

## EPSシステム解析技術の開発

## Development of Simulation Technology for EPS System

北村 佳彬

KITAMURA Yoshiaki

## 要 旨

自動車用パワーステアリングは、運転者の操舵をアシストする機構を備えた装置であり、特に本報で対象とする電動パワーステアリング（以下EPS）は、モータを電気制御することでアシスト力を付加するものである。

近年、自動車の快適性向上の要求が高まる中、EPSにおいてはより良い操舵フィーリングを提供することが重要となる。多くの機械部品で構成されるEPSの操舵フィーリングは、その動力伝達系で生じる摩擦抵抗等の特性と密接に関わる。このため、操舵フィーリングの向上を図るためには、その発生メカニズムを明確化し、そしてコントロール（設計）する技術が必要である。

そこで、種々のEPS特性を設計段階で予測可能とするため、1D-CAEツールを用いたEPSシステムモデルを開発した。特にEPS特性を司る機械伝達系において、性能寄与度の高いウォームギヤやラック&ピニオン（以下R&P）といった構成要素については、3D-FEM解析も用いてメカニズムを解明し、1Dモデルの高精度化を実施した。最終的に、各構成要素の挙動を観測可能な実機計測装置を構築し、実現象との比較によりモデルの妥当性を確認した。また、機械伝達系モデルと制御モデルとを連成することで、実使用条件下でも高精度な操舵特性予測が可能な設計ツールとしての有用性も確認した。

今後、本モデルを活用することで、求められるEPS性能に対し、最適な設計が可能となる。

## Abstract

The power steering in a vehicle can assist drivers behind a wheel. Electric Power Steering (EPS) focused in this article, in particular, has an electrical controlled motor.

In these days, it is more important that the EPS contributes to get a better steering feel, because comfortability of driving vehicles is required. Steering feel has close relationship to characteristics of power train of EPS, e.g., mechanical friction, composed of many mechanical components. Thus, the design method which can analyze and control characteristics of EPS is needed, in order to improve a steering feel.

An analysis model of EPS as mechanical powertrain, thus, has been developed by means of the 1D-CAE method, which can predict the characteristics of EPS at the beginning of design. In particular, the 3D-FEM analysis for worm gear and rack and pinion (R&P), which have close relationship to characteristics of EPS, can help to clarify dynamics of these components and to predict performances precisely. Finally, we developed an actual machine measurement device which is able to observe dynamics of components, and verified the model by comparing with experimental results. And then, we verified that the model of mechanical powertrain coupled with electrical control model can precisely predict the performances of EPS under actual conditions in a vehicle.

This analytical model will be able to contribute the optimal design for high performance EPS.

## 1 緒言

ステアリングは、自動車の基本機能の1つである「任意の方向に曲がる」ための舵取り装置である。車が曲がるためにはタイヤの向きを変える力、即ちタイヤ接地面の抵抗力に勝る力が必要であるが、ドライバーがステアリングホイールを回す力だけでは困難なため、油圧や電動モータによるアシスト力を付加させている。

このうちEPSは、長年市場の主力であった油圧式に比べ、電子制御による操舵性能のコントロール性の高さに加えて、燃費軽減にも貢献できる等の理由から、需要は今なお増加傾向にある。

EPSの構成例（ピニオンアシスト方式）を図1に示す。ステアリングホイールからの入力をトルクセンサが検知し、その値に応じてアシストモータがトルクを発生させる。このアシストトルクは減速機（ウォームギヤ）を介して入力トルクに付与され、その合力がR&Pを介してラックの推力に変換されることで、タイヤに旋回方向へ曲がるための力が伝達される。

このように、EPSは多くの部品で動力を伝達しているため、部品間の相対運動（摺動）や軸受の回転抵抗といった内部摩擦が介在している。

近年の自動車においては、乗り心地や操縦快適性が追及されており、EPSもより良い操舵フィーリングを提供することが重要となる。ここで、操舵フィーリングは上述した摩擦等の力学的伝達特性と密接に関わるため、その発生メカニズムを明確にする必要がある。そして、最適な設計をする上では、そのメカニズムをコントロールできる技術が必要となる。

そこで、今回は設計段階でEPSの性能をシミュレーション可能とするため、その有効な手段の一つとしてモデルベース開発（以下MBD）の要素技術を開発した。なお、本技術では、摩擦損失が大きく性能寄与度が高いウォームギヤやR&Pといった歯車による伝達要素について、3D-FEM解析を併用して詳細なメカニズムを解析することで、モデルの高精度化を図った。本報では一例として、ピニオンアシスト方式を対象に開発技術について解説する。

