

技術紹介

# ピニオンアシストタイプ電動パワーステアリングの減速機ラトル音解析技術

柳 生 貴 也

## 1 はじめに

KYBの電動パワーステアリング（以下EPS）は、ウォーム減速機を用いたピニオンアシストタイプである。

ウォーム減速機のウォームホイールは樹脂製のため、金属製と比較して摩耗や温度による寸法変化が大きく、減速機のバックラッシ変化が大きい。

例えば、雰囲気温度が高くなるとウォームホイールは熱膨張により大きくなり、バックラッシが減少する。それにより減速機のロストルクが増加するため、図1に示すようにウォームギヤが揺動する構造を用いてバックラッシの大きさを保ち、ロストルクの変動を低減している。

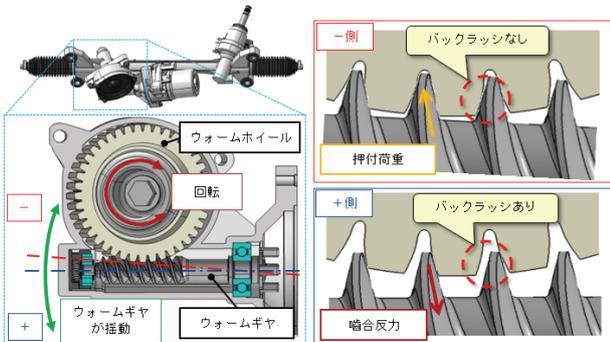


図1 アンチバックラッシ構造

これに対し、減速機の摩耗によりバックラッシが増大するとウォームホイールの回転方向が切り替わる瞬間に、歯面が接触しない空走状態が発生し、その後、歯面が衝突することで、減速機ラトル音が発生する（図2）。

このため、回転方向が切り替わる際のバックラッシの大きさが、なるべく小さくなるように、ウォームギヤをウォームホイールに押し付ける荷重（押付荷重）を与えている。

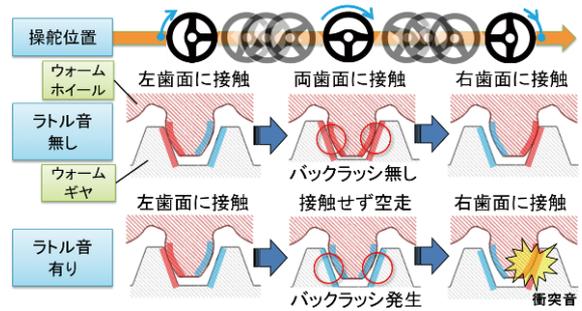


図2 操舵位置と歯面状態

押付荷重を大きくすると減速機のロストルクが大きくなるため、操舵トルクに対するラック軸力の発生に遅れが生じる。その結果、車両としては理想の走行ラインを描けなくなる（図3）。従って、操舵応答性と減速機ラトル音の両特性はトレードオフの関係にある。

これまでは、互いの特性を両立する押付荷重やバックラッシの大きさなどの仕様を実験的に決定するほかなかったが、仕様に基づいたEPS特性を予測可能な1Dシミュレーションモデルを開発したので紹介する。

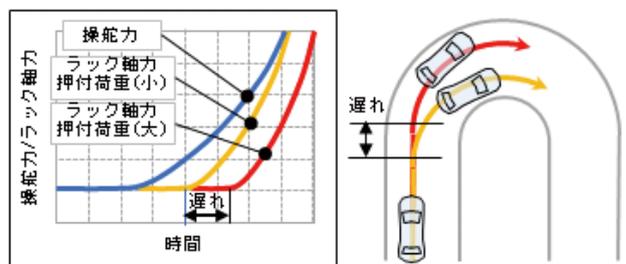


図3 操舵力とラック軸力

## 2 シミュレーションモデル

### 2.1 EPSシステムモデル

図4に示すEPSシステムモデルは、ハードの「EPS機構部」とソフトの「アシスト制御部」で構成されている。ステアリングホイールの操作やタイヤからの逆入力などに応じてEPSの挙動を模擬する全体モデルである。

