

# 電動パワーステアリング用ウォーム式減速機における かみあい変動解析技術の確立

Development of Meshing Variation Analysis of Worm Gear Used in Electric Power Steering

菊地 新 A. KIKUCHI 待田精一 S. MACHIDA

It was difficult to theoretically analyze meshing variation of the worm gear used in electric power steering by numerical formula, because gear meshing positions are largely displaced due to the structure and material. Due to this, we repeated vehicle and bench experiments and conducted countermeasures through trial and error. In order to provide a more efficient and accurate analysis, which was a challenge during product development, we worked to create a meshing variation design tool using a finite element method to allow prior estimation of gear meshing variation. As a result, we have succeeded in creating an analysis technology with correlation to actual results, which makes prior estimation in the design stage possible. In addition, we have succeeded in visualizing the shared load on each tooth surface and contact position. This has facilitated the study on reduction of meshing variation and made development more efficient.

**Key Words:** electric power steering, worm gear, gear vibration, finite element method

## 1. はじめに

近年、環境意識の高まりからハイブリッド自動車や電気自動車などの静粛性の高い車両が市場をけん引しつつあり、電動パワーステアリング（EPS）にもさらなる静粛性が求められている。EPSには、主にウォーム式減速機（減速機）を採用しており、ハンドル操舵時のかみあい変動に起因する振動や騒音の防止が重要となっている。

さらに、減速機では悪路走行時に発生する歯打ち音も同時に防止する必要があり、このためウォームホイールの材質として樹脂を採用し、さらに芯間調整機構でウォームをウォームホイールに押し付けることにより、バックラッシュを常時ゼロとする構造としている。これにより、ステアリングホイール操舵時にモータのアシストトルクが減速機に入力されると、ウォームホイール樹脂部の弾性変形と芯間調整機構によるウォームの変位が発生し、歯面の接触状態の解析が困難であった。そのため、従来の開発では実車やベンチでの実験を繰り返し、試行錯誤により対策されているのが実情であり、これをいかに効率よく的確に行うかということが製品開発での課題とな

っていた。

一方、CAEの代表的な手法である有限要素法（Finite Element Method：FEM）は、複雑な形状で接触を含む解析条件に対しても対応が可能であることから、これまでも減速機の強度や信頼性を検討する際に、かみあい部に発生する応力や接触面圧を評価する手法として用いられてきた。

本報では、このFEMを応用し、設計段階でかみあい変動を予測でき、低減手法を効率よく検討できる設計検討ツール構築への取り組みを紹介する。また、実際に本解析手法を用いてかみあい変動の低減を検討した事例も報告する。

## 2. 減速機の役割と概要

図1に、ステアリングシステムの構成を示す。運転者の操舵トルクに応じたアシストトルクがモータに発生し、減速機を介して増幅され出力軸に伝達する。

図2は、芯間調整機構を持つ減速機の構造である。

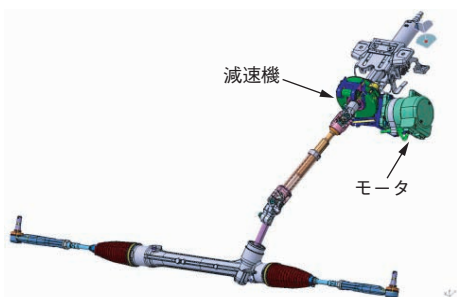


図1 ステアリングシステムの構成  
Structure of steering system

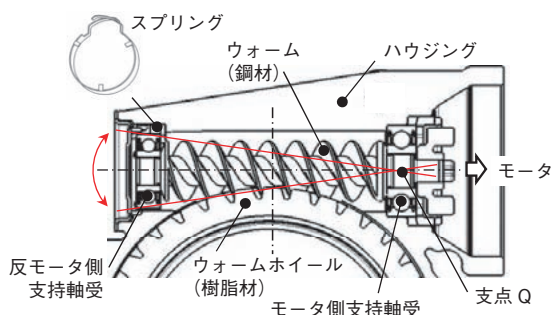


図2 芯間調整機構を持つ減速機の構造  
Worm gear with backlash adjustment mechanism

ウォームの反モータ側支持軸受とハウジングとの間にすきまを設け、そのすきまに特殊な芯間調整用のスプリングを組み込んであり、ウォームはモータ側支持軸受の中心である支点 Q を中心に変位することが可能である。モータ作動時には、反モータ側のハウジング内径部がストッパとなりウォームの変位が規制される。