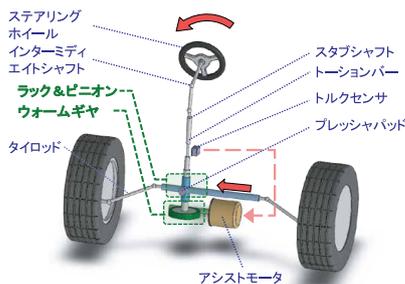


図1 EPS構成例（ピニオンアシスト方式）

## 2 EPS機械伝達系基礎モデル

### 2.1 モデル概要

モデル化の対象は、図1におけるステアリングホイールから、タイヤに推力を与えるタイロッド間にある図2のような各構成要素とした。

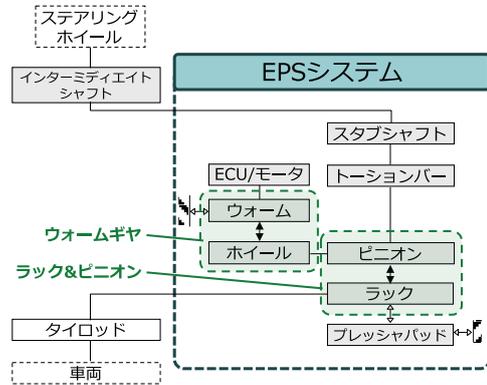


図2 EPS物理モデル図

### 2.2 機械伝達系基礎モデル

EPS機械伝達系のモデリングツールとして、1D-CAEツールであるSimulationX（ESI ITI社）を採用した。本ツールは、制御モデルで広く採用されているMATLAB/Simulink（Mathworks社）との連携が容易であり、MBDモデリングツールとして一般に多用される物理モデリング言語Modelicaに準拠している。

SimulationXを用いて、EPS機械伝達系の基本要素のみをモデル化した基礎モデルを図3に示す。各要素のパラメータとして、慣性モーメントや質量、剛性等を設定した。なお、本基礎モデルではウォームギヤやR&Pには標準ライブラリを利用しており、ここでは歯車の歯当たり起因するトルクの変動といった詳細な特性は考慮していない。

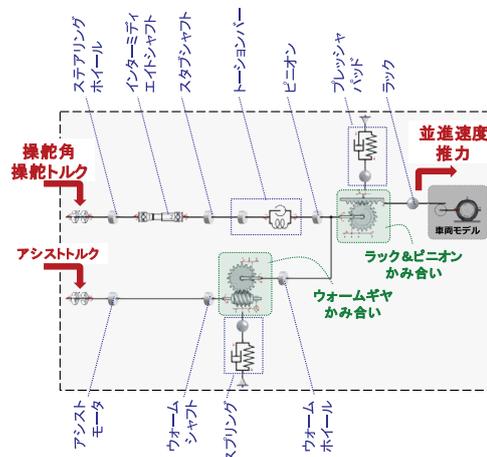


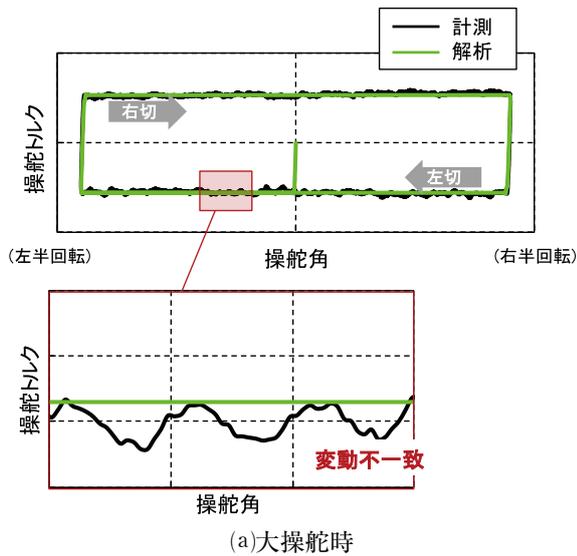
図3 EPS機械伝達系（基礎モデル）

### 2.3 解析結果

まずは一般的なEPSの特性として、ステアリングホイールを右切／左切と繰り返したときの操舵角-操舵トルクの関係（以下、操舵特性）を評価する。

解析条件の一例として、EPS単品でモータアシスト制御をOFFとしたときの解析結果と実機計測結果との比較を図4に示す。波形全体としては、解析結果は計測結果と相似しているが、(a)図のように大きく操舵した（以下、大操舵）時の計測で見られる操舵トルクの変動が表現できていない。また、(b)図の微小な操舵（以下、微操舵）時におけるトルクの立ち上がりも、滑らかに変化する計測に対し、不連続な解析結果といった傾向の不一致がみられた。

以上のように、基礎モデルでは実現象を正確には再現できておらず、モデルの改良が必要であることがわかる。そこで、主要因と考えられるウォームギヤ、R&Pのモデル改良について次章以降に述べる。