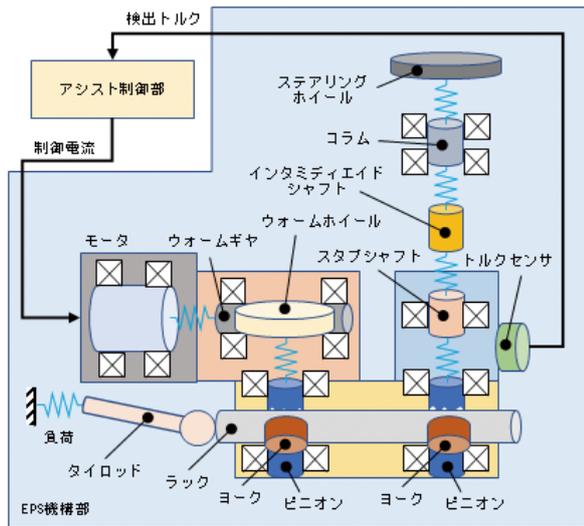


図4 EPSシステムモデル

EPS機構部のモデリングには、1DCAEツールであるSimulationX<sup>注1)</sup>を使用した。本ツールは、制御モデルで広く採用されているMATLAB®/Simulink<sup>注2)</sup>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ている物理モデリング言語Modelicaに準拠している。

アシスト制御部は、当社EPSに採用されている制御ロジックに基づき、MATLAB®/Simulink®を使用してモデル化している。

注1) SimulationXはESI ITI GmbHの登録商標です。

注2) MATLAB®/Simulink®はMath Works社の登録商標です。

### 2.2 減速機アンチバックラッシ構造

図5にアンチバックラッシ構造の概略を示す。ウォームギヤの先端には、ベアリングを減速機の軸間方向のみに移動するよう規制するホルダと、ベアリングをウォームホイール側へ押すためのスプリングとで構成されたカートリッジを配置する。モータ側は、ベアリングの内部隙間によってウォーム軸が傾斜できる構造になっている。

Oを支点にウォームギヤ軸が傾斜することで、噛合い位置での軸間距離が変化し、バックラッシを変化させる。また、カートリッジはベアリングとハウ

ジングの打音を抑制する緩衝材も兼ねている。

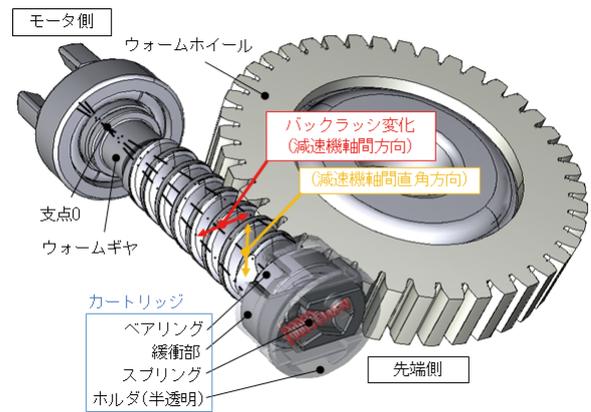


図5 アンチバックラッシ構造概略

### 2.3 減速機アンチバックラッシ構造モデル

図6にアンチバックラッシ構造のモデル概略図を示す。ウォームギヤ先端側のカートリッジの構造は、減速機の軸間方向の動きに対して、噛合い剛性とスプリング剛性を与える。軸間が広がる方向へ移動し、ウォームギヤが緩衝部と接触したのちには、上記に加え、緩衝部剛性が加わる構成とした。

軸間直角方向の動きに対しては、ホルダの二面幅で動きを規制する構成とした。

モータ側は、ベアリングで支持する構造であり、ベアリングのアキシャル隙間によってウォームギヤはウォームギヤ軸方向へ移動する。アキシャル隙間の大きさによって、ウォームギヤの揺動可能な角度が変化する構成とした。

