



# A Test of Character for Steering Systems

メカトロニクス HIL テストによる電動ステアリングシステムの  
開発および調整



ラボの条件下で車両のステアリング動作の現実的なテストドライブを行うことは可能でしょうか。もちろん可能です。ただし、それには適切なメカトロニクステスト装置が必要となります。Porsche AGの開発者は、まさにこの手法を使って、初期の開発段階で新しいステアリングシステムの挙動を効率的に最適化することができました。

出典：© Porsche 社

今日の車両のステアリングシステムは、方向を変化させるための単純なコンポーネントとしての位置付けをはるかに超えた重要な存在です。近年のステアリングシステムはサーボモーターや多数のアシストシステムでサポートされており、道路交通におけるドライバーのストレスを取り除くうえで不可欠な要素として安全システムに組み込まれています。カーレースにおいては、ステアリングシステムで勝敗が決する場合があります。このような理由から、Porscheなどのスポーツカーの製造メーカーはステアリングシステムの開発に特に注力しています。開発段階では、ステアリング動作が車輪へすばやくかつ正確に伝えられているかを調査するだけではありません。反対方向に正確に伝達される走行状態の直接的なフィードバックについても調査します。直観的かつ安全な運転操作は、これら2つの要素を組み合わせることにより生み出されます。また、ステアリングシステムは競合他社との差別化を図るために理想的なコンポーネントと言えます。ドライバーが直接体感するのはステアリングシステムだからです。そのため、Porscheのスポーツカーにおける典型的なステアリング感覚である軽快かつ直接的なステアリング動作を実現することは、開発者の仕様

の中でも最上位に位置付けられています。当然、モーターレースで要求されるステアリングトルクやステアリング特性は日常運転向けの設定よりもさらに特殊かつ多彩であり、この場合のピークルダイナミクスは一般車両の限界をはるかに越えるものです。

#### 電気機械式ステアリング

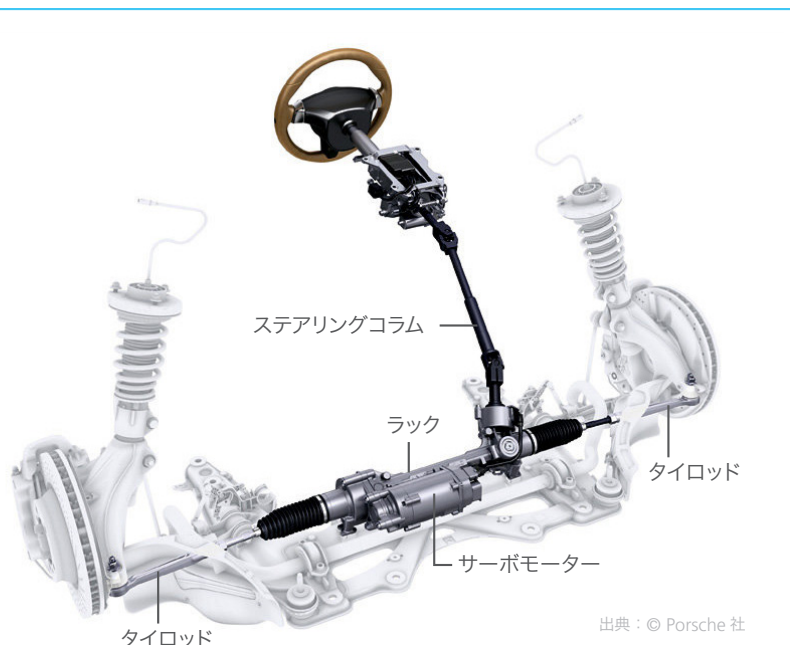
多くの場合、最新の電気機械式ステアリングシステムは、電動パワーステアリング (EPS) システムと呼ばれています (図 1)。このようなシステムでは、サーボモーターによってタイロッドに補助的な力が供給されており、ドライバーが求めるステアリング角を積極的にサポートしています。前世代、すなわち油圧式ステアリングシステムと比較すると、EPS システムはエネルギー消費量をはるかに少なく、しかも制御がより容易です。たとえば、開発者はステアリング機能、快適機能、およびアシスト機能を電子制御ユニット (ECU) に実装して EPS システムに組み込むことができます。EPS システムには速度依存のステアリングサポート、アクティブなステアリング復元機能、レーンキープアシストなども搭載することができます。ただし、EPS システムの欠点は、ドライバーが走行状態について十分なフィードバックを受けることがで