(a)大操舵時

(b)微操舵時

図4 操舵角-操舵トルク特性

基礎モデルにおける歯車要素だけでは、トルクの変動特性が考慮できていなかった。そこで、3次元的に変化するギヤの噛み合い特性が考慮可能な3D-FEM解析との連成によって課題の解決を図ることとした。

ウォームギヤの噛み合い解析には、非線形接触解析が可能な汎用FEMソフトを使用した。図5に解析モデルを示す。ここで、ノンバックラッシ機構（以下NBL機構）とは、歯車の噛み合いを良好に保ち円滑な動力伝達を維持するシステムである<sup>1)</sup>。

入力軸およびホイールの芯金はビーム要素とした。境界条件としては、ホイール3方向およびシャフト軸方向には軸受を想定したガタを与え、その他NBL機構部のスプリング押し付け方向以外は全て拘束した。接触面をシャフト／ホイール歯面に設定し、摺動部はクーロン摩擦とした。材料物性値として、ピニオンおよびシャフトは鋼相当、ホイールは弾性体とし、ホイールの芯金は剛体要素とした。

以上の条件設定を行い、入力としてホイールに強制回転を与えた時の反力トルクを出力した。

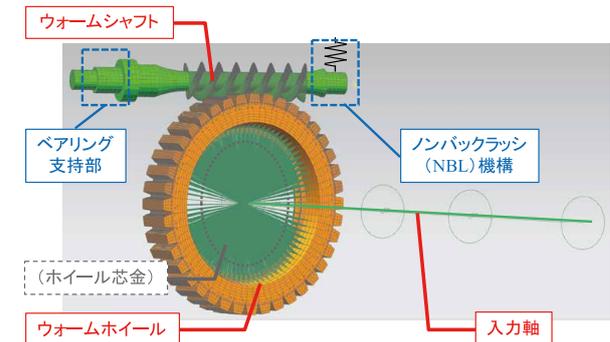


図5 ウォームギヤFEMモデル

### 3.2 ウォームギヤ噛み合い解析結果

操舵トルクの変動とウォームギヤの噛み合い特性との関係を検証するため、トルク変動の振幅値とウォームギヤの設計パラメータとの要因分析を実施した。設計パラメータは、トルク変動に影響すると考えられる7つの因子（A～G）を定義し、各設計値を2水準としたL16直交表に割り付けることで、実験計画法に基づいた分析を実施した。

分析結果として、トルク振幅について図6に示す要因効果図が得られた。一例として、因子Aは2水準間でトルク振幅に大きな差があるため、パラメータ変更に対する振幅への影響が大きいことが示された。このように、赤枠の3つの因子はいずれも、歯車の噛み合い抵抗変化と関係が深く、トルク振幅とも有意な関係性を持つパラメータであることも確認できた。

## 3 ウォームギヤモデルの検討

### 3.1 FEM解析モデル

ウォームギヤに関し、1D-CAEツールで作成した

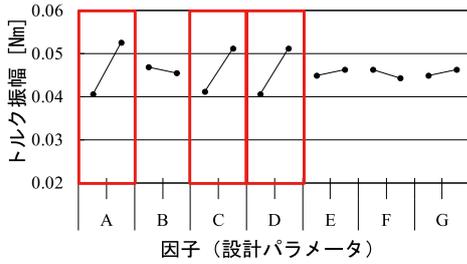


図6 要因効果図

### 3.3 1Dウォームギヤモデルの改良

以上の解析結果を踏まえ、図3で示した基礎モデルのウォームギヤモデルを図7のように変更した。前述したNBL機構の実挙動を再現できるように、ウォームギヤの噛み合い抵抗変化に影響のある設計パラメータをモデルに追加した。これにより、3D-FEMモデルを1Dに落とし込む（縮退化）ことができた。

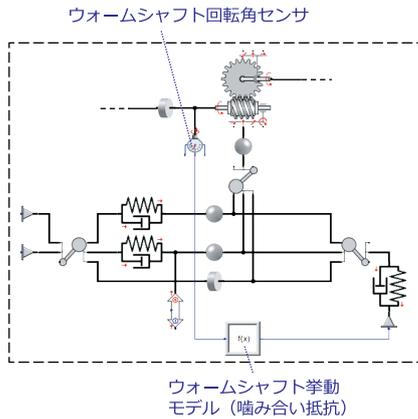


図7 改良後のウォームギヤモデル

1Dウォームギヤモデル改良後の解析結果を図8に示す。図6の要因分析で有意であった因子の設計値（水準）を小さくした条件ではトルク変動が殆ど無く、一方でトルク振幅が大きくなる水準の場合には、振幅や周期が実験値と比較的良好に一致する波形が得られた。この結果から、改良後の1Dウォームギヤモデルの妥当性が検証できた。

