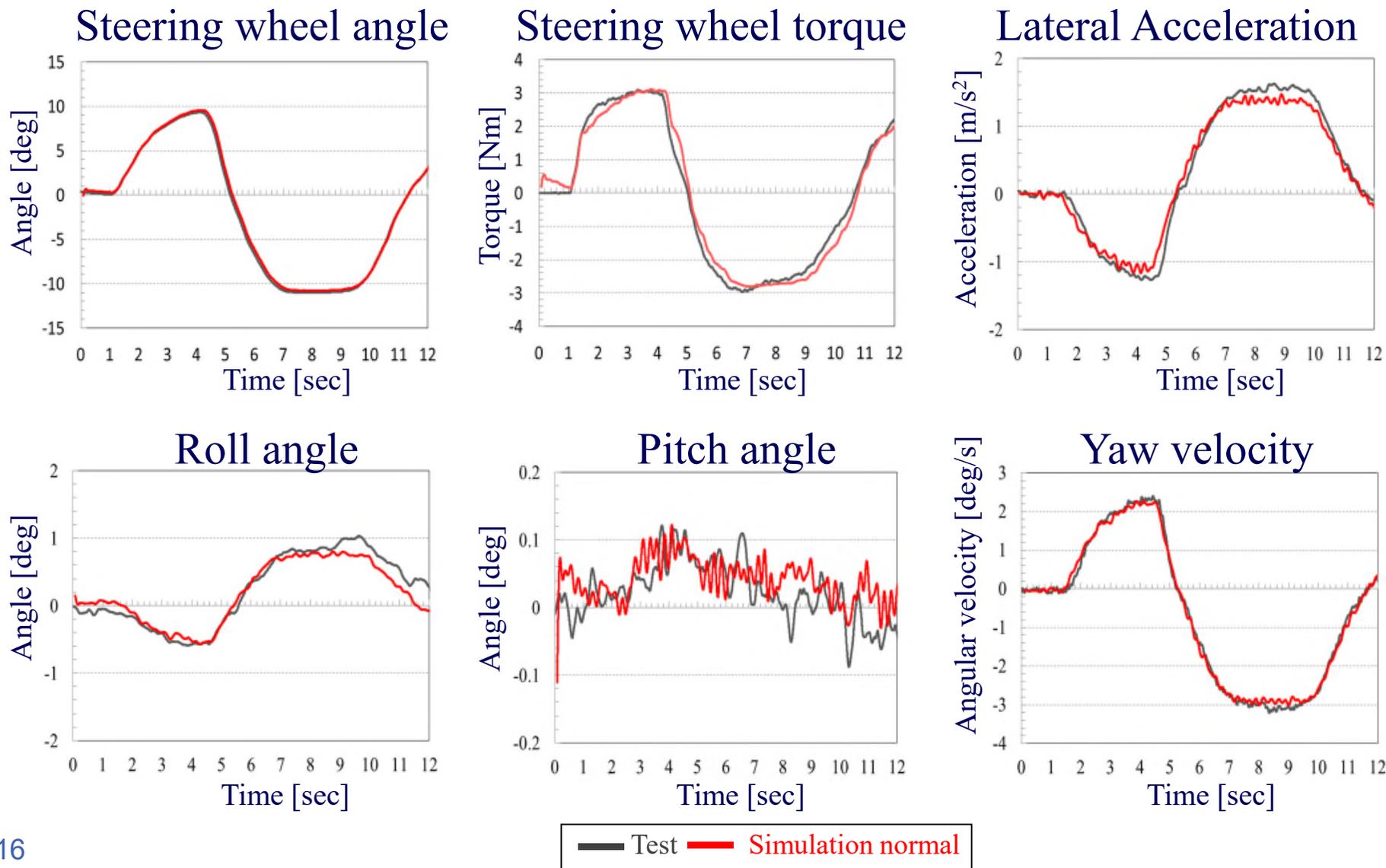
- 車速
 - 100km/h
- 操舵角
 - テストデータ
- EPS
 - On
- タイヤ
 - Magic Fomuler
- 路面入力
 - ラフネス路面



— Test — Simulation normal

走行試験結果との比較

- 走行試験と同等の走行シミュレーションを実施



機械学習とCAEによる官能評価のDX適用事例紹介

- はじめに
- 機械学習による走行試験分析
- 高精度シミュレーションモデル開発
- 台上試験による検証
- 台上シミュレーション
- メカニズム解析
- まとめ

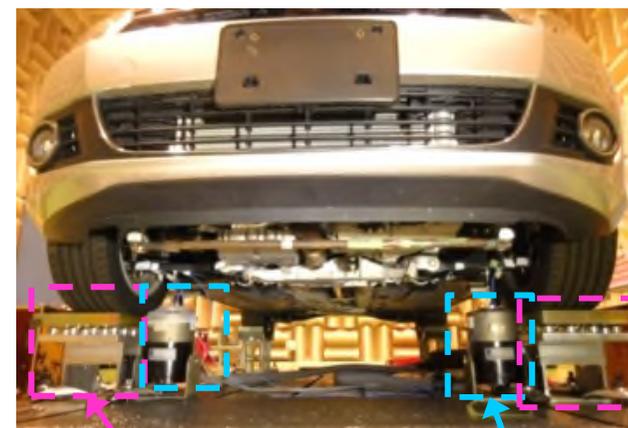
台上試験

- メカニズム解明のため走行試験結果を台上試験で表現したい。

- テスト仕様
 - ✓ Normal仕様
 - ✓ Rigid仕様
- 実験状態
 - ✓ ボールターンテーブル上に前輪設置
- 実験入力条件
 - ✓ 操舵角 : $\pm 20\text{deg}$
 - ✓ バネ下を電磁シエーカ加振
- 評価物理量
 - ✓ バネ下振動上下のRMS値 (10~30Hz)
 - ✓ 操舵ヒステリシス面積 ($\pm 2\text{deg}$)

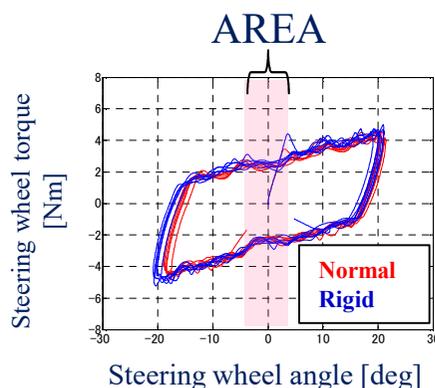
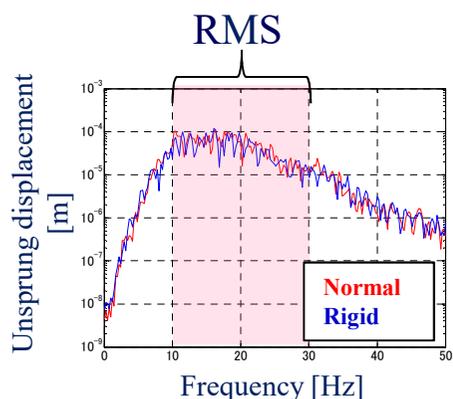
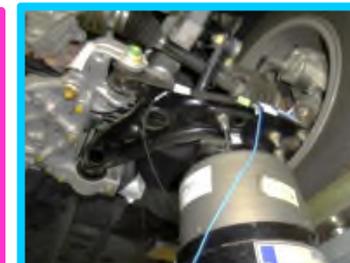