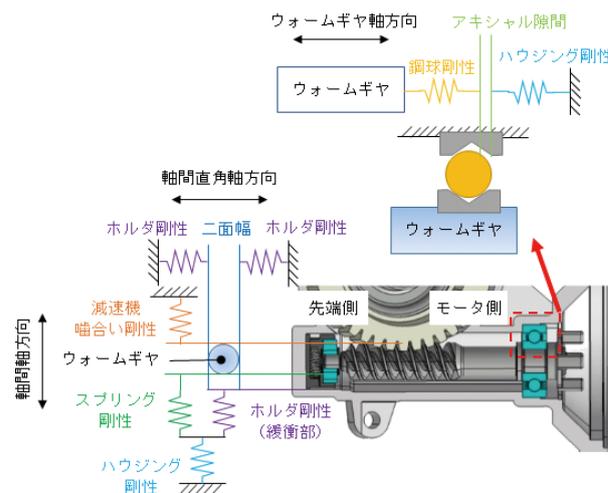


図6 アンチバックラッシ構造モデル概略

## 3 減速機ラトル音評価

### 3.1 減速機ラトル音計測方法

減速機ラトル音の評価は、図7に示すように、タ

イロッド端よりサイン波で荷重を入力し加振した際の減速機部の加速度の大きさで行った。ステアリングホイールやコラムの代わりに、スタブシャフトには慣性円盤を取り付けている。実機計測及び解析ともに同様の評価条件である。

なお、減速機ラトル音として放射音ではなく、ハウジングに取り付けた加速度計の値を用いたのは、実機において計測が比較的容易なためである。

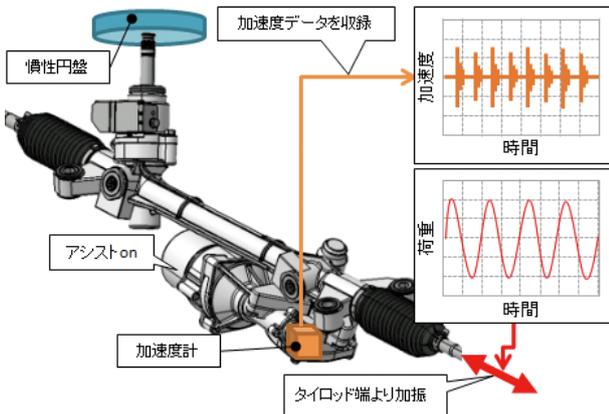


図7 減速機ラトル音評価条件

### 3.2 減速機ラトル音解析と実機計測の比較

図8に減速機ラトル音の解析結果と同条件における実機計測結果を示す。

結果に示す線図は、実機計測及び解析によって得られた加速度データを周波数分析したものである。

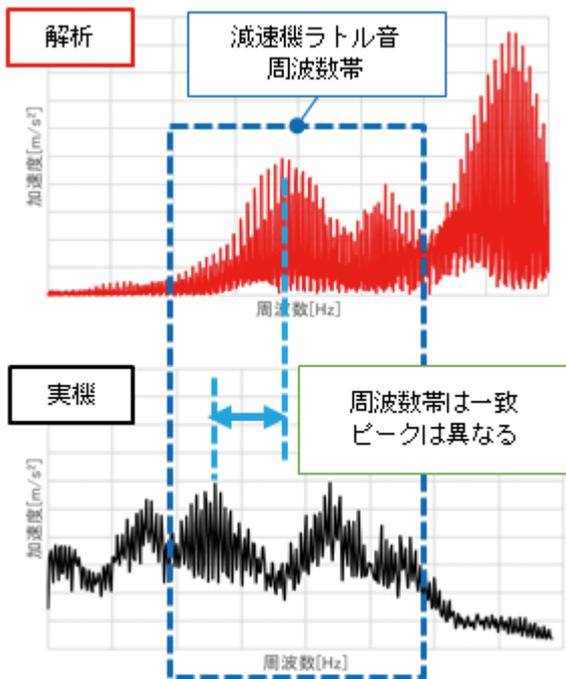


図8 減速機ラトル音比較

本計測方法によると、減速機ラトル音は破線で囲った周波数帯にピークが発生する。

解析結果のピークは、減速機ラトル音の周波数帯の中に発生しているが、実機計測結果と比較すると、周波数が若干高い。周波数が高くなる原因として機構部品の支持状態が実機と解析で異なることが考えられる。従って、ハウジングの3Dモデルを1Dモデルへ縮退することで、実機と支持状態を一致させることを検討した。