きないという点です。この原因は、アシストユニットの質量イナーシャおよびラックへの伝達によります。そのため、開発者はフィードバック動作を適切に設計することで Porsche のスポーツカーの特徴的な感覚を維持できるようにするという特別な課題に直面します。

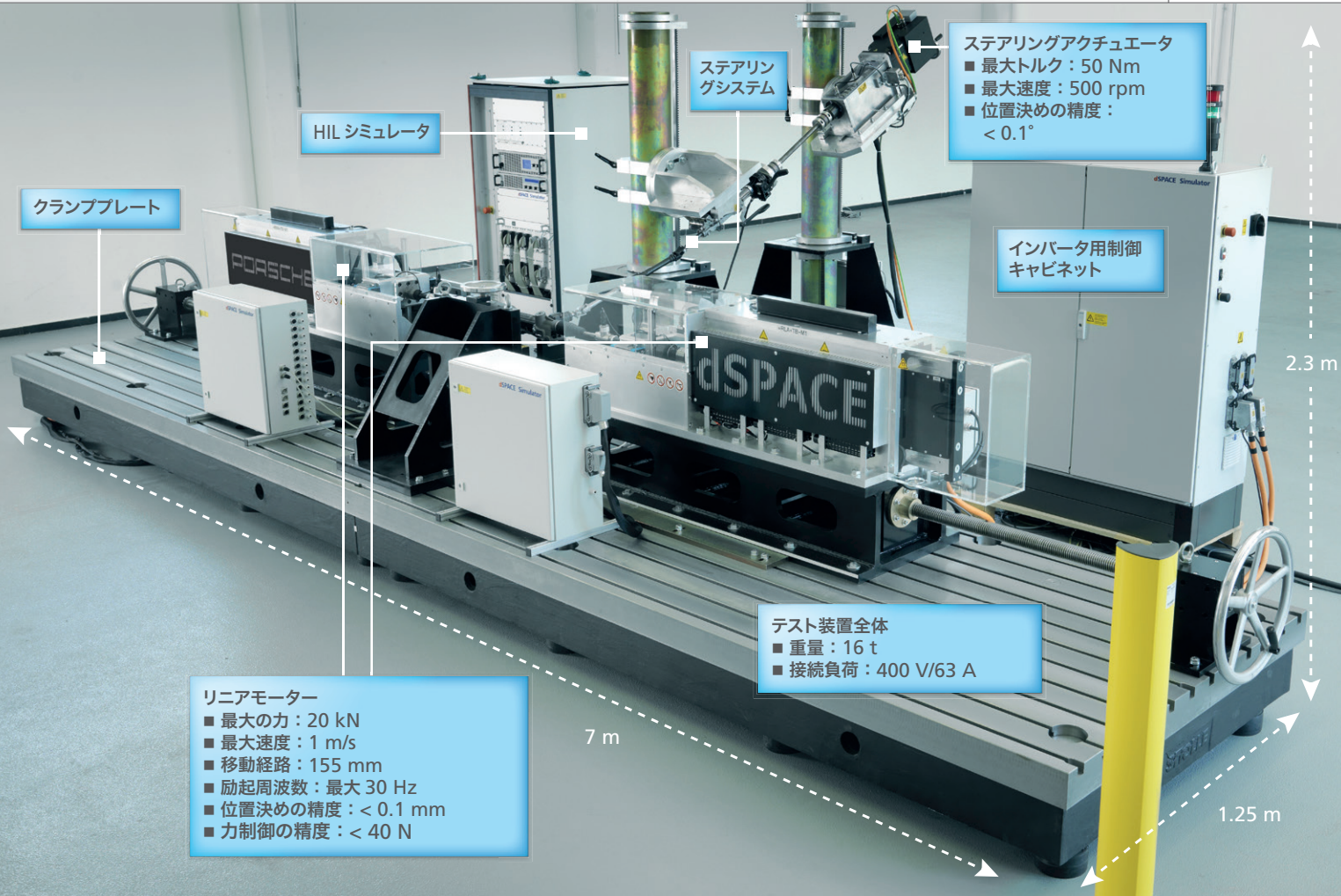
#### ステアリングシステムの妥当性確認

ステアリングシステムは、主観的な快適性や反応動作だけでなく、非常に厳格な要件にも対応する必要があります。ステアリングシステムに故障が発生した場合、車両は危険な運転状況に陥るため、ステアリングシステムはセーフティクリティカルな車両コンポーネントです。このため、機械構造および電子制御の妥当性確認は、最も厳格な安全規格に準拠して行う必要があります。そのうえ、ますます多くのソフトウェアや新たな運転支援システム、リアアクスルステアリングといったオプション機能を搭載したステアリングシステムを開発段階でテストする場合、テストの回数が劇的に増大します。そのため、高度に複雑な要件においても、求められる品質を効率的に提供できる適切な手法が必要となります。この場合、業界で実績のある HIL (Hardware-in-the-Loop) 手法を ECU で使用すれば、テストを再現可能な形式で実行し、テスト範囲を容易に拡張し、さらには個別の事例ごとにテスト深度を調整することができるようになります。このようなテストをシステム全体を対象として行い、それによってコントローラ設計を早期の段階で修正することができれば、開発プロセス全体の効率性が大幅に改善します。このような理由から、Porsche 社では、メカトロニクステスト装置を使用して ECU を含めたステアリングシステムのテストを自社のラボで行っています。このテストでは、適切なアクチュエータを使用してステアリングシステムに機械的にスティミュラス信号を入力しています。これにより、実車でのテストドライブの挙動に非常によく似たシステム挙動を車両のプロトタイプで再現することができます。ステアリングシステムのすべての機械的なインターフェースに合成スティミュラス信号を挿入することも可能です。これはつまり、総合的なテストをテスト装置上で行うことが可能だということです。そのため、Porsche 社の開発者は、たとえば新しい機能のテストや重要なパラメータの特定、およびピークルダ

図 1：電気機械式ステアリングシステムのセットアップ。ステアリングサポート向けのモーターがラックに対して平行に設置され、タイロッドに並進力を加えます。



出典：© Porsche 社



クランププレート

HIL シミュレータ

ステアリングシステム

ステアリングアクチュエータ  