×4



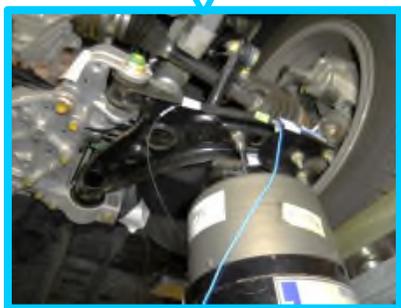
Ball Turn Table

Shaker

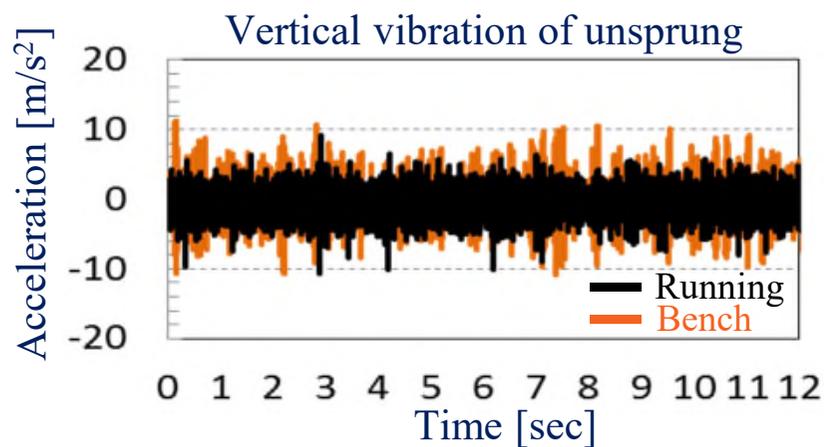
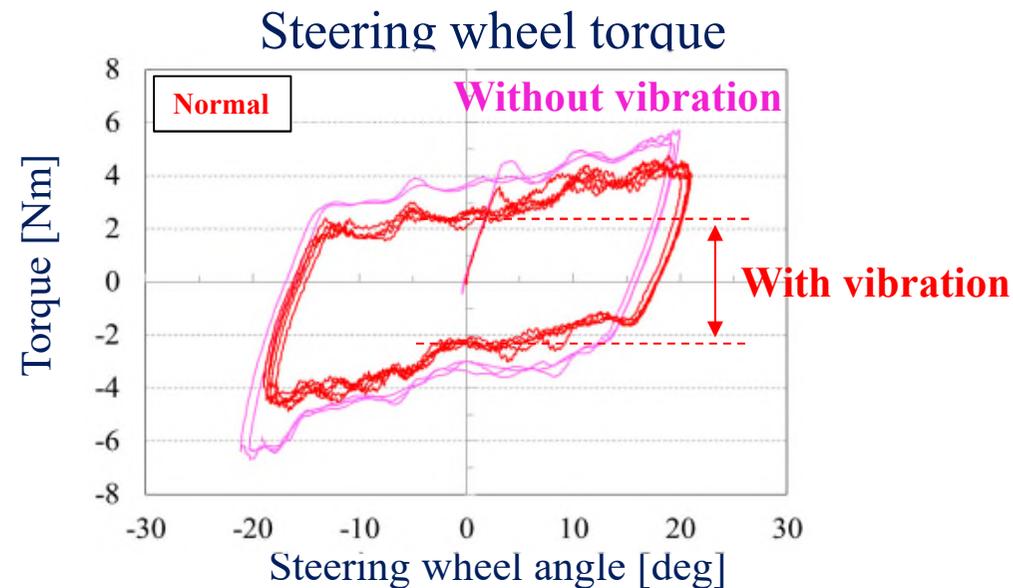


バネ下振動有無の影響

- バネ下の加振力増加に比例して操舵力ヒステリシスが減少

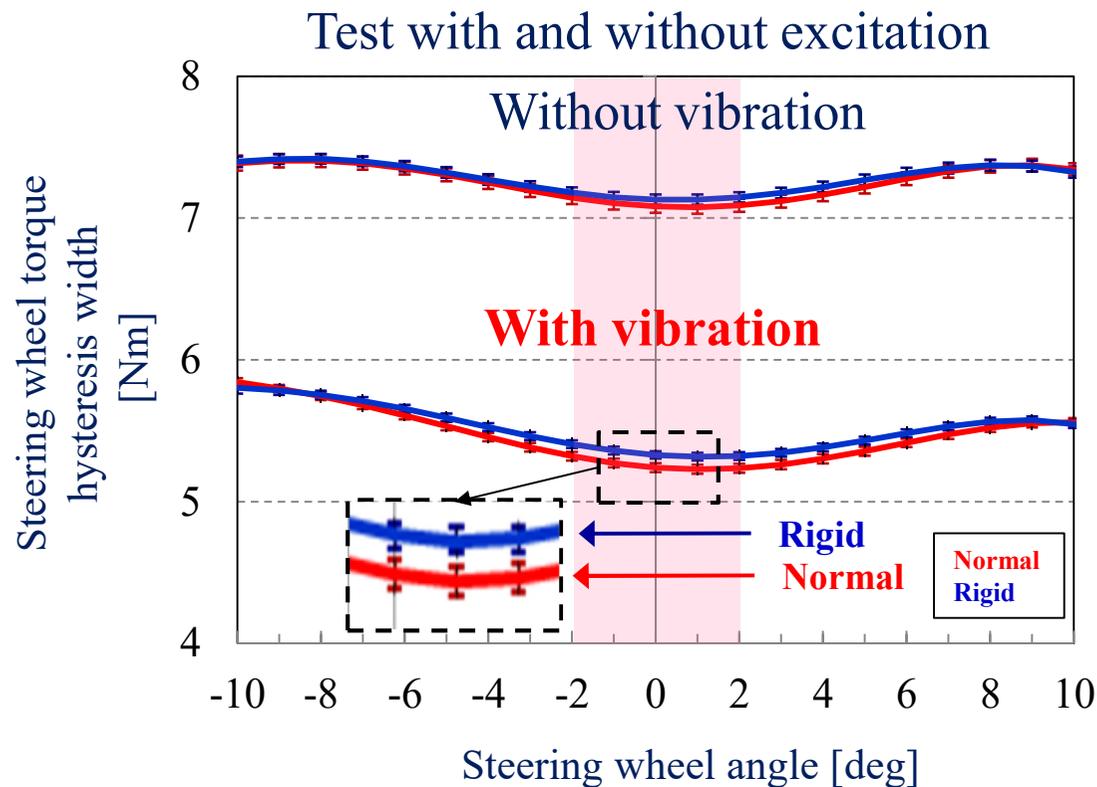
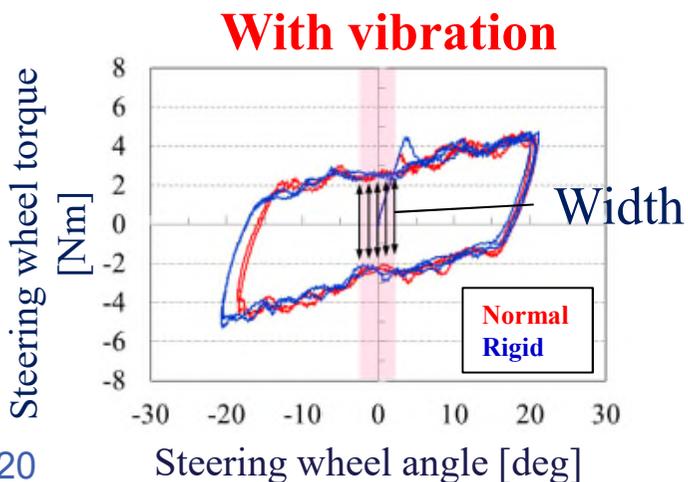
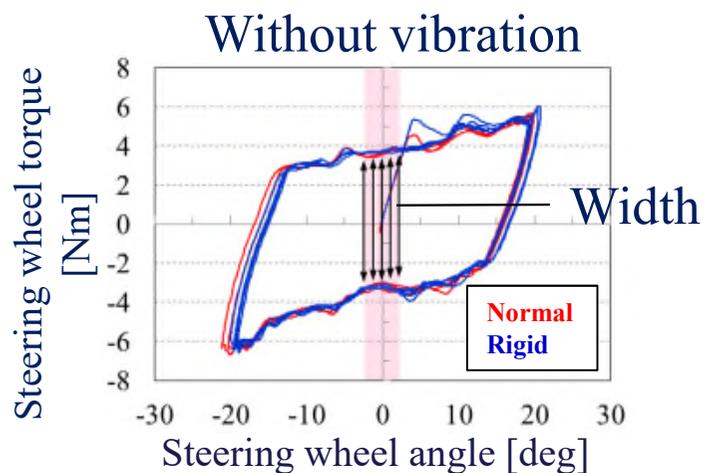