図9に示すのは、減速機ハウジングの3Dモデルである。ハウジングの各ベアリング支持部を多点拘束 (MPC) し、1Dモデルにおける荷重入力点として使用した。3Dモデルの1D縮退にはニュートンワークス(株)のMOR (model-order-reduction) を使用した。

図10は、ハウジングの1DモデルをEPS機構部のモデルに取り込み、同様の解析を行った結果である。

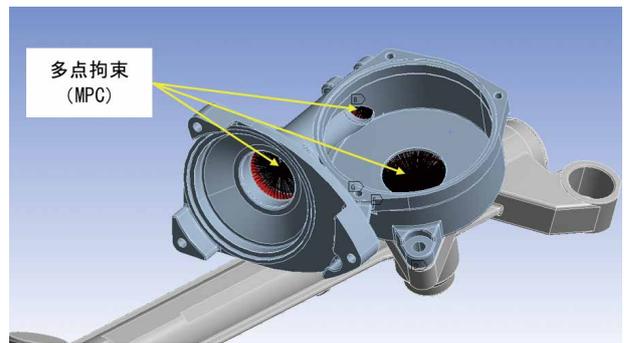


図9 減速機ハウジング3Dモデル

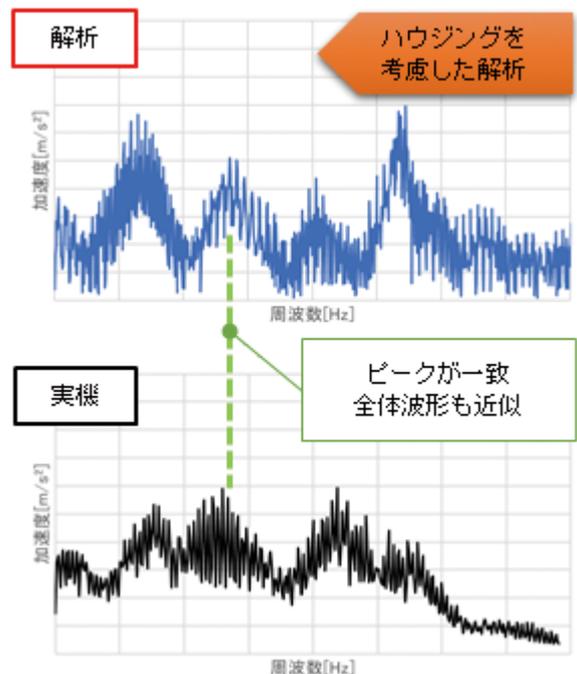


図10 ハウジングを考慮した減速機ラトル音比較

ハウジングを考慮していない結果に比べて、ピークが一致し、全体も実機と近似した波形になった。

#### 4 シミュレーションモデルの妥当性確認

##### 4.1 減速機ラトル音の確認

本シミュレーションモデルを用いて、減速機バックラッシュと押付荷重についてパラメータスタディ（表1）を行い、減速機ラトル音への影響を確認した。同時に、実機についても同様の測定を行い、互いの結果の相関を確認することでシミュレーションモデルの妥当性の確認を行った。減速機ラトル音の測定方法は、前節の方法と同様である。

表1 ラトル音確認仕様

仕様	バックラッシュ	押付荷重
A	中	中
B	大	大
C	大	中

図11に示すのは、減速機ラトル音の実機計測結果（横軸）と解析結果（縦軸）の相関グラフである。値は減速機の周波数帯の加速度で、ピークtoピークの値を用いた。

実機と解析の相関係数Rは0.974であり、高い相関がある。つまり、仕様の変化に対する減速機ラトル音の変化は実機と同等であり、特性予測ツールとして本シミュレーションモデルが妥当であると言える。