 ■ 最大トルク：50 Nm  
 ■ 最大速度：500 rpm  
 ■ 位置決め精度：  
 < 0.1°

インバータ用制御キャビネット

テスト装置全体  
 ■ 重量：16 t  
 ■ 接続負荷：400 V/63 A

リニアモーター  
 ■ 最大の力：20 kN  
 ■ 最大速度：1 m/s  
 ■ 移動経路：155 mm  
 ■ 励起周波数：最大 30 Hz  
 ■ 位置決め精度：< 0.1 mm  
 ■ 力制御の精度：< 40 N

7 m

2.3 m

1.25 m

図 2: ステアリングシステムテスト装置のセットアップおよび技術データ

イナミクスの限界評価を開発の早期の段階から一切のリスクを伴わずに行うことができます。また、これにより企業にとって貴重なノウハウも積み上げられます。

**テスト装置の柔軟なセットアップ**

Porsche 社が dSPACE と協力して開発したステアリングテスト装置は、ステアリングコラム、サーボモーター、ラック、タイロッドを含むステアリングシステム全体をテストできるように設計されています (図 2)。この装置で特徴的なのは、個々のコンポーネントを配置するためのさまざまな目盛りの付いた調節可能なクランププレートです。また、ステアリングシステムとテスト装置の間でエネルギーおよび信号を伝達するためのインターフェースも存在します。これらにより、テスト装置では極めて高い柔軟性が実現しています。そのため、ステアリングシステムごとにテスト装置を完全に適合させることができるだけでなく、テスト装置のセットアップも極めて短時間で済むため、効率的な運用が可能になります。

**効率性の高い Electric Drive**

テスト装置の中心部は動的な特性を持つ Electric Drive であり、ステアリングシステムを機械的にスティミュレートする 2 つのリニアモーターで構成されています。Electric Drive では、実車においてホイールから 2 本のタイロッドに伝えられる力をシミュレートします。ステアリング角は、ステアリングコラムの反対側にあるステアリングアクチュエータ (モーター) により動的に設定されるため、ドライバーの操作を容易に再現することができます。2 つのリニアモーターおよびステアリングアクチュエータへの電力は、制御されたドライブインバータにより供給されます。リニアモーターの制御装置は、大きな力と精度の高い分解能を再現できるように設計されています。また、すべてのモーターのインバータは、共通化した電圧 DC リンクによって接続されています。DC リンクには、電力系統からの電力がアクティブなフィードインユニットを介して供給されます。インバータは連結式のため、ここで考慮すべ