Shaker



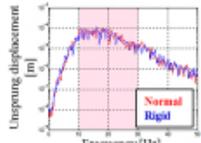
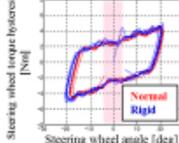
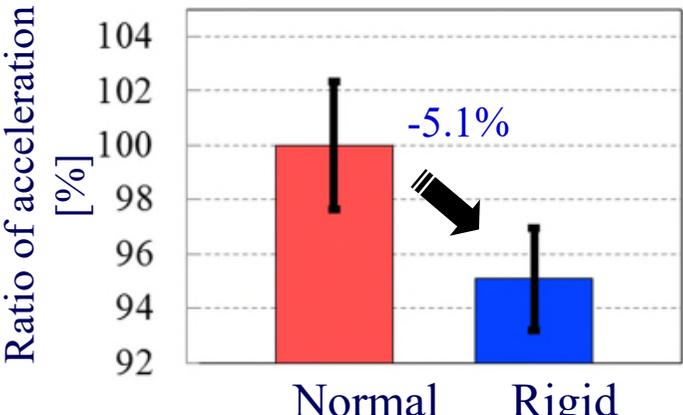
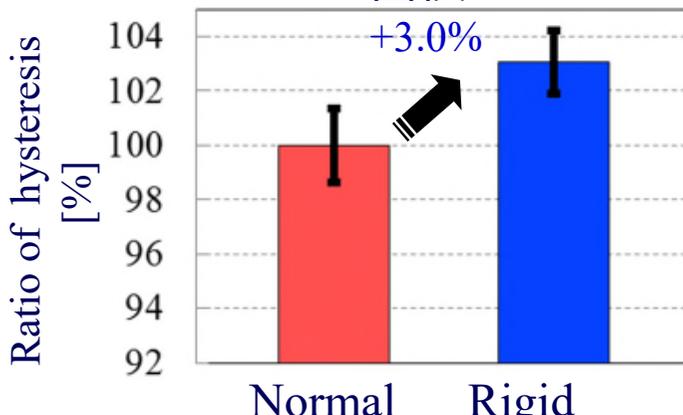
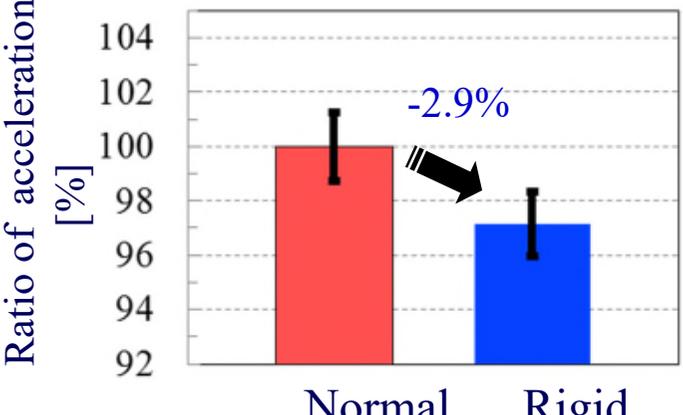
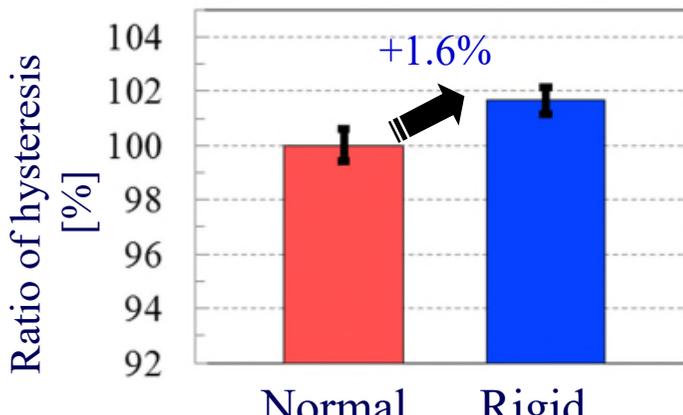
操舵力ヒステリシスの仕様比較

- バネ下を加振するとオンセンタ付近の操舵力ヒステリシスの仕様間差が増加



走行試験と台上試験の比較

- 走行テストと台上試験の着目物理量変化が対応が取れた。

テスト項目	バネ下振動上下 	操舵力ヒステリシス幅 												
 <p>走行試験</p>	<p>RMS</p>  <table border="1"> <tr><th>Condition</th><th>Ratio of acceleration [%]</th></tr> <tr><td>Normal</td><td>100</td></tr> <tr><td>Rigid</td><td>94.9</td></tr> </table>	Condition	Ratio of acceleration [%]	Normal	100	Rigid	94.9	<p>面積</p>  <table border="1"> <tr><th>Condition</th><th>Ratio of hysteresis [%]</th></tr> <tr><td>Normal</td><td>100</td></tr> <tr><td>Rigid</td><td>103.0</td></tr> </table>	Condition	Ratio of hysteresis [%]	Normal	100	Rigid	103.0
Condition	Ratio of acceleration [%]													
Normal	100													
Rigid	94.9													
Condition	Ratio of hysteresis [%]													
Normal	100													
Rigid	103.0													
 <p>台上試験</p>	<p>RMS</p>  <table border="1"> <tr><th>Condition</th><th>Ratio of acceleration [%]</th></tr> <tr><td>Normal</td><td>100</td></tr> <tr><td>Rigid</td><td>97.1</td></tr> </table>	Condition	Ratio of acceleration [%]	Normal	100	Rigid	97.1	<p>面積</p>  <table border="1"> <tr><th>Condition</th><th>Ratio of hysteresis [%]</th></tr> <tr><td>Normal</td><td>100</td></tr> <tr><td>Rigid</td><td>101.6</td></tr> </table>	Condition	Ratio of hysteresis [%]	Normal	100	Rigid	101.6
Condition	Ratio of acceleration [%]													
Normal	100													
Rigid	97.1													
Condition	Ratio of hysteresis [%]													
Normal	100													
Rigid	101.6													

