

# ラック平行タイプ電動パワーステアリング用スペーサボールの開発

## Development of Spacer Balls for Rack Parallel Type Electric Power Steering

朝倉正芳 M. ASAKURA 内山 清 K. UCHIYAMA 井上俊治 S. INOUE

We have developed rack parallel type electric power steering (RP-EPS) for large and advanced class vehicles.

Advanced class vehicles require high quality in terms of the steering experience. In order to provide smooth steering, spacer balls were adopted in the ball screw of RP-EPS.

Torque variation is reduced significantly as the spacer balls have the effect of reducing the slip between balls. In addition, in accordance with reduced slip, the durability of the ball screw was also improved.

**Key Words:** electric power steering, torque variation, ball screw, spacer balls

### 1. はじめに

近年、環境意識の高まりや運転支援の高度化への要望などから、大型車や上級クラスの車両に電動パワーステアリング (Electric Power Steering : EPS) 搭載のニーズが拡大している。大型車においては、車両重量の増加に伴い EPS に要求されるアシスト力が大きくなってきている。

当社でも、大型車に搭載可能なラック平行タイプ電動パワーステアリング (RP-EPS, 図1) を開発し、2016年12月に量産を開始した。RP-EPS では、ステアリングの操舵力をアシストするモータの出力を歯付きベルトとボールねじにより2段階に減速する構造としており (図2)、従来のEPSよりも省スペースで高出力化が可能となった。

上級クラスの車両においては小型車などに比べ、操舵感への要求品質が高い。今回当社が開発した RP-EPS では、この高い要求品質を満足させるために、ボールねじにスペーサボールを採用したので、以下に紹介する。

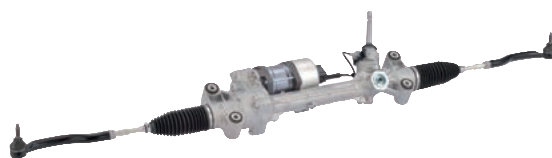


図1 ラック平行タイプ電動パワーステアリング RP-EPS

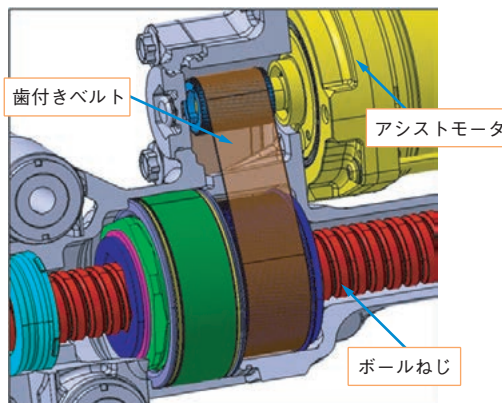


図2 RP-EPS 減速機部 Reducer of the RP-EPS

## 2. トルク変動

ステアリングの操舵トルク変動が発生すると、運転者はステアリングホイールを通して違和感を覚える。この違和感は減速機としてボールねじを用いたステアリングギヤにおいては、レーンチェンジなどの小操舵（±10～40deg程度）の繰り返し後に感じられることがある。

トルク変動発生時の、操舵トルク波形例を図3に示す。トルク変動は一定の周期で発生し、その発生周期はボールの移動周期と一致することから、ボールねじに起因するトルク変動であることが分かる。

図4にトルク変動ありのときと、トルク変動なしのときのボールねじ内部の様子をX線CTスキャンで観察した結果を示す。トルク変動なしの場合はボールは均等間隔で存在しているのに対し、小操舵繰り返し後トルク変動ありの場合においては、ボールが連続して存在する箇所と大きくすきまが空いている箇所があるのが分かる。これは小操舵の繰り返しにより、ボールが徐々に連続的に接触した結果と考えられる。

小操舵により隣り合うボールどうしの接触が起こると、接触したボール間ですべり摩擦が生じる。そのすべり摩擦の影響によりボールの転がり運動が阻害されるため、繰り返しの小操舵によりボールどうしの連続した接触となっていく。ボール間のすべり摩擦は、多数個のボールが連なった場合のほうが大きくなるため、さらに連続したボールどうしの接触が助長される。