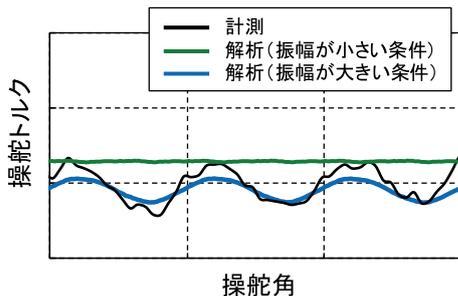


図8 ウォームギヤ改良効果

## 4 ラック & ピニオンモデルの検討

### 4.1 FEM解析モデル

前章ではウォームギヤを検討したが、ここではR&P機構について述べる。R&Pには図9のように、ラックの支持部品であるプレッシャパッド<sup>1)</sup>を介した、ウォームギヤと同様なNBL機構が組み込まれている。プレッシャパッドには機能上、ハウジングとの間にクリアランスが設けてあるが、基礎モデルではプレッシャパッドにはラック支持方向にのみ自由度を与えており、クリアランスによる径方向挙動の影響を考慮していなかった。そこでウォームギヤと同様に、ギヤ噛み合い特性に加え、プレッシャパッド挙動も考慮した3D-FEMとの連成を行った。

また、R&P噛み合い解析にも汎用のFEMソフトを使用した。図10に解析モデルを示す。ピニオン・ラックおよびプレッシャパッドは、それぞれ軸心とするビーム要素に剛体の接触面を結合した。

境界条件としては、ピニオンは軸回転以外を拘束し、ラックはプレッシャパッドとブッシュの面接触により支持した。そして、プレッシャパッドの径方向はクリアランス分のガタを付与し、線形ばね要素で拘束した。また、接触面の摺動には、同様にクーロン摩擦を設定した。

以上の条件設定を行い、ピニオン軸心への強制回転を入力として、反力トルクを出力した。

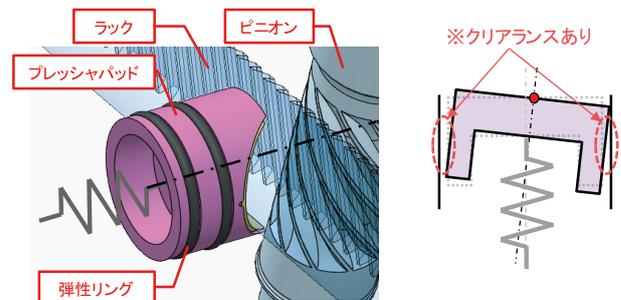


図9 プレッシャパッド詳細

### 4.2 R&P噛み合い解析結果

FEM解析の結果、R&Pのトルク伝達特性（操舵特性）は図11のように、プレッシャパッド径方向のクリアランスの有無によって、左右切返し時の操舵トルクの傾向に差が生じた。この理由は、切返しによりラックが逆方向に動き出す際の摺動抵抗によるプレッシャパッド挙動（径方向）の影響と推定した。この考察については、5章にて解析的な結果に基づき詳述する。