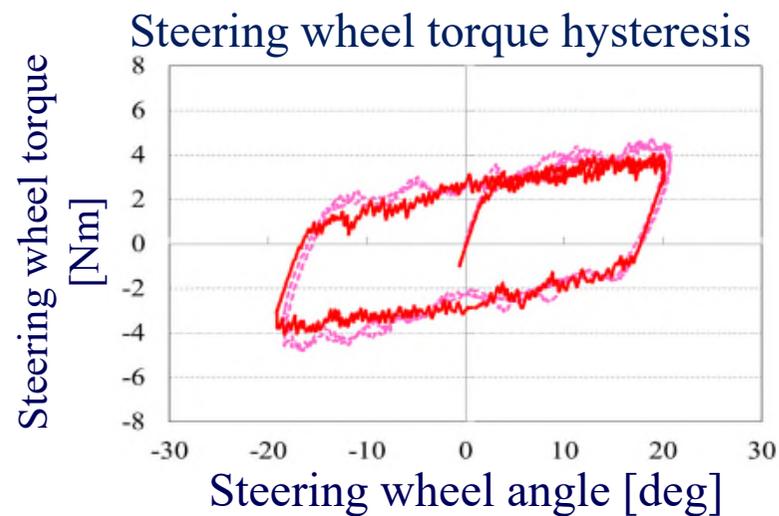
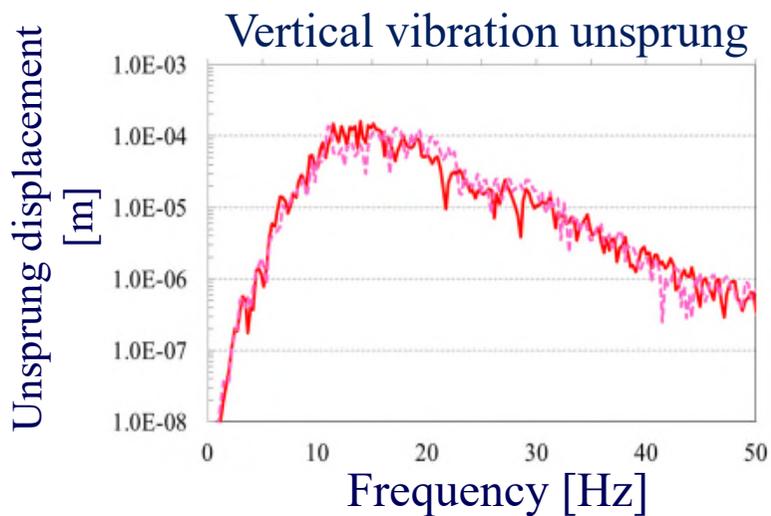
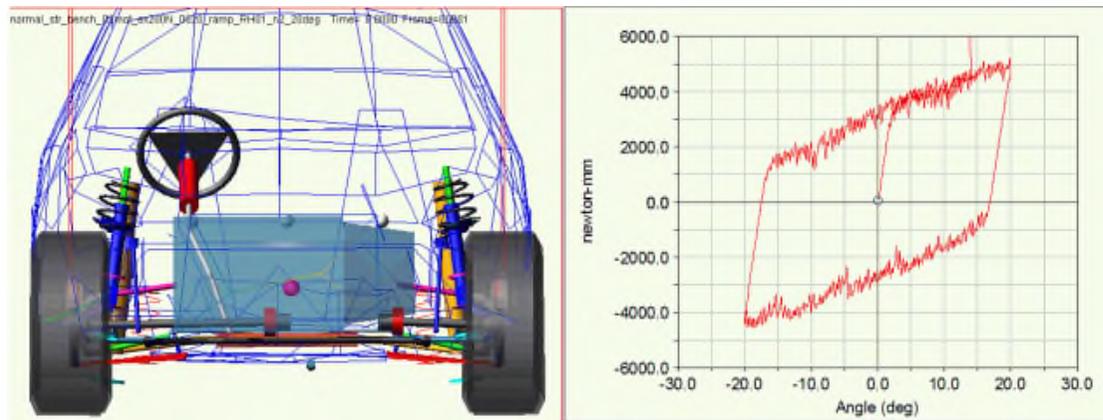
機械学習とCAEによる官能評価のDX適用事例紹介

- はじめに
- 機械学習による走行試験分析
- 高精度シミュレーションモデル開発
- 台上試験による検証
- 台上シミュレーション
- メカニズム解析
- まとめ