き事項はテスト装置の電流喪失のみです。回路内では、電力の大部分は流れを継続します。そのため、このステアリングテスト装置のエネルギー効率、Porsche 社がこれまで使用してきた油圧式テスト装置と比べてはるかに高くなっています。外部電源に使用できるのは、標準的な 3 相プラグ (63 A) のみです。冷却剤や圧縮空気など、その他の資材は必要ありません。

**シミュレータのセットアップと機能**

モーターの制御やテスト装置のモニタリング、測定データの取得はすべて dSPACE HIL シミュレータで行われます。シミュレータにはリアルタイムプロセッサ、必要な I/O、および適切なシグナルコンディショニングが含まれています。ドライブインバータは LTi Motion TWINsync プロトコルで制御されており、125 μs 間隔で確実に目標値がインバータへと送信されます。この制御コンセプトにより、石畳の道路での高速運転に相当する最大 30 Hz の極めて動的なスティミュラス信号の場

>>



図3：テスト装置のコンポーネント、信号、アクチュエータ、およびセンサ

合でも高い精度を実現することが可能になっています。また、HILシステムはレシトバスシミュレーションにも対応しており、ステアリングのタイプに応じてCANまたはFlexRayのいずれかを使用することができます。dSPACE Automotive Simulation Models (ASM) ツールスイートを使用すると、車両のピークルダイナミクスをリアルタイムでシミュレートすることも可能です。また、ASM Vehicle Dynamics Modelに実際のステアリングシステムを接続すれば、クローズドループ動作を実行できます(図3)。Porsche社のさまざまな車種をパラメータ化する場合は、dSPACE ModelDeskのGUIを使用します。さらに、ソフトウェアを使用して仮想テストドライブ用の道路や運転操作を定義することも可能です。車両の挙動を直ちにビジュアル表示したい場合は、3DアニメーションソフトウェアであるdSPACE MotionDeskを使用します(図4)。テスト装置の制御には、試験および計測用ソフトウェアであるdSPACE ControlDeskを使用します。テストシーケンスを自動化したい場合は、テストオートメーションソフトウェアであるdSPACE AutomationDeskを使用します。これにより、利便性の向上が実現します。

#### EPS テストの部品

Porsche社では、ステアリングテスト装置を使用してステアリングの機械的パラメータを特定し、ステアリングシステムのトラ

ンスミッション挙動を解析しています。ステアリングシステムのサプライヤが機械的な要件をどのように実装したのかを理解する場合、テストを実施してパラメータを特定します。また、同一の部品を使用して計測を繰り返し行うことにより、部品の耐久性に関する情報も得られます。テストにより特定できるのは次のパラメータです。

- ピニオン角とラック動作との間のトランスミッション挙動
- モーター角とラック動作との間のトランスミッション挙動
- ステアリングロッド(トーションバーおよびステアリングコラム)の剛性
- モータートランスミッション(ベルトドライブおよびボールねじ)の剛性
- ステアリングボックスおよびステアリングコラムの摩擦
- モーターラックアップテーブル(性能、電力消費、および効率性)

Porsche社では、AutomationDeskを使用することにより、計測シーケンスの自動化を容易に実現しています。たとえば、ステアリングボックスとステアリングコラムにおける摩擦の特定やモーターラックアップテーブルの特定では、それぞれ異なる計測手段が必要となりますが、Porsche社では計測シーケンスの自動化で対応しています。また、ステアリングロッドの剛性を特定する場合、トルク制御された三角波信号をステアリングアクチュエー

タから発信するテストを自動的に実行します。剛性は、「ステアリングホイールのトルク」 $M_L$ および「ステアリングホイールの角度」 $\delta_L$ という計測された変数から求めることができます(図5、[E1](#))。サーボモーターの属性は、電動パワーステアリングシステムのトランスミッション挙動を解析することで特定できます。この属性を使用すると、サーボモーターがさまざまなステイミュラス信号の周波数に対するアシスト要件をどこまで達成しているかを調査することができます。また、ステアリングシステムのフィードバック挙動を解析することも可能です。開発者は主にステアリングコントローラソフトウェアを使用してステアリングシステムを操作しながら、Porscheのスポーツカーで求められる感覚に適合するようにステアリングシステムを設計していきます。ラックに加わる力からトーションバーのトルクに伝えられるトランスミッション挙動を解析する場合、さまざまな周波数が使用されています。トランスミッションの解析基準は次の通りです。