以上のように、ボール間で生じるすべり摩擦は、トルク変動に大きく影響している。

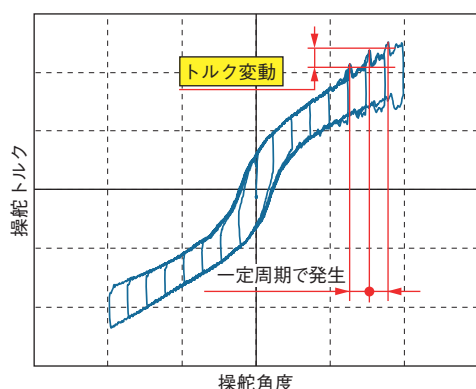


図3 トルク変動  
Torque variation

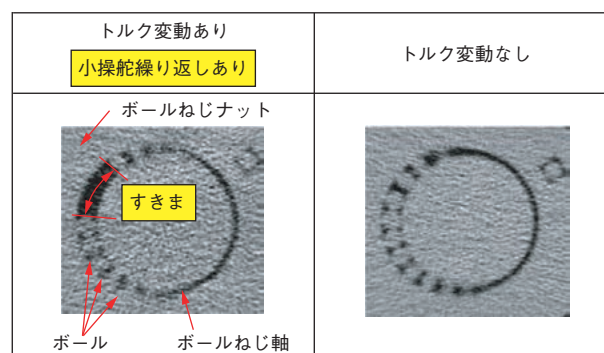


図4 ボールねじのX線CT観察  
X-ray observation of ball screw

## 3. スペーサボールの作動原理

ボールねじにおいて、ボールどうしのすべり摩擦を低減する方法として、スペーサボールを使用する方法はすでに知られており、産業用ボールねじなどでは製品化の例も見られる。

ボールねじでは、ボールねじ軸とボールねじナットに挟まれた支持ボールにより、荷重の伝達を行っている。

スペーサボールとは、支持ボールと支持ボールの間に置いた、支持ボールより直径の小さなボールのことで、その作動原理は次のように説明できる。

図5(a)はスペーサボールを使用しない場合で、このとき各ボールの転がり方向が同じであるため、ボールどうしが接触するような状況ではボール間ですべり摩擦が生じ、ボールねじのトルク変動や耐久性に大きな影響を及ぼす。

図5(b)はスペーサボールを使用した場合を示す。スペーサボールは支持ボールより直径が小さいためボールねじ溝による拘束を受けず、支持ボールと反対方向に回転することができる。そのためボールどうしが接触するような状況下においても、ボール間ですべり摩擦が生じない。

開発品では、スペーサボールによるボール間でのすべり摩擦の緩和効果を最大限にするため、スペーサボールと支持ボールを1個おきに配置した。

図3にてトルク変動が見られたステアリングギヤを、スペーサボール仕様に置き換えたときの操舵トルク波形を図6に示す。スペーサボールの効果により、大幅にトルク変動が低減されていることが確認できる。