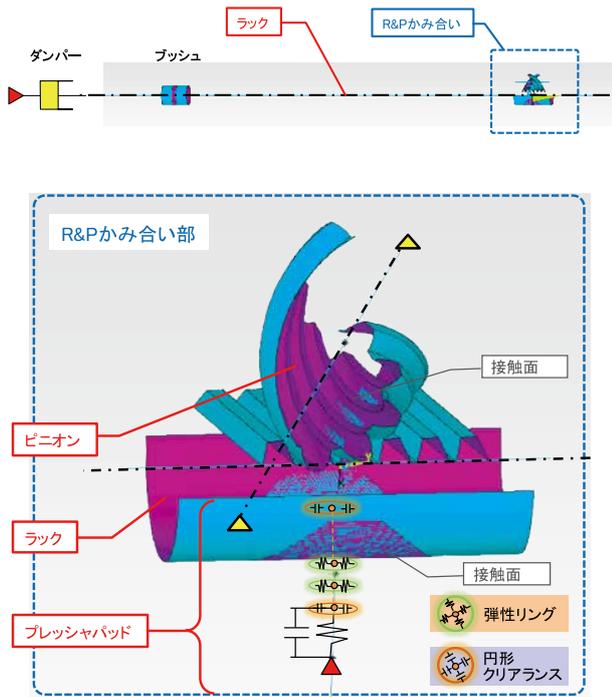


図10 R&P FEMモデル

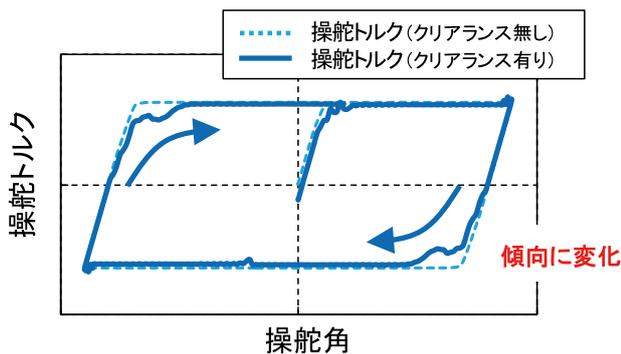


図11 R&P FEM解析結果

#### 4.3 1D R&Pモデルの改良

以上の検証結果を踏まえ、SimulationXで作成したR&Pモデルを図12のように変更した。プレッシュパッドに径方向自由度を与え、FEMモデルと同等な円形クリアランスと弾性リングを設けた。これにより、FEM噛み合い解析を1Dに縮退化できた。

1DのR&Pモデル改良後の解析結果を図13示す。改良前は計測結果のような操舵トルクの滑らかな変化を表現できなかったが、改良後は段階的に操舵トルクが変化し、より計測結果に近いトルク勾配変化を再現できている。この結果から、改良後のR&Pモデルの妥当性も検証できた。

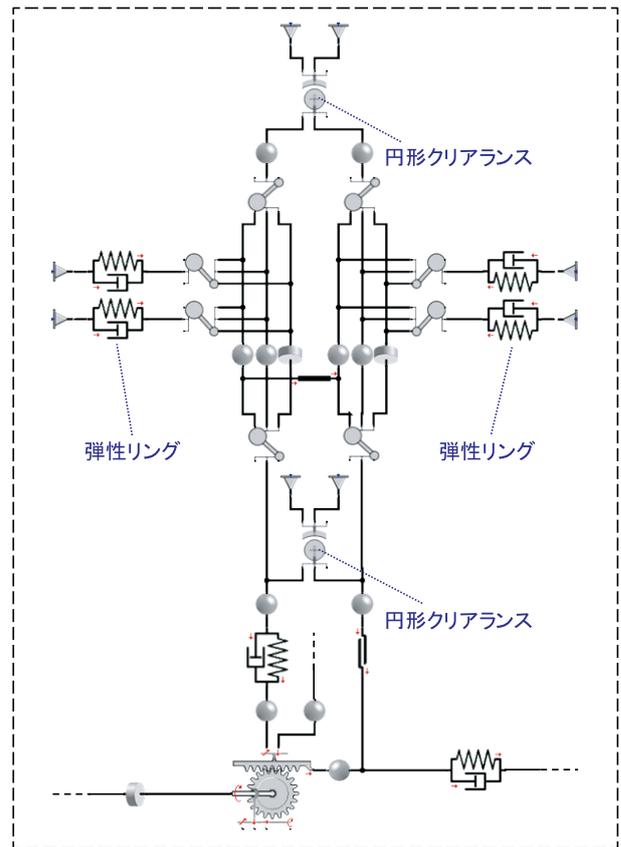


図12 改良後のR&Pモデル

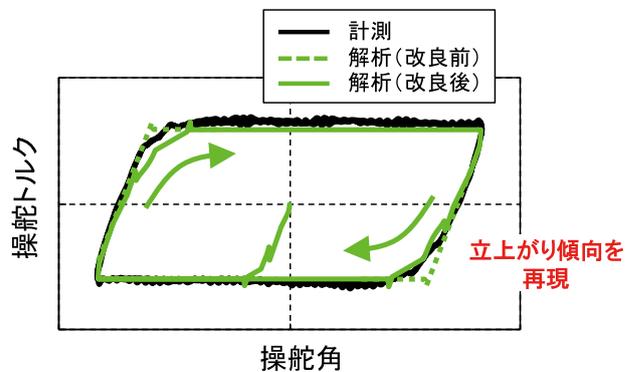


図13 プレッシュパッドモデル改良効果

## 5 シミュレーションモデルの妥当性検証

### 5.1 EPS構成要素挙動計測装置

これまでに、主要部品であるウォームギヤとR&Pモデルの改良を行い妥当性が検証できたので、ここではシステムモデル全体としての検証を行う。

機械伝達系モデルの妥当性を確認するため、写真1のような実機計測装置を構築した。次節より詳細を述べるが、この装置は操舵特性に影響を与えることなく、構成要素の3次元挙動の計測が可能である。