### 3. 解析手法

#### 3.1 解析の流れ

ステアリングホイール操舵時に発生する振動や騒音の多くは、減速機の出力軸トルクの変動と相関があることが分かっている。そこで、モータのアシストトルクを一

定で入力した場合の、かみあい変動によって発生する出力軸トルクの変動を計算することを検討した。図3に、解析手順の概要を示す。

ウォームおよびウォームホイールのモデルは、加工工具のモデルを用意して実加工で発生する工具軌跡の包絡面を作成し、加工前形状のモデルから除去することで作成する。したがって、任意の工具形状からモデルを作成することが可能である。なお、ウォームホイールのモデルは剛性の低い樹脂部分のみとし、弾性変形を考慮したウォームとかみあう角度範囲を作成している。

#### 3.2 荷重・拘束条件

ウォームとウォームホイールのモデルを所定の軸間距離に配置した後、任意の角度でかみあわせウォームホイール樹脂の内径面を固定してウォームに一定のトルクを負荷する静解析を行う。解析モデルとしては、ウォームとウォームホイール以外にウォーム支持軸受とハウジングを組み合わせる。図4に各要素モデルに定義する荷重と拘束条件を示す。

ウォームにはモータトルク相当のトルクを入力し、ウォームホイール歯面との接触拘束、反モータ側軸受およびハウジング間の接触拘束によりウォームが反力を受ける。また、モータ側軸受とウォームの圧入面は、軸受のアキシャル剛性、ラジアル剛性、および角度剛性を考慮したばね結合により拘束し、軸受支持剛性を表現している。なお、想定している入力トルクでのハウジングストッパ接触荷重に対しスプリング荷重は十分に小さいため、考慮していない。

計算実行後、ウォームホイール固定面に発生した反力から出力軸まわりの回転モーメント成分を確認する。これが出力軸トルクに相当する。

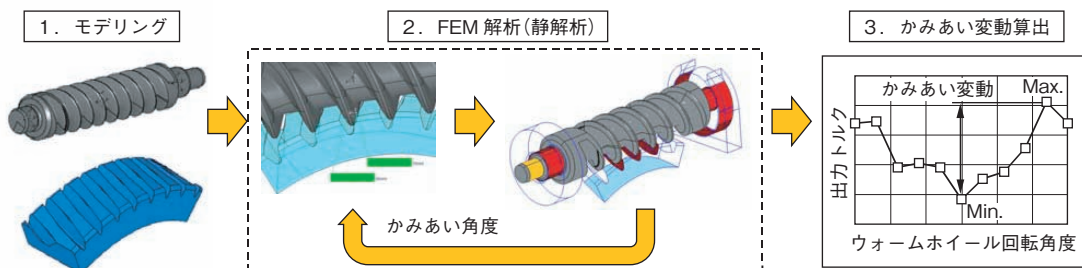


図3 解析手順の概要  
Outline of analysis procedure

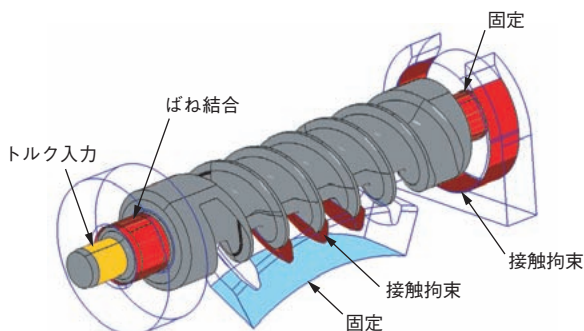


図4 荷重と拘束条件

Applied load and boundary conditions

### 3.3 かみあい変動の算出

前記の解析をウォームと、ウォームホイールのかみあい角度を変更しながら繰り返す。かみあい角度は、角度ピッチを等分割する設定とし、1ピッチ回転する範囲での出力トルクの変化を離散的に算出する。算出された出力トルクの最大値と最小値の差をかみあい変動とした。