- モーターのトルクからラックに加わる力に対するトランスミッション挙動
- ラックの力からトーションバーのトルクに伝えられるトランスミッション挙動

図5([4](#)、[5](#))は、ラックに対するステイミュラス信号がトーションバートのトルクの反応として表れた様子を示しています。「パッシブ」曲線は、EPSによるアシストのない完

全に機械的なステアリングシステムのトランスミッション挙動を示しています。「アクティブ」曲線は、EPSによりアシストされたステアリングシステムの挙動を示しています。「アクティブ」曲線は「パッシブ」曲線に比べ、振幅が明らかに低くなっています。これは、ステアリングシステムのアシスト機能により、ドライバーが手動で加える必要のあるトルクが快適なレベルにまで低下しているためです。曲線 #1 および #2 が大部分で合致しているという事実からも、dSPACE のステアリングテスト装置により高い再現性で計測が行われていることが分かります。

#### システム全体の挙動をテスト

テスト装置には、システム全体の挙動を解

析できるようにするための 2 つの手法が提供されています。1 つ目は、テストを開始する前に、テストドライブでの計測値などに基づいてあらかじめ設定された信号をテストベクトルとしてテスト装置に入力する手法です。この手法の利点は、テストベクトルの記録が 1 度で済み、何度でも再利用できることにあります。そのため、異なるソフトウェアの状態を解析する場合に、再度実車で運転操作を行う必要がありません。2 つ目は、ASM Vehicle Dynamics Model を使用して、システム全体（つまり、車両）に組み込まれた状態でのステアリングシステムの挙動を解析する手法です。これを実行するには、Porsche 社のテスト対象車のデータに基づいて ASM Vehicle Dynamics Model をパラメータ

化する必要がありますが、ModelDesk を使用すれば、さまざまな運転状況を定義することが可能です。開発者は、進路トポロジや路面の摩擦属性など、複数の変数を修正することができます。このように、テストベクトルを使用したり、ASM Vehicle Dynamics によるシミュレーションを行ったりすることで、実車でのテストドライブと同様のシステム解析を行うことができます。ここまで優れた再現性と高い精度でテストを行える主な理由の 1 つは、テストを行う際にドライバーや環境的な要因を排除できることにあります（図 6）。

#### プロジェクトの進行と調整

Porsche 社は、見積り段階での最初の話し合いからテスト装置の試運転や最終

>>

「dSPACE のメカトロニクステスト装置は、極めて要件の厳しい Porsche ステアリングシステムの開発環境に完全に融合できるほど高度に動的であるため、当社にとって重要な開発ツールとなっています」

Anton Uselmann 氏、Porsche AG 社

図 4：テスト制御用の ControlDesk (左) と運転操作をビジュアル表示する MotionDesk (右) を搭載したオペレータ用ワークステーションを含むメカトロニクステスト装置