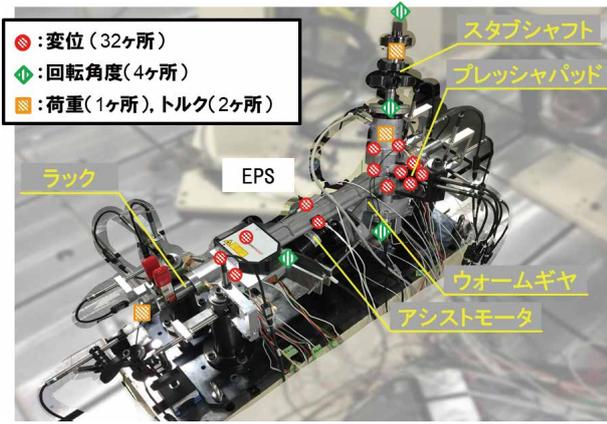


写真1 要素挙動計測装置

## 5.2 挙動計測方法

挙動計測した構成要素は、これまでの解析と照合するため、図14に示すようにウォームシャフト、ピニオン、ラックおよびプレッシャパッドとした。

各構成要素の挙動計測箇所を図15および図16に示す。図15に示す構成要素については、軸方向変位に加え、径方向変位を複数点計測し歯車機構の噛み合い位置の変位を幾何学的に算出した。図16に示すプレッシャパッドは、ラック支持方向変位を計4点測定し、対角2点の変位から幾何学的に傾き、およびラックとの接触面の径方向変位を算出した。

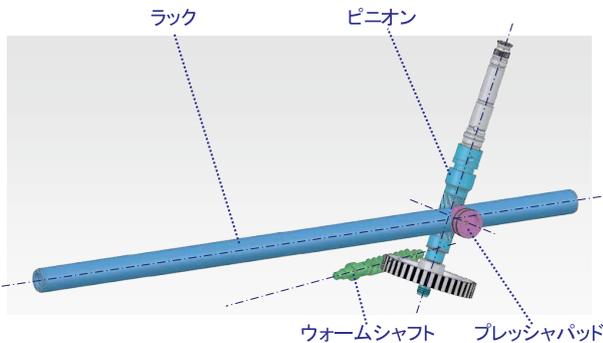


図14 計測対象とした構成要素

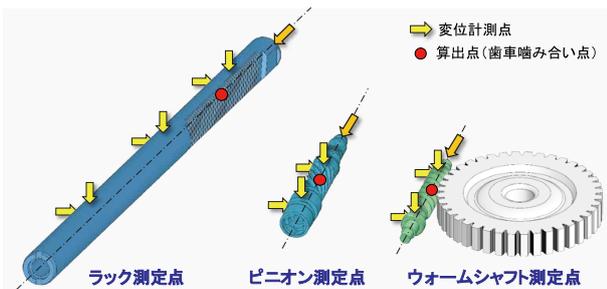


図15 構成要素3点挙動計測箇所

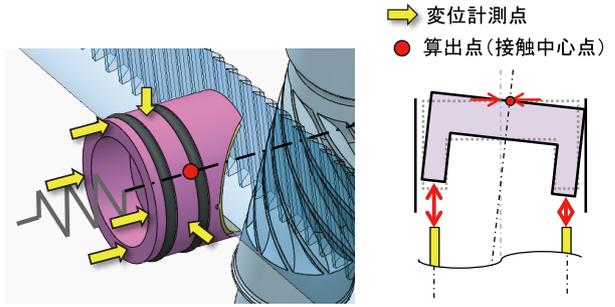
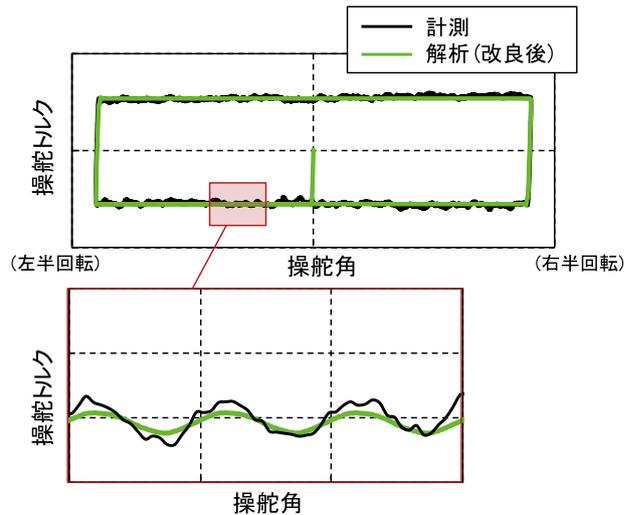