## 4. 実験検証結果

本解析手法の妥当性を確認するため、C-EPS®用コラムを用いた実機試験の結果と比較した。図5に試験方法の概要を示す。

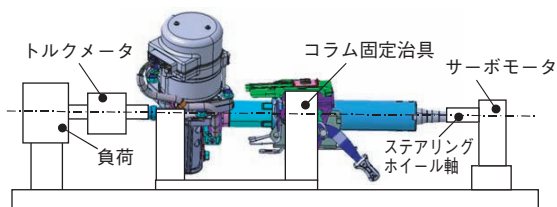


図5 試験方法の概要

Outline of examination procedure

ハンドル軸をサーボモータで一定の回転速度で操舵し、出力軸に負荷を与えたときのコラム出力トルクの時間軸波形を測定しトルク変動を算出した。

図6に実測した出力軸トルクの時間軸波形を示す。ステアリングホイール回転速度とウォームギヤの減速比から算出されるかみあい1次の周期と、実測した出力軸トルク変動の周期が一致していることを確認した。

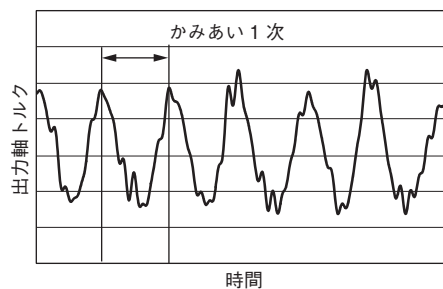


図6 出力軸トルク測定結果

Experimental data of output torque

次に、減速機歯車諸元の異なるコラムアセンブリで、出力軸トルク変動の実測を行った。同時に同諸元の歯形モデルを作成し、FEMによるかみあい変動の解析を行った。図7にその実測結果と計算結果の比較を示す。相関係数  $R^2$  値は 0.7 を超えており、前章の解析手法により算出したかみあい変動を評価指標とすることに問題ないと判断できる。

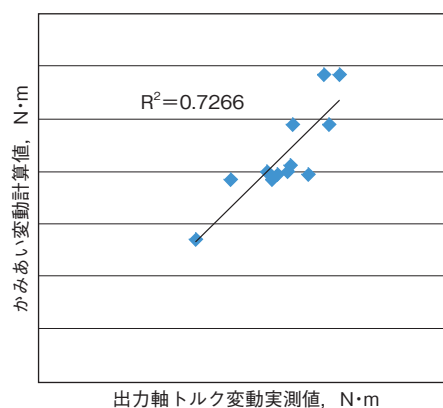


図7 実測値—計算値比較

Comparison of measurement results and calculation results

## 5. かみあい変動低減手法の検討

### 5.1 かみあい変動の可視化

かみあい変動を低減できる設計諸元を検討するうえで重要なことは、接触歯面の分担荷重、接触位置およびかみあい枚数の変化と、それに伴う出力トルク変化の関係を把握することである。そこで、前章で示した解析手法を用いウォームホイール軸のかみあい変動を算出すると同時に、対となってかみあうウォームとウォームホイール歯面（歯対）に発生するウォームホイール回転方向の分担荷重  $F_i$  とウォームとの接触半径  $r_i$  を FEM 解析結果から求めた。図8にその概略を示す。

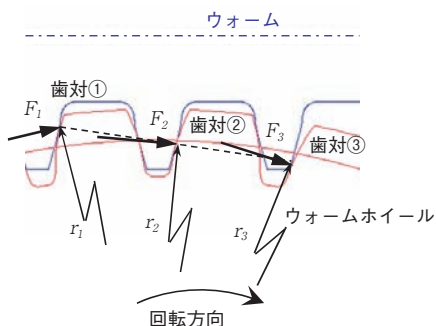


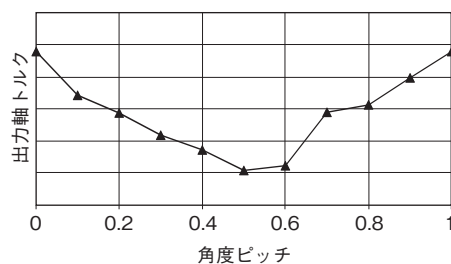
図8 かみあい歯面の分担荷重と接触半径  
Shared load and contact radius of meshing tooth

トルクのつりあいから、出力トルク  $T$  が、同時に  $m$  対の歯がかみあっている場合、

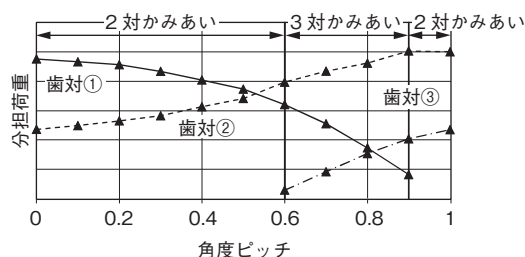
$$T = F_1 r_1 + F_2 r_2 + \dots + F_m r_m \quad (1)$$