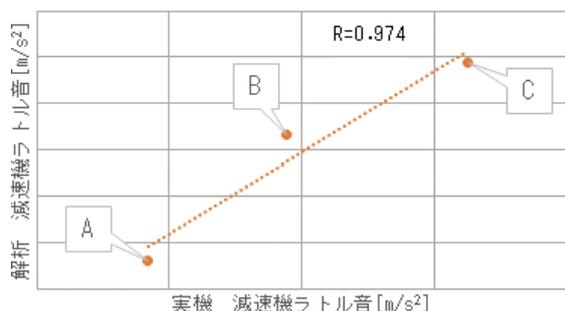


図11 減速機ラトル音相関

##### 4.2 操舵応答性の確認

操舵応答性への影響確認として、ロストルクの変化を確認した。確認は、タイロッド端に負荷を付けていない状態で操舵した時の操舵トルクを測定することで行った。

操舵トルクの測定方法は、図12に示す通りである。ハンドルから三角波で操舵角度を入力し、その時の

操舵トルクを記録する。

操舵トルクについても、表2に示す仕様でパラメータスタディを行った。バックラッシュは新品状態を想定しているため「小」で固定し、押付荷重のみ変化させた。

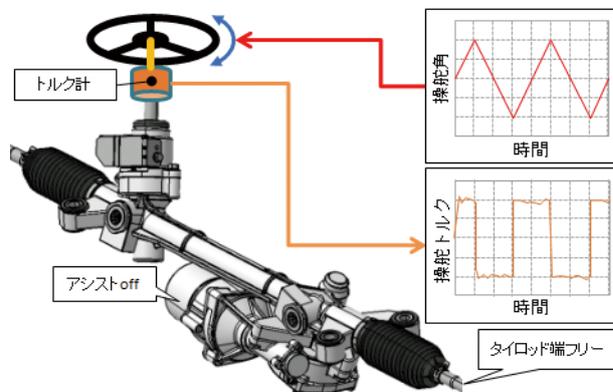


図12 操舵トルク評価条件

表2 操舵トルク確認仕様

仕様	バックラッシュ	押付荷重
D	小	小
E	小	中
F	小	大

図13に示すのは、操舵トルクの実機計測結果（横軸）と解析結果（縦軸）の相関グラフである。値は操舵範囲の平均操舵トルクを用いた。

実機と解析の相関係数Rは0.951であり、高い相関がある。つまり、仕様の変化に対する操舵トルクの変化は実機と同等であり、特性予測ツールとして本シミュレーションモデルが妥当であると言える。

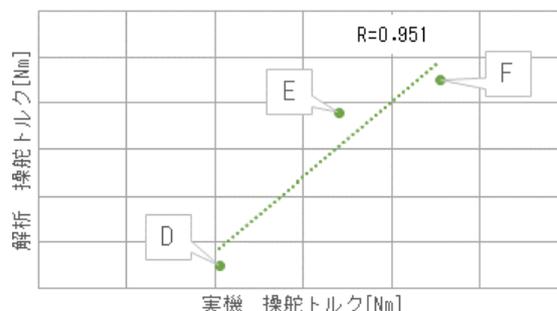


図13 操舵トルク相関

以上より、本シミュレーションモデルを用いることで、減速機ラトル音を最小に抑えつつ、操舵応答性を最大にする仕様を導出することができる。

## 5 まとめ

本報では、本シミュレーションモデルを用いた特性予測として減速機ラトル音と操舵トルクを取り上げたが、このほかのEPSに関する動作についても、本シミュレーションモデルを用いて予測することが可能である。

また、変更パラメータについては「バックラッシ」や「押付荷重」としているが、本シミュレーションモデルに入力する際は、部品寸法で入力するため、部品の寸法公差の設定検討に用いることも可能である。

本シミュレーションモデルの開発により、設計段階でEPSの特性予測が可能となり、開発・設計の効率化を図ることができた。

## 6 おわりに

EPSは省エネや油を使わないことによる環境配慮を背景に需要が高まっていったが、昨今では、先進運転支援システム（ADAS）や自動運転への対応のため、欠かせない技術となっている。これらの変化に対して迅速な対応ができるよう、シミュレーションモデルにさらなる改良を加え、開発・設計支援技術の向上に取り組む。

最後に本シミュレーションモデルの開発にご支援、ご協力をいただいた社内外の関係者各位に、この場を借りて厚く御礼申し上げたい。

## 著者



柳生 貴也

2005年入社、オートモーティブコンポーネンツ事業本部技術統轄部電子技術部、ペーンポンプ、EPSの設計を経て現職。