図16 プレッシャパッド挙動計測箇所

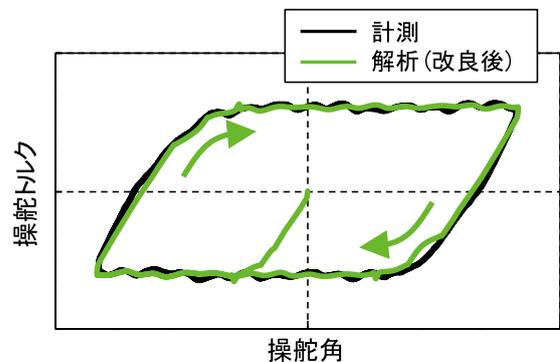
## 5.3 操舵特性の計測・解析結果比較

操舵特性について、改良後の機械伝達系モデルの解析結果と計測結果との比較を図17に示す。基礎モデルで差異のあった(a)図のような操舵トルクの変動や、切返し時の(b)図のような操舵トルクの立ち上がり傾向は良く一致しており、機械伝達系を高精度にモデル化できていることが分かる。

次節より、構成要素挙動も含めてモデルの妥当性を詳細に検証する。



(a)大操舵時



(b)微操舵時

図17 機械伝達系の計測/解析比較

### 5.4 挙動計測結果

まず、3章にてウォームギヤの噛み合いに起因するとした操舵トルクの変動に着目し、図18のように変動成分をFFT分析すると、特に①と②の変動周期成分の影響が大きかった。そこで、解析的に大きな影響が確認されたウォームシャフトの実機挙動を参照すると、操舵トルク変動と周期成分が一致した。さらに、2つの周期成分については図19に示す通り、他の構成要素と比べても、ウォームシャフトの挙動が卓越していることも明らかになった。

以上のことから、操舵トルクの周期変動は、主にウォームギヤの噛み合いによる影響が強く、3章で述べた解析的検討が妥当であることが確認できた。

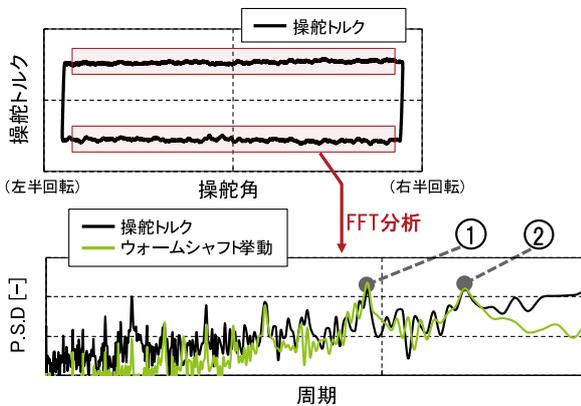


図18 計測結果 (FFT分析)

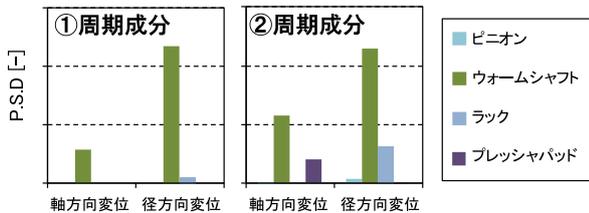


図19 構成要素の挙動変動周期

次に、操舵トルクの立ち上がりについては、4章でラック摺動にともなうプレッシャパッド挙動が要因と推定した。ここで、切返し時の操舵トルクとプレッシャパッド挙動の関係について、図20に時系列波形を示す。図中(a)で操舵トルクが定常値になる前に、(b)図のようにプレッシャパッドがラック軸方向(クリアランス径方向)に動き出しており、モデル改良後の解析結果においても定性的な傾向は一致していることが確認できた。

以上のことから、操舵トルクの立ち上がりには、主にR&Pのプレッシャパッドの挙動による影響が強く、解析的検討が妥当であることが確認できた。

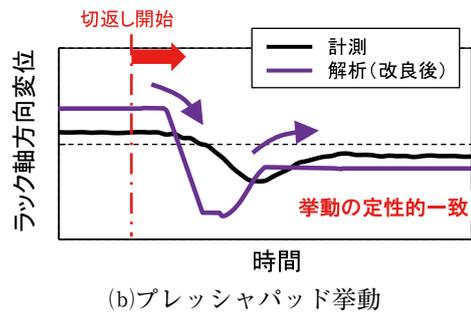
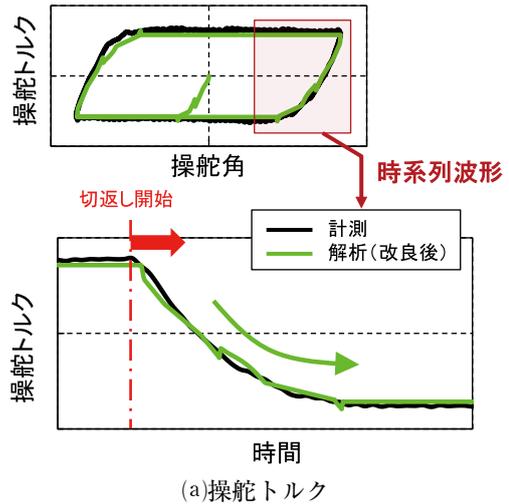