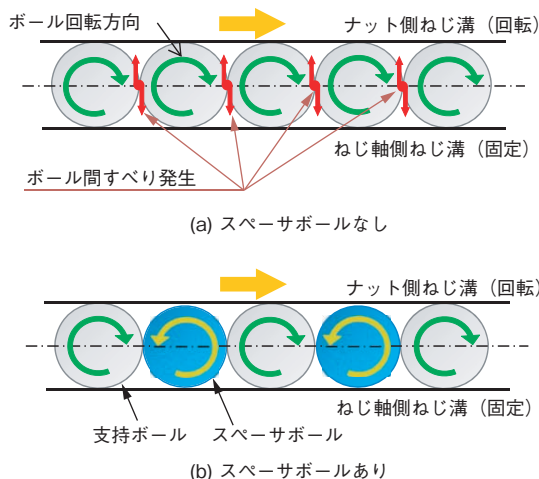


図5 スペーサボールの作動原理  
Principle of spacer ball action

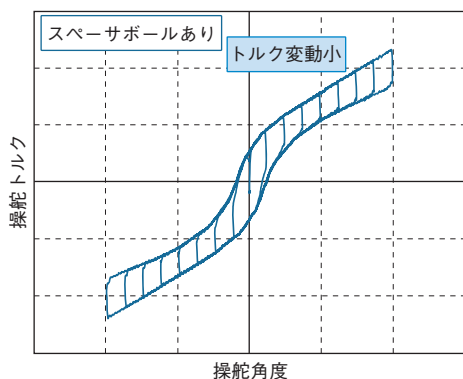


図6 スペーサボール仕様のトルク変動  
Torque variation with spacer balls

## 4. ボールねじの耐久性

ボールねじの耐久性については、ねじ溝面の面圧とすべり摩擦が影響する。

スペーサボールを使用した場合、支持ボールの数が減り支持ボール1個あたりの負荷分担が増える。開発品のように支持ボールと1個おきにスペーサボールを配置した場合、支持ボール数は半減する。ただし、ボールねじのボールとねじ溝面の接触は曲面どうしの接触となり、負荷増加に伴う接触面積の増加も加味すると、支持ボールのみで負荷を受ける場合は、開発品仕様での耐久負荷時のボールねじ溝面の最大面圧は、10%以上増大する(図7)。

そのため、開発品においては以下のように検討し、設計した。

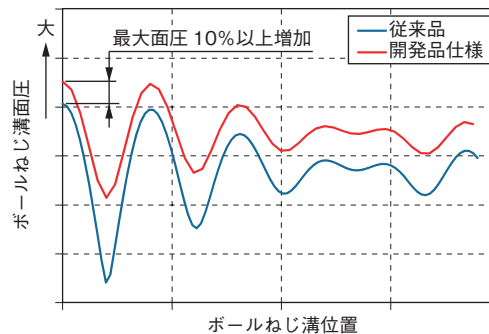


図7 ボールねじ溝面圧分布  
Surface pressure distribution in ball screw groove

### 4.1 ボール径差の設定

ステアリングギヤにかかる負荷は常に一定ではなく、車速が高いほうが負荷は低下し、操舵角度が大きくなれば負荷は増加する。同じく、ボールねじが受ける負荷も常に変化している。

2章で述べたように、ボールねじのトルク変動が発生して運転者が違和感を覚えるのは、主にレーンチェンジなどの小操舵を繰り返す場合であり、車速が高く、操舵角度が小さい、すなわち負荷としては比較的低い場合である。

そこで開発したボールねじでは、低負荷領域と高負荷領域でスペーサボールの働きを分けて考えた。

低負荷領域では、運転者がトルク変動を感じやすいため、スペーサボールは負荷を受けることなく、完全にその機能を果たし、ボール間のすべりを抑制して、ボールねじをスムーズに作動させる。

高負荷領域では、ボールねじの耐久性を考慮して、スペーサボールも負荷の一部を分担できるようにすることにより、耐久性の低下を抑制する。

この二つの働きを両立できるように、支持ボールとスペーサボールの直径差を検討した。

まず、トルク変動が課題となる走行条件と操舵条件などを決定し、その条件でボールねじに加わる負荷を算出した。この負荷により支持ボールと、ボールねじ軸およびボールねじナット間で発生する弾性変形量を求め、その変形量を支持ボールとスペーサボールの直径差とした。

この設定により、ボールねじ軸と支持ボール間、支持ボールとボールねじナット間のそれぞれの弾性変形量の合計が支持ボールとスペーサボールの直径差を超えると、スペーサボールはボールねじ溝面と接触を始め、負

荷の一部を分担して耐久性の低下を抑制する。

直径差を設定したときの、耐久試験中のボールねじ溝面の面圧分布を図8に示す。最大面圧はスペーサボールなしの状態に対して5%程度の上昇に抑えることができた。

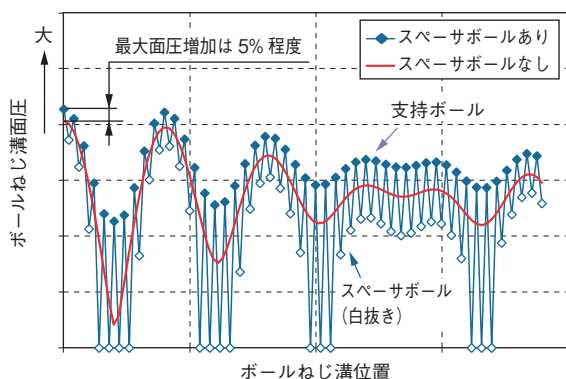


図8 スペーサボール仕様のねじ溝面圧分布  
Surface pressure distribution in ball screw groove with spacer balls