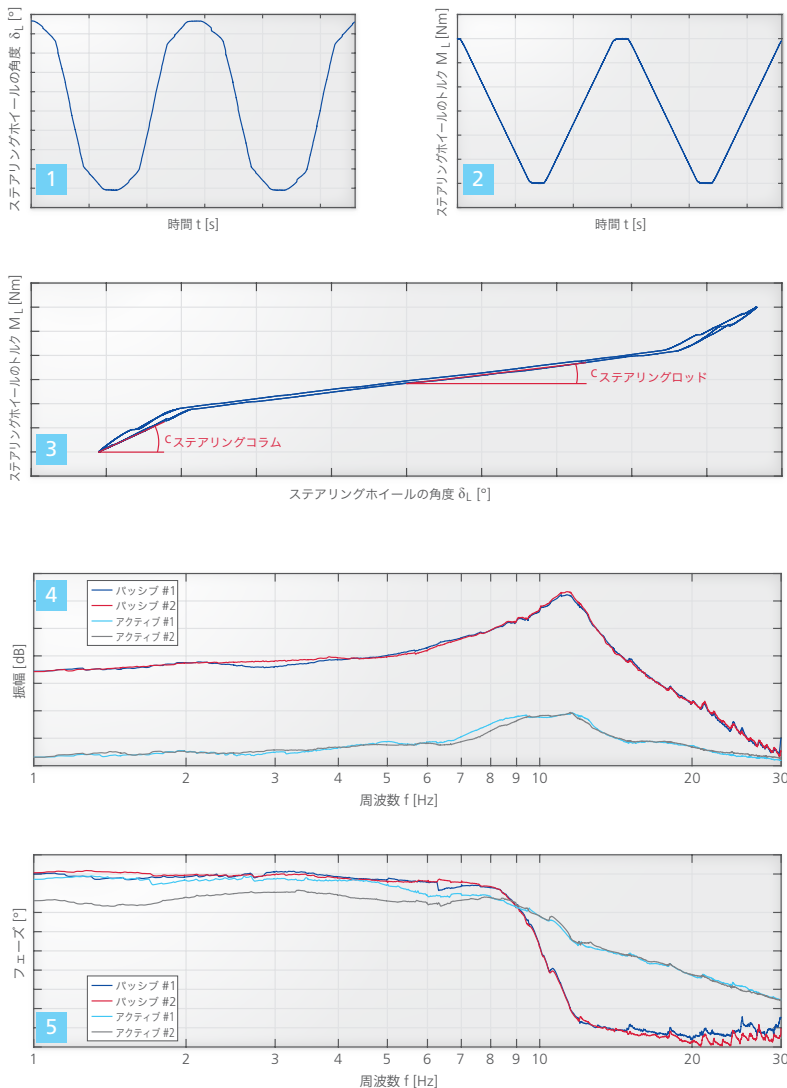


図5：ステアリングホイールのテストで記録されたさまざまな計測値

1、2：ステアリングホイールの角度を  $\delta_L$ 、ステアリングホイールのトルクを  $M_L$  とした場合の時間  $t$  に対するステアリングロッドのスティミュレーション

3：ステアリングロッドの剛性は、ステアリングホイールの角度  $\delta_L$  に対するステアリングホイールのトルク  $M_L$  の傾きから求めることができます。

4、5：ステアリングシステムに純粋な機械式トランスミッション（パッシブ）を使用した場合とアシストユニットによるサポート（アクティブ）を使用した場合におけるトランスミッション挙動。曲線 #1 および #2 から、dSPACE のステアリングテスト装置により高い再現性で計測が行われていることが分かります。

チェックまでに及ぶプロジェクト全体を通じて、dSPACE の担当者と緊密に連携しました。プロジェクトの第 1 段階は、Porsche 社の要件に従ってテスト装置向けのセットアップを作成することでした。これは機械的セットアップの 3D モデルに基づいて作成され、複数の段階で修正が行われました。たとえば、テスト装置の固有周波数が計画上のすべてのシナリオに確実に適合する範囲内で、構造物に関する計測値を設定する（つまり、励起周波数の範囲外にする）といった修正を行ったり、リニアモーターのローターを最適化して、要求される高度なダイナミクスに対応できるようにするといった修正を行いました。また、Porsche 社は、dSPACE と定期的に電話会議を行ったり、ヴァイツハの Porsche 開発センターおよびバーダーポルンの dSPACE 本社双方で現地会合を開いたりすることを本プロジェクトの不可欠な要素として位置付けました。これらにより、プロジェクトの進行において常に高い透明性が確保され、テスト装置は予定通りの期日で納品および配備されました。Porsche 社では、テスト装置全体を単一のベンダーから入手し、ターンキーシステムとして受け取ることができたため、付帯的な調整コストやサードパーティベンダーとの連絡といった問題は一切ありませんでした。

#### まとめと今後の展望

Porsche 社では、ステアリングテスト装置を活用することで、テストの柔軟性を向上させ、高い精度でテストを再現できるようになった結果、ステアリングシステムの開発および妥当性確認のさらなる効率化を達成することができました。dSPACE とはプロジェクトの完了後も緊密な連携を継続しており、現在、dSPACE ではステアリングテスト装置で使用する制御アルゴリズムの一層の最適化に取り組んでいます。次