となる。なお、歯面の接触部はウォームホイール樹脂の弾性変形により一定の面積をもつため、最大面圧発生位置を接触半径としたが、(1)式から算出した出力軸トルクと解析結果の出力軸トルクはほぼ一致していたため、この手法で問題ないと判断できる。図9は、ある減速機諸元について、かみあい角度を変化させたときの各歯対の分担荷重、接触半径、および出力軸トルクの推移である。

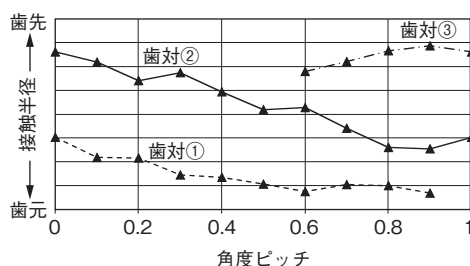
分担荷重と接触半径は、歯対それぞれの変化を表しており、識別のため歯対①、②、③と図中に記している。つまり、この減速機諸元の場合2対かみあい状態と3対かみあい状態が交互に繰り返されており、実かみあい率が2と3の間であることになる。図9(b)から、角度ピッチ「0」位置からかみあいが推移すると「歯対①」の分担荷重が低下し、図9(a)から出力軸トルクが低下していく。その後、角度ピッチ「0.6」位置から「歯対③」がかみあいを開始し、分担荷重が増加することで出力軸トルクが増加していくことが分かる。



(a) 出力軸トルクと角度ピッチの関係



(b) 各歯対の分担荷重と角度ピッチの関係



(c) 各歯対の接触半径と角度ピッチ

図9 計算結果

Calculation results

## 5.2 かみあい変動低減手法の例

ここではかみあい変動対策の一例として、ウォームホイールを加工するホブの取付け角の最適化を検討する。歯切り加工時のホブ取付け角  $\beta$  は、ウォームホイールの進み角  $\gamma$ 、ホブの進み角  $\alpha$  としたとき、図10のように  $\beta = \gamma - \alpha$  とするのが原則である。

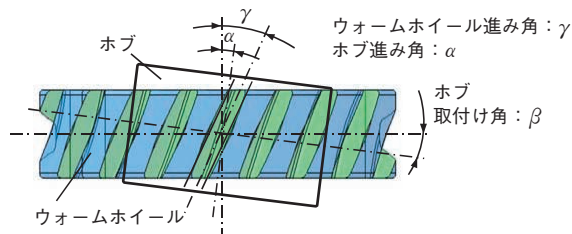


図10 ウォームホイールとホブの関係  
Relationship between worm wheel and hob

図9の減速機諸元の場合、出力軸トルクが低下するのは図9(b)から「歯対①」の分担荷重低下が要因であることが分かるが、「歯対①」はウォームホイール歯元側でかみあっているため、歯元での分担荷重を維持できれば出力軸トルクの低下が抑えられ、出力軸トルク変動も低減する。一方、ウォームホイールにおけるウォームとのかみあい接触位置は、図11のように半径方向だけでなく歯すじ方向にも推移するので、ホブ取付け角 $\beta$ を増やす方向に修正することで、ウォームホイール歯元付近でのウォームとの接触量が増加し、分担荷重が維持されると推定できる。

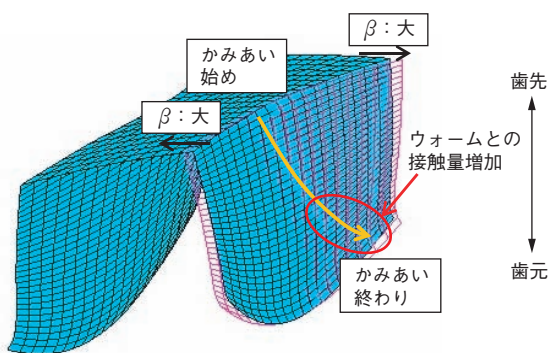
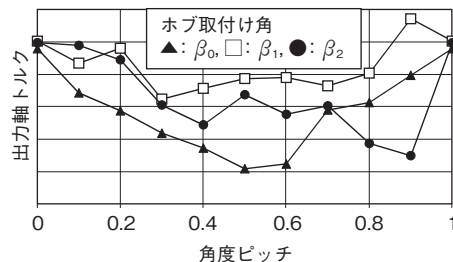