台上シミュレーション

- 車両モデルは台上試験結果の傾向を良い精度で表現

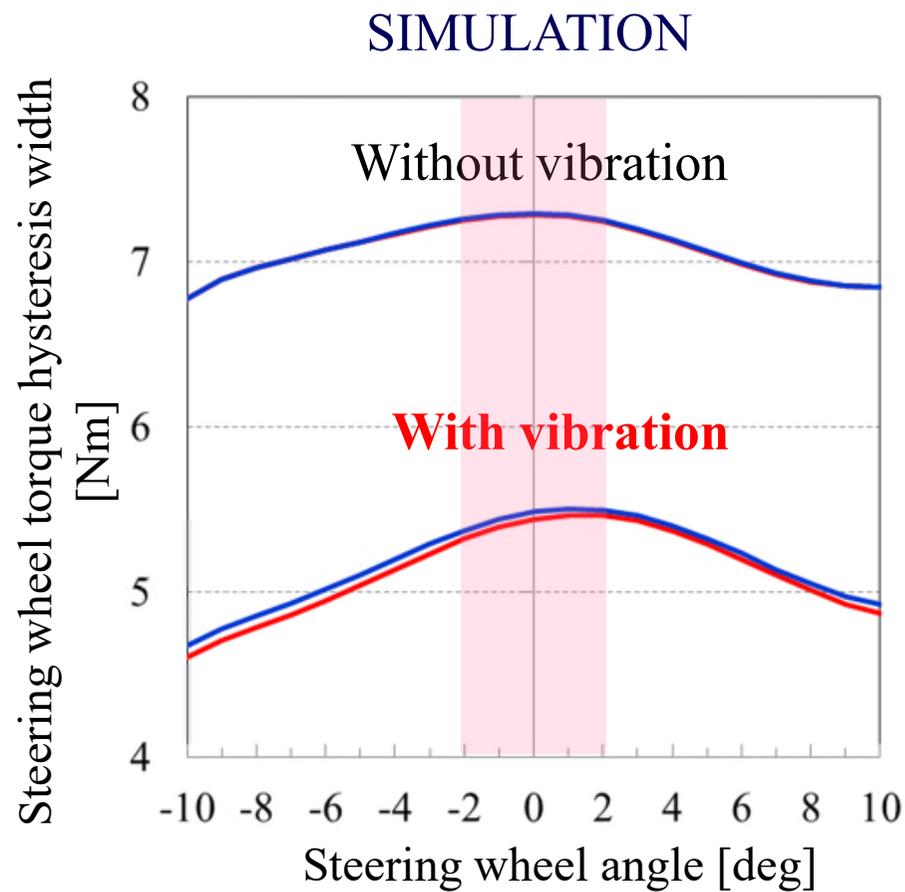
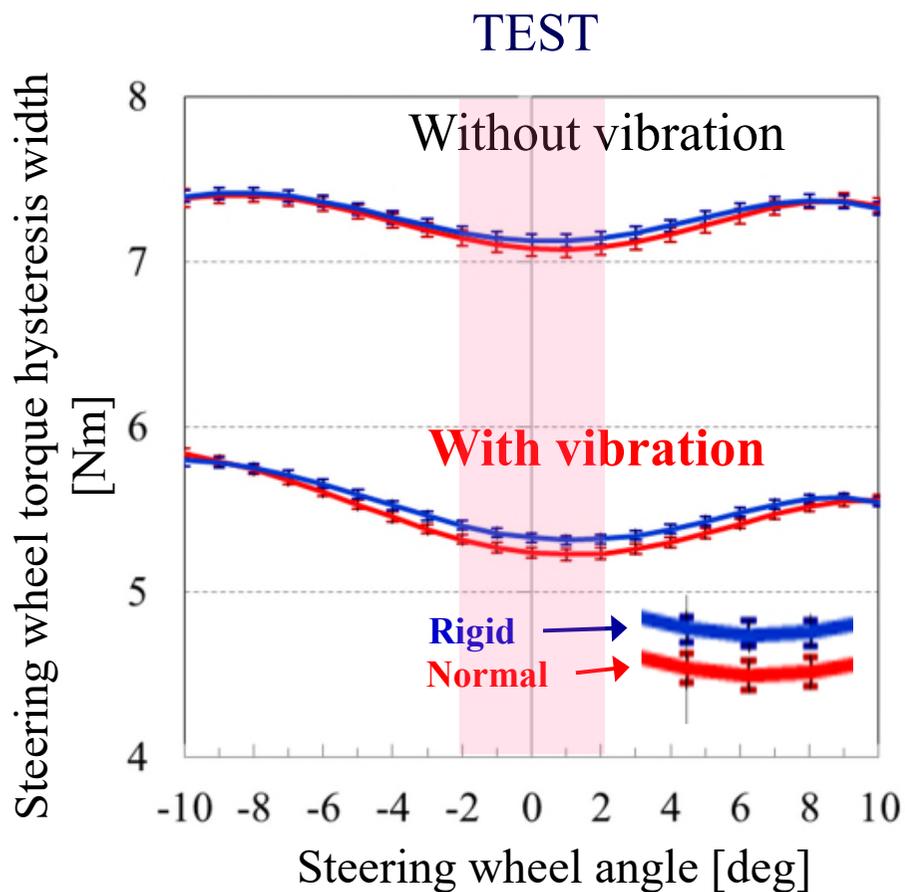
- 操舵角
 - 試験データ
- バネ下加振
 - 実験データ



— Simulation with excitation Test with excitation

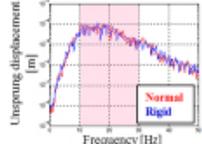
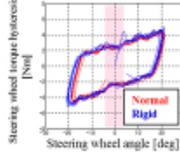
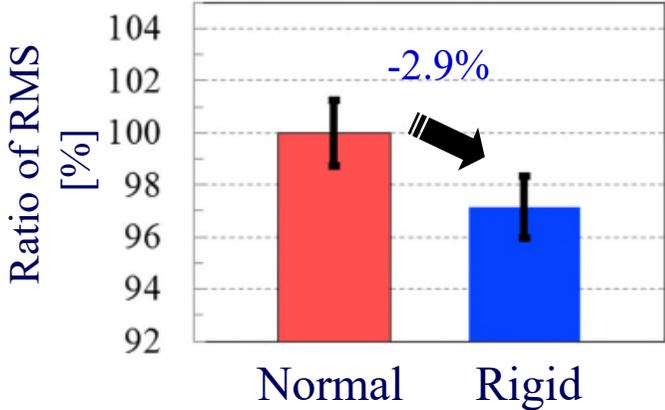
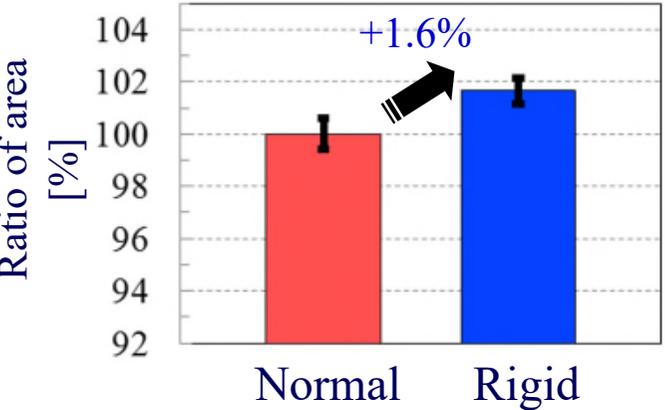
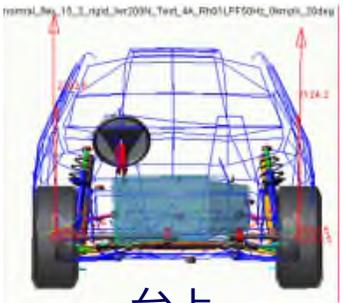
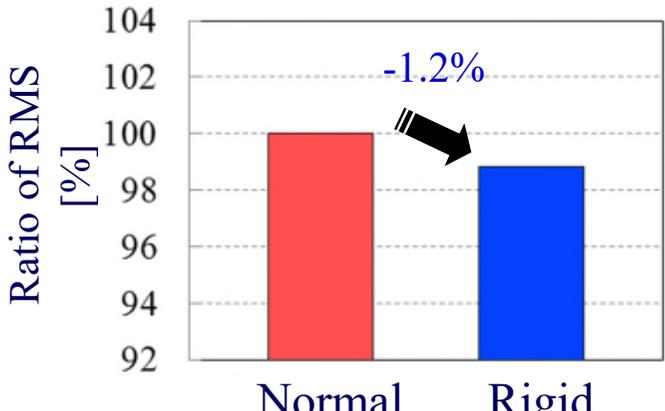
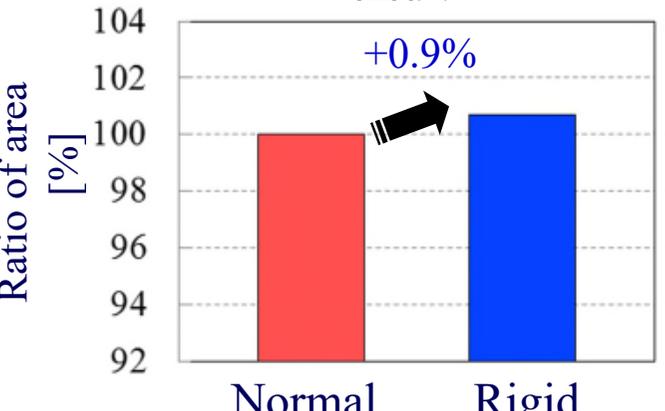
台上シミュレーション : Normal vs Rigid