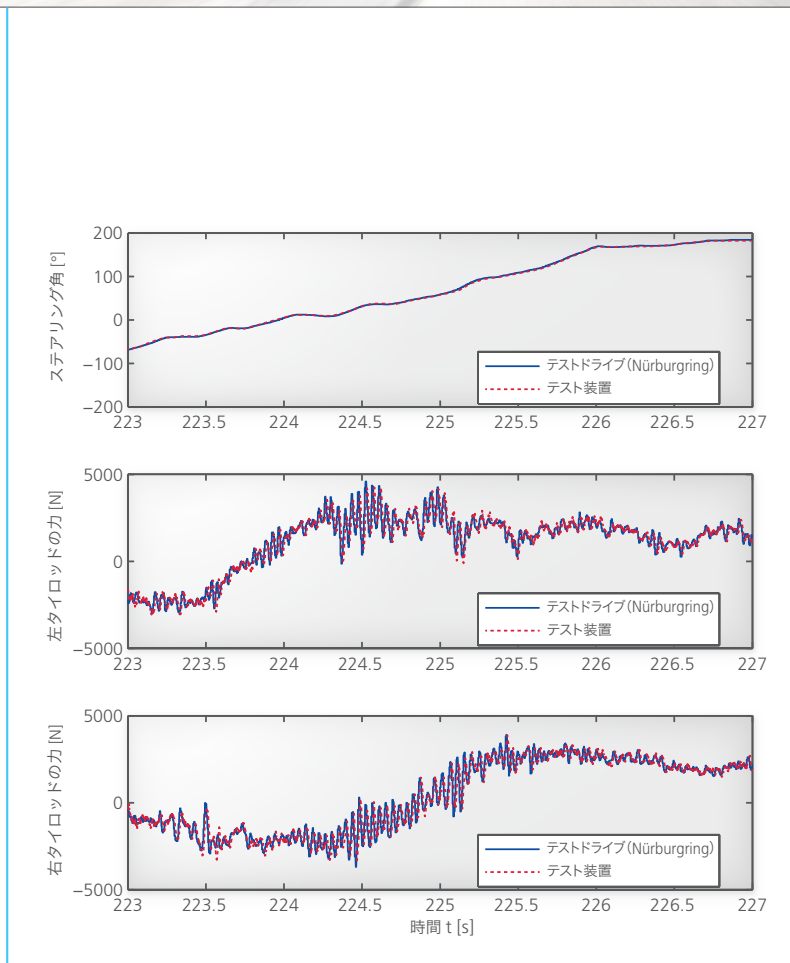


図6：Nürburgring レース場での実車によるテストドライブで記録された、ステアリング角と対応するタイロッドの力を示す計測データ（青）およびステアリングテスト装置での計測値（赤）

「当社では、リアルタイムシミュレーションモデルである ASM Vehicle Dynamics を使用して、バーチャルビークルにおけるステアリングシステムの実動作を解析しています」

Benedikt Schrage 氏、Porsche AG 社

のフェーズでは、両社はテスト装置にリアアクスルステアリングシステムを統合する予定であり、ステアパイワイヤアーキテクチャを組み込むプロジェクトも発生する可能性があります。さらには、Porsche 社はテスト対象ユニット向けの温度室の統合

を計画中であり、必要なインターフェースは HIL シミュレータ上には既に搭載されています。

Anton Uselmann 氏、Eric Preising 氏、Benedikt Schrage 氏、Dario Dusterloh 氏、Porsche AG



テスト装置の詳細な動作については、次のサイトの動画をご覧ください：  
[www.dspace.jp/go/dMag\\_20162\\_mHIL\\_E](http://www.dspace.jp/go/dMag_20162_mHIL_E)

Anton Uselmann 氏  
 ステアリングシステム機能開発責任者、Porsche AG 社（ドイツ、ヴァイサッハ）



Eric Preising 氏  
 テストベイにおけるシャシーテストベンチ担当エキスパート、Porsche AG 社（ドイツ、ヴァイサッハ）



Benedikt Schrage 氏  
 シャシーテストベンチのテストエンジニア兼ステアリングテスト装置責任者、Porsche AG 社（ドイツ、ヴァイサッハ）



Dario Dusterloh 氏  
 ステアリングシステムの開発プロセスにおける機能最適化および複雑性管理の研究者、博士論文提出資格者、Porsche Ag 社（ドイツ、ヴァイサッハ）