## 4.2 すべり摩擦のボールねじ耐久性の影響

ボールねじの耐久性については、すべり摩擦が影響していることが知られている。

開発品ではトルク変動と耐久性の両立を考慮して4.1項で述べたボール直径差を設定したため、スペーサボールも支持ボールと同じく負荷の一部を分担する。

しかしながら、分担する負荷は支持ボールより小さい。それゆえ開発品は、耐久試験中にボールどうしが接触するような状態が発生しても、多点接触により生じるすべり摩擦力は、支持ボールのみのボールねじと比較して小さくなる。つまり、開発品のスペーサボールは高負荷下においては、支持ボールとしての機能を持ちながらも、スペーサボールとしての機能、すなわちすべり摩擦の緩和機能も有していると考えられる。

高負荷条件下でのスペーサボールによるすべり摩擦緩和の効果は、面圧： $P$ とすべり速度： $V$ を使って以下のように考察できる。

(1)ボールねじでは、ボールねじ軸とボール、ボールとナットの接点のリード角が互いに異なるため、必然的にすべりが発生する。このすべりは、全てのボールねじが持つもので、固有すべりとも呼ばれる。

このPV値は、開発品の諸元では数MPa m/s程度になる。

(2)ボールどうしの接触が発生した場合、ボール間すべり

が生じる。

このPV値は、開発品においては最大で(1)項と同程度の数MPa m/s程度となる。

(3)ボールどうしの接触が発生した場合、ボールは接点が3点(ボールとボールねじ軸、ボールとナット、ボールとボール)以上の多点接触状態となる。

このときのボールとボールねじ軸、ボールとナットのPV値は、(1)項では数MPa m/s程度であったが、最大で数百MPa m/sにまで達する可能性がある。

(4)ボール間すべりが発生した場合のボールとボールねじ軸、ボールとナットのPV値は非常に大きくなるため、スペーサボールによるボール間すべりの抑制は、ボールねじの耐久性向上に非常に有効となる。

## 4.3 実機耐久試験結果

実機耐久試験後の支持ボールの外観を図9に示す。

スペーサボールありの場合のほうが明らかに表面の状態は改善されている。ボールねじ溝の摩耗量もスペーサボールなしの場合よりも小さくなっており、スペーサボールが有効に機能していることが示された。

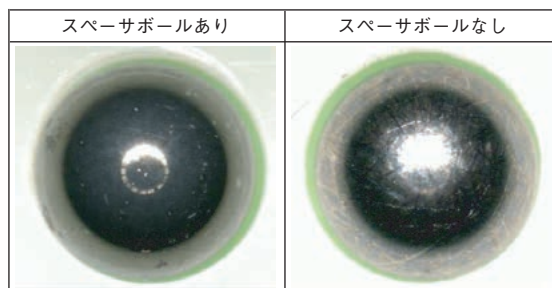


図9 耐久試験後の支持ボールの外観  
Ball after durability test

## 5. おわりに

今回、RP-EPS用スペーサボールを開発し、RP-EPSの性能、ボールねじ耐久性向上に貢献することができた。今後、需要増が見込まれるRP-EPSに対し、順次展開していく予定である。

※1 RP-EPSは、株式会社ジェイテクトの登録商標です。

## 参考文献

- 1) 井澤 實：ボールねじ応用技術，工業調査会(1993) 75-90.

## 筆 者



朝倉正芳\*  
M. ASAKURA



内山 清\*  
K. UCHIYAMA



井上俊治\*\*  
S. INOUE

\* ステアリング事業本部  
第2ステアリングシステム技術部

\*\* ステアリング事業本部 第2実験解析部