- 車両モデルは微小だが仕様違いでの台上試験結果の傾向を表現



台上試験と台上シミュレーションの比較

- 台上試験とシミュレーションの着目物理量変化の対応が取れた。

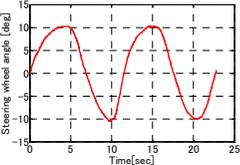
実施項目	バネ下振動上下 	操舵力ヒステリシス幅 												
 <p>台上試験</p>	<p>RMS</p>  <table border="1"> <tr><th>Condition</th><th>Ratio of RMS [%]</th></tr> <tr><td>Normal</td><td>100</td></tr> <tr><td>Rigid</td><td>97.1</td></tr> </table>	Condition	Ratio of RMS [%]	Normal	100	Rigid	97.1	<p>面積</p>  <table border="1"> <tr><th>Condition</th><th>Ratio of area [%]</th></tr> <tr><td>Normal</td><td>100</td></tr> <tr><td>Rigid</td><td>101.6</td></tr> </table>	Condition	Ratio of area [%]	Normal	100	Rigid	101.6
Condition	Ratio of RMS [%]													
Normal	100													
Rigid	97.1													
Condition	Ratio of area [%]													
Normal	100													
Rigid	101.6													
 <p>台上シミュレーション</p>	<p>RMS</p>  <table border="1"> <tr><th>Condition</th><th>Ratio of RMS [%]</th></tr> <tr><td>Normal</td><td>100</td></tr> <tr><td>Rigid</td><td>98.8</td></tr> </table>	Condition	Ratio of RMS [%]	Normal	100	Rigid	98.8	<p>面積</p>  <table border="1"> <tr><th>Condition</th><th>Ratio of area [%]</th></tr> <tr><td>Normal</td><td>100</td></tr> <tr><td>Rigid</td><td>100.9</td></tr> </table>	Condition	Ratio of area [%]	Normal	100	Rigid	100.9
Condition	Ratio of RMS [%]													
Normal	100													
Rigid	98.8													
Condition	Ratio of area [%]													
Normal	100													
Rigid	100.9													

機械学習とCAEによる官能評価のDX適用事例紹介

- はじめに
- 機械学習による走行試験分析
- 高精度シミュレーションモデル開発
- 台上試験による検証
- 台上シミュレーション
- **メカニズム解析**
- まとめ

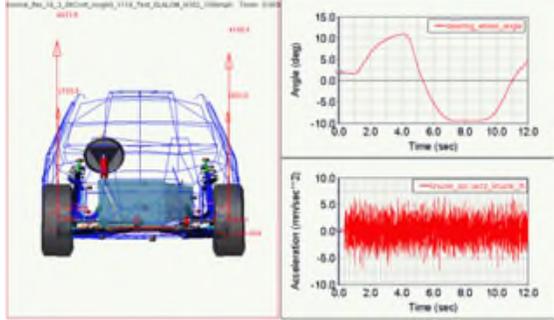
研究のアプローチ

走行試験
Driving experiment
Data analysis



A line graph showing the steering wheel angle in degrees over a 25-second period. The y-axis ranges from -15 to 15 degrees, and the x-axis ranges from 0 to 25 seconds. The curve shows a sinusoidal wave with an amplitude of approximately 10 degrees and a period of about 10 seconds.

走行シミュレーション



A 3D wireframe model of a car chassis with red arrows indicating forces or displacements at the wheels. To the right are two graphs: the top one shows 'Angle (deg)' vs 'Time (sec)' with a sinusoidal wave similar to the driving experiment graph; the bottom one shows 'Acceleration (mm/sec²)' vs 'Time (sec)' with a noisy signal fluctuating around zero.

比較・検証

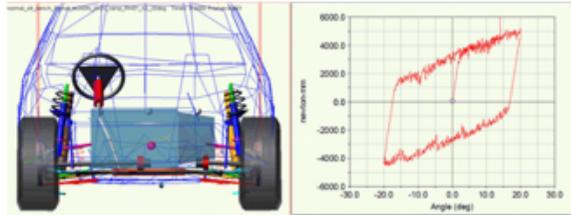
比較・検証

台上試験
Normal vs Rigid



A photograph of a car chassis mounted on a test rig in a laboratory setting.

台上シミュレーション
Normal vs Rigid
Mechanism Analysis



A 3D wireframe model of a car chassis. To the right is a graph showing 'Acceleration (mm/sec²)' vs 'Angle (deg)'. The y-axis ranges from -6000.0 to 6000.0, and the x-axis ranges from -30.0 to 30.0 degrees. The graph shows a non-linear relationship with a hysteresis loop.