図20 時系列による計測/解析比較

### 5.5 動力損失比率の算出

機械伝達系解析モデルの妥当性が確認できたため、次に本モデルを使用して、設計ツールとしての各種検証を行った。

一例として、EPS内部の摩擦抵抗について、各構成要素の寄与度を確認するため、動力損失比率を算出し計測/解析で比較した。結果は図21のように、計測ではR&P損失が最も大きく、次いでウォームギヤやモータでの損失が大きかった。この傾向は解析でも一致しており、ツールとしての妥当性が確保されていることが確認できた。

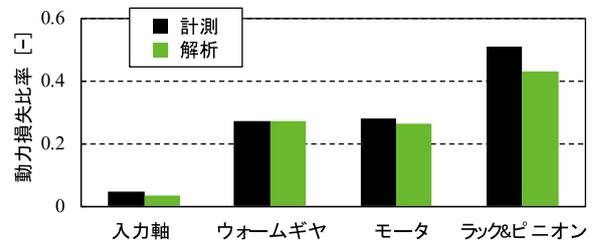


図21 損失の内訳

### 5.6 制御モデルおよび車両モデルとの連携

これまではステアリングの負荷が無く、モータアシストを無視した仮想条件でのEPS特性を検討してきたが、さらに実車走行時を想定したEPS操舵シ

ミュレーションを実施するため、構築した機械伝達系モデルに制御モデルを連成させた。

制御モデルについては、過去に当社で開発したモデル<sup>2)</sup>を使用した。図22に示すように、機械系モデルと制御モデルは異なるツール・言語で作成されているため、今回はTCP/IPによるデータ相互通信により連成させた。EPSへの負荷としては、微操舵時においてラックにかかる反力を実車で計測し、線形ばねで模擬したモデルとした。

操舵特性の計測結果および同条件での解析結果を図23に示す。操舵トルクについて最大-最小値誤差は5.0%、操舵方向によって生じるヒステリシスの誤差は4.7%であり、解析結果は計測と定量的に良好な一致を得た。また、操舵トルクの立ち上がりに着目しても、滑らかな勾配変化が生じている計測結果をよく再現しており、高精度で実現象を模擬できた。

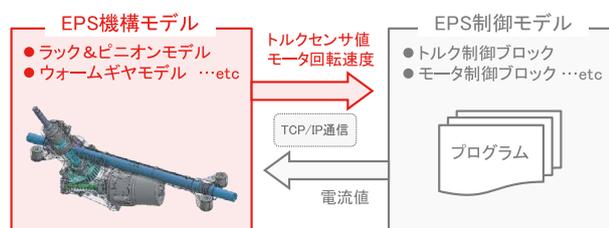


図22 シミュレーションモデルの連成

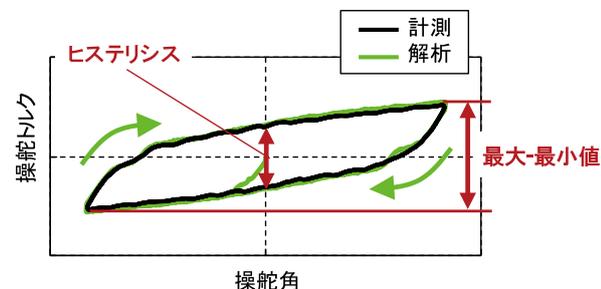


図23 操舵角-操舵トルク特性

## 6 結言

EPSの操舵特性メカニズムの明確化、さらにそのメカニズムをコントロールするため、1D-CAEツールを用いた機械伝達系シミュレーションモデルを開発し、以下の結論を得た。

- (1)主要構成要素であるウォームギヤおよびR&P機構について、3D-FEMと1D-CAEを連成した高精度モデルを構築し、詳細な実現象を予測可能とした。
- (2)各構成要素の挙動を観測可能な実機計測装置を構築し、EPSモデルの妥当性を確認した。
- (3)構築した解析技術（モデル）は、EPS各部の動力損出や、また実使用条件における特性予測が可能であり、設計ツールとしても有効であることが確認できた。

なお、本誌ではEPSの一例としてピニオンアシスト方式を一例として挙げたが、同様に他のアシスト方式についても展開可能である。

## 7 謝辞

本研究は、ニュートンワークス(株)ならびに社内関係部門の協力を得て実施されたものであり、紙面を借りて感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 松村：次世代要求に応える電動パワーステアリングの開発, KYB技報第56号, (2018年4月)
- 2) 小林：EPS用ECU試作開発におけるMBDの適用, KYB技報第52号, (2016年4月)

## 著者



北村 佳彬

2013年入社。技術本部基盤技術研究所要素技術研究室。EPSの操舵特性解析技術の研究に従事。