図11 ウォームホイール歯面とウォームとのかみあい接触位置

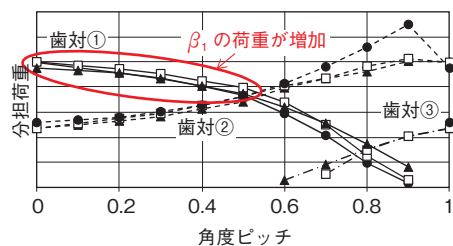
Tooth surface of worm wheel and meshing line with worm

そこで図9の減速機諸元について、ホブ取付け角を変更した2種類の諸元で、追加解析した。図12に解析結果を示す。図中のホブ取付け角度： $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ の関係は、 $\beta_0 < \beta_1 < \beta_2$ である。

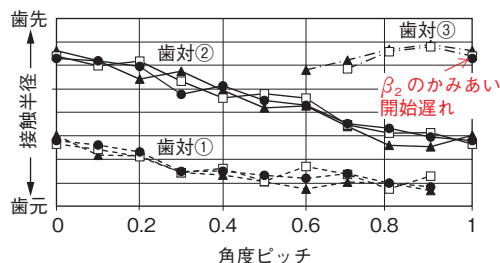
出力軸トルク変動の計算結果を見ると、図12(a)から $\beta_1$ が最も低くなっているが、この要因を分担荷重と接触半径の関係から考察する。図12(b)から $\beta_1$ の解析結果を見ると、 $\beta_0$ に対して狙い通り「歯対①」の分担荷重が0～0.6ピッチ範囲で増加しており、出力軸トルクの低下が抑制されていることが分かる。しかし、 $\beta_2$ までホブ取付け角を大きくすると、図12(a)から出力軸トルクの変動は $\beta_1$ よりも逆に増加する結果となっている。分担荷重、接触半径を他の仕様と比較すると、 $\beta_2$ は角度ピッチ前半での出力軸トルクの低下は抑えられているが、「歯対③」のかみあい開始角度が他の仕様と比べて遅くなっており、出力トルクの上昇が遅れていることが要因である。これは、ホブ取付け角が大きくなると、図11に示すようにウォームホイール歯先側、つまりかみあい始めにおいてウォームとのすきまが増加する方向に歯形が変化するためである。



(a) 出力軸トルクと角度ピッチの関係



(b) 各歯対の分担荷重と角度ピッチの関係



(c) 各歯対の接触半径と角度ピッチの関係

図12 ホブ取付け角度とかみあい変動  
Hob setting angle and meshing variation

このように、ホブ取付け角のかみあい変動に対する最適値を求めることができ、また実機検証においても、図13に示すように従来諸元に対し出力軸トルク変動が30%低減する結果となった。

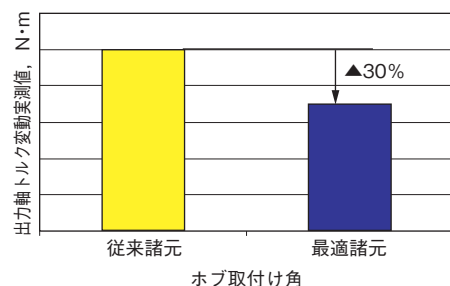


図13 ホブ取付け角最適化の効果  
Effects of optimization of hob setting angle

## 6. おわりに

FEM を用いたウォームギヤのかみあい変動解析技術と、低減手法の検討事例を紹介した。冒頭で示したように EPS 用ウォームギヤのかみあい現象は複雑であり、実験的な検証が困難であったが、本報で紹介した解析技術を用いることでかみあい変動の可視化が可能となり、現象の理解と説明が容易となった。また、かみあい変動の事前予測が可能となったことで、試作・評価段階での工数削減による開発業務の効率化を図ることができた。今後もさまざまな解析技術を活用することによって、顧客からの高度な要求にも迅速に対応できるよう、開発を推進していきたい。

## 参考文献

- 1) 杉浦友紀：電動パワーステアリング(EPS)減速機の芯間調整機構, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1001(2006)73.
- 2) 西村慎二, 阿部 諭：コラムタイプ電動パワーステアリングのラトル音解析技術の確立, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1009(2001)66.

## 筆 者



菊地 新\*  
A. KIKUCHI



待田精一\*\*  
S. MACHIDA

\* 自動車部品事業本部 要素開発部

\*\* 自動車部品事業本部 第1実験解析部