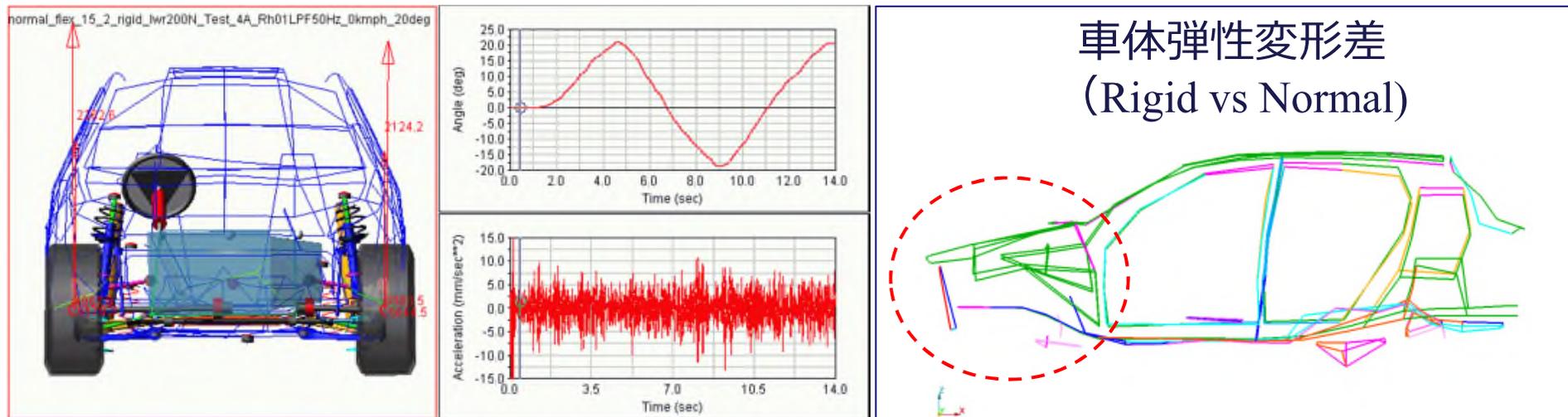
比較・検証

メカニズム解析

仕様差を表す物理量の抽出

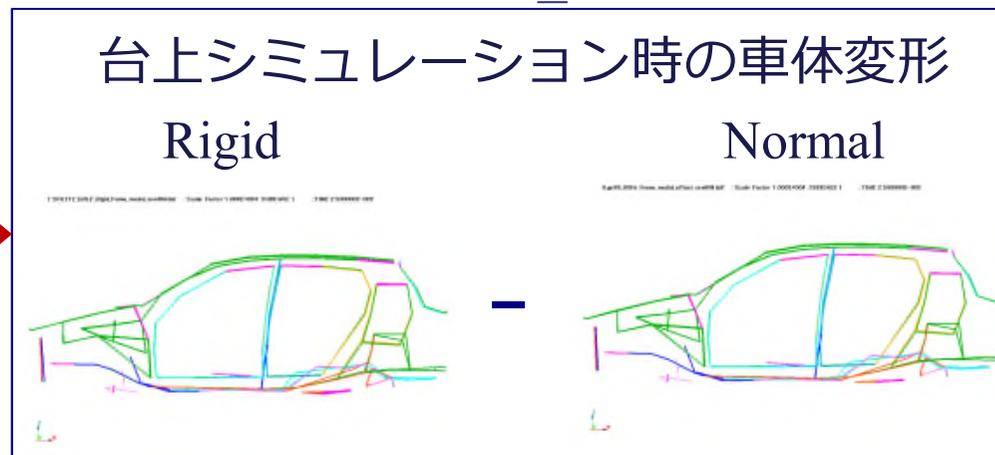
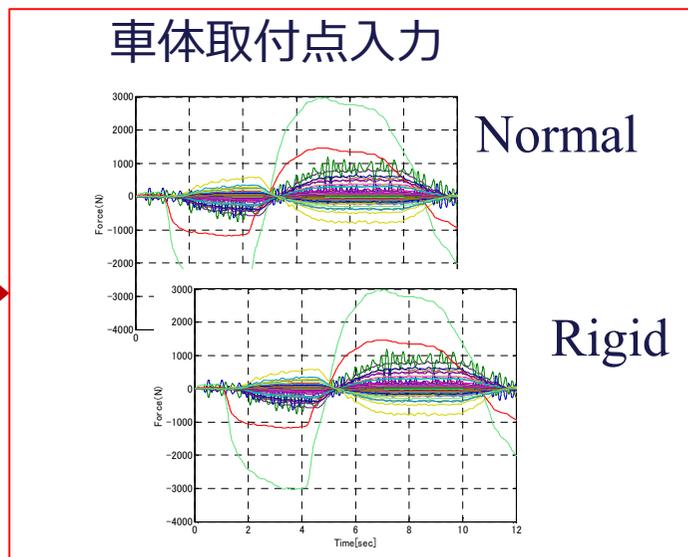
台上試験時の車体弾性変形差 : Normal vs Rigid

- バネ下振動低下の要因は車体弾性変形が収まったためと推定。



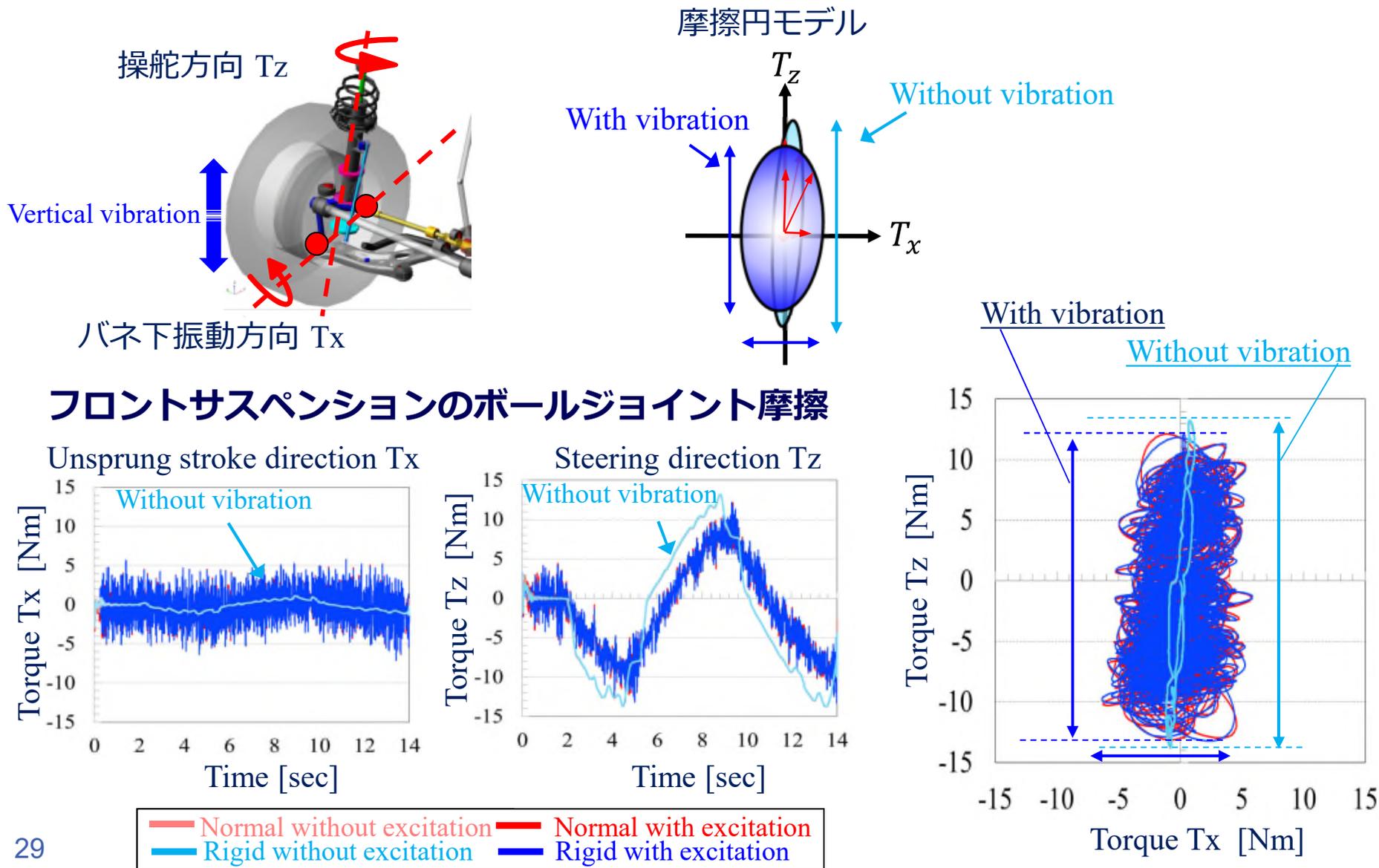
台上シミュレーション時の車体入力抽出

↑ Subtraction



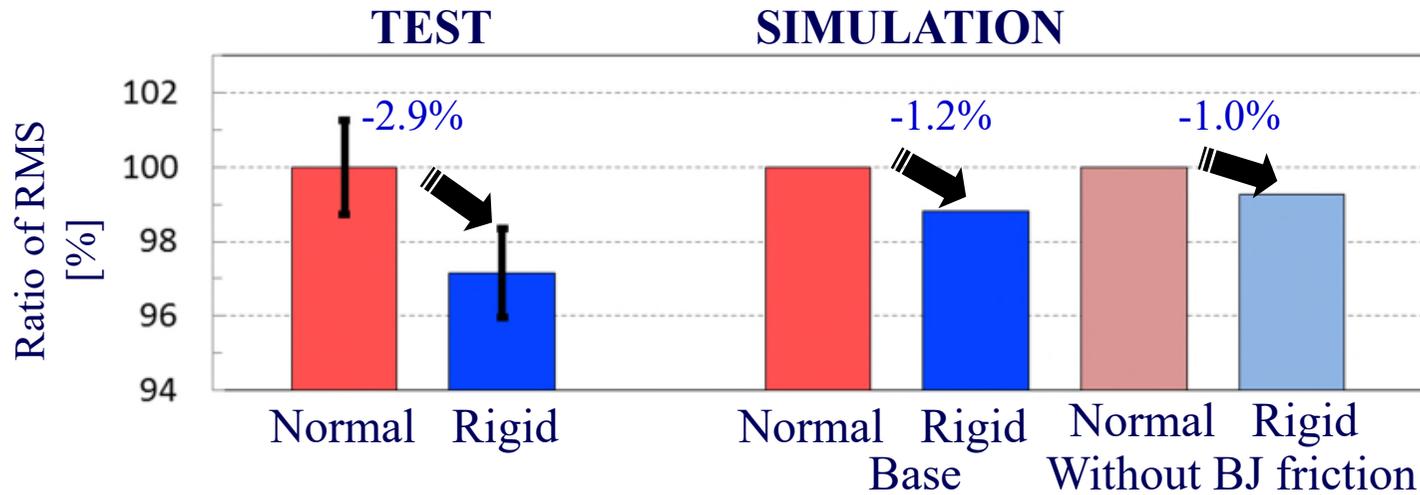
車体補強仕様差の要因：バネ下振動とボールジョイント摩擦

- 操舵ヒステリシス増加はボールジョイント摩擦力変化に起因

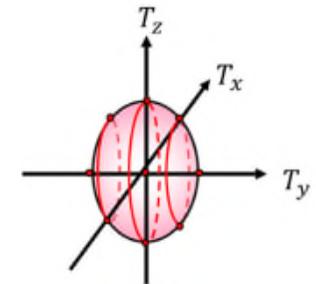


車体補強仕様差の要因：ボールジョイント摩擦

- ボールジョイント摩擦無では実験の傾向を表現できない
バネ下振動の振幅（上下方向）

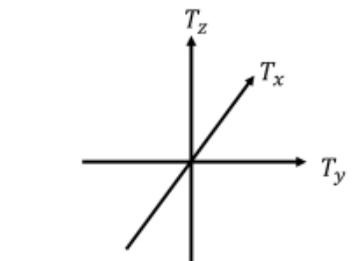
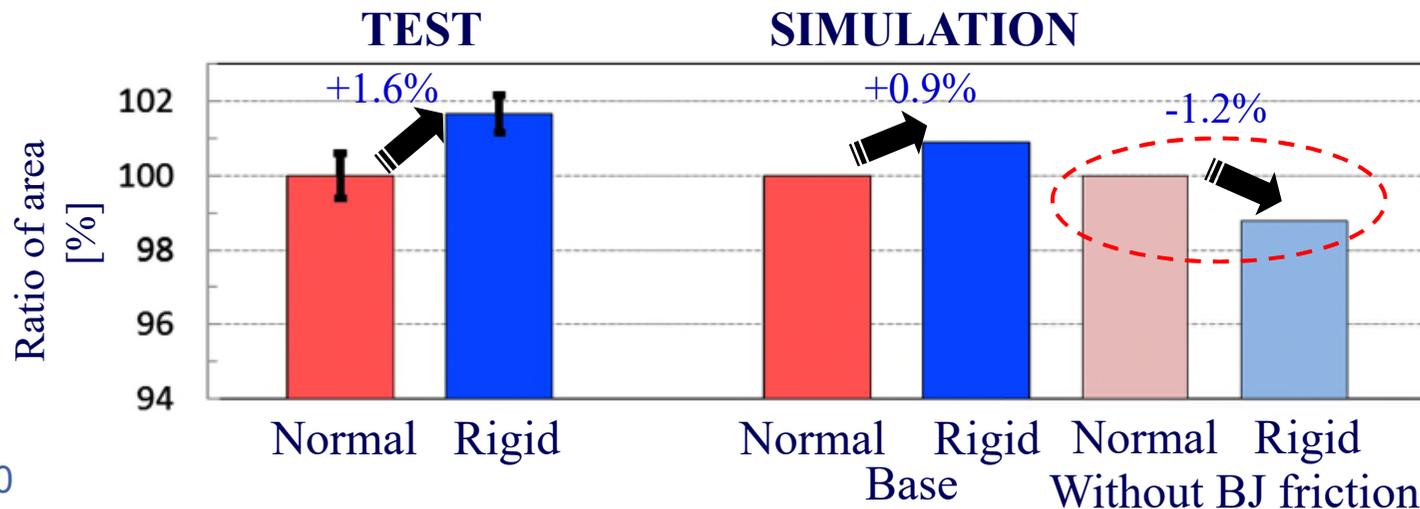


3-Dimensional Friction Circle model



Base

操舵カヒステリシスの幅



$T_x = T_y = T_z = 0$
Without BJ friction

機械学習とCAEによる官能評価のDX適用事例紹介

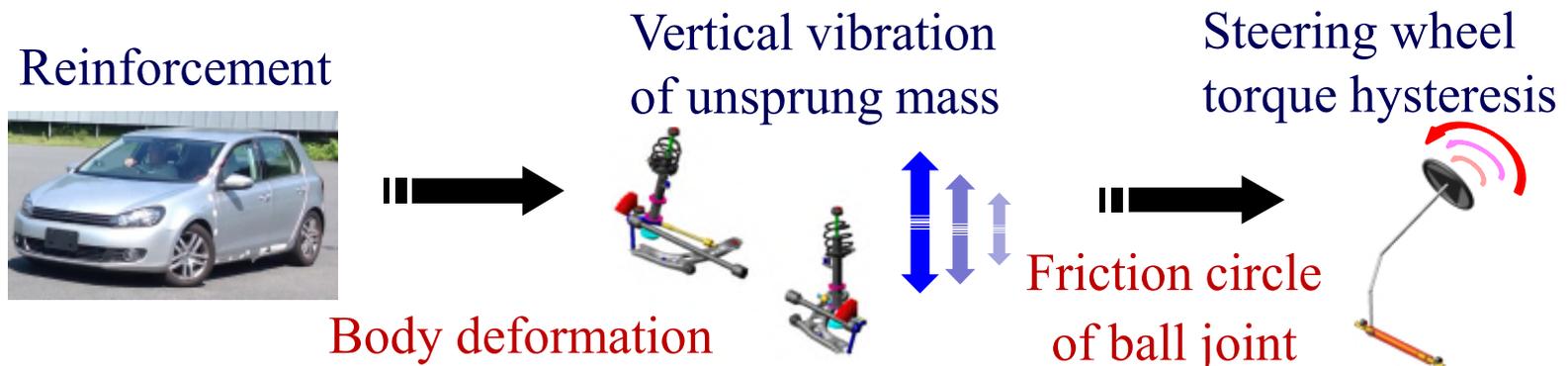
- はじめに
- 機械学習による走行試験分析
- 高精度シミュレーションモデル開発
- 台上試験による検証
- 台上シミュレーション
- メカニズム解析
- **まとめ**

まとめ

- 車体補強が操縦安定性に与える一要因を明らかにできた。

1. 車体変形は車体補強によって抑えられる。
2. 車体変形の抑制が**バネ下振動低減**へとつながる。
3. バネ下振動低減によりボールジョイントの**摩擦球特性**が変化し、**操舵力ヒステリシス幅**が増加する。

- 車体補強の影響を表現できる台上試験&フルビークルモデルを開発した。
- **バネ下振動（路面入力による）**は、台上・走行試験時の操舵特性をシミュレーションするのに重要である。



ご清聴ありがとうございました

