

電動ブレーキ用ボールねじの開発

Development of a Ball Screw for Electric Brakes

新本元東 G. ARAMOTO 小林 恒 T. KOBAYASHI 田代明義 A. TASHIRO

We have developed a non-circulating ball screw with a simple structure for the actuator of the EMB (Electro Mechanical Brake) which eliminates the need for a complex ball circulating part. Since there is no circulating part, it is necessary to prevent the ball from falling off during stroke. When the load is small, the ball is fixed by an elastic holding, and the spring is contracted by the revolution of the ball during braking, then the ball returns to its original position when the brake is released. This paper introduces the configuration and use of non-recirculating ball screws and demonstrates their effectiveness for use in electric brakes.

Key Words: EMB, Electro Mechanical Brake, ball screw, non-circulating, spring

1. はじめに

近年の環境規制に対応するため自動車の電動化が急速に進んでおり、その一つとして電動ブレーキキャリパ (EMB : Electro Mechanical Brake) の市場拡大が予想される。現在、すでに電動パーキングブレーキ (EPB : Electro Parking Brake) が量産されており、ボールねじの使用例もある。ボールねじはモータの回転運動を直線運動に効率よく変換する機構として有望であり、EMBに適している。EMBの機構としては、図1に示すように直動機構によりピストンで押されたパッドでディスクを両側からはさんで制動する。

一般的に、ボールねじはストロークする際にボールが軌道から脱落しないよう循環させる機構が主流である¹⁾ (図2)。循環させる部品にはさまざまなタイプがあるが、構造として複雑化し、体格が大きくなるというデメリットがある。当社ではEMBがブレーキ制動時に必要とするストロークが小さいことに着目し、循環部品を廃止した非循環のボールねじを開発しているのので、紹介する。

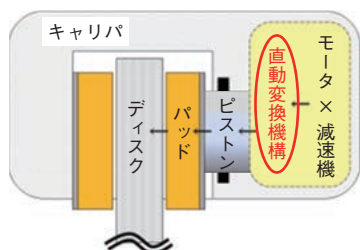


図1 電動ブレーキキャリパの構成
Configuration of electric caliper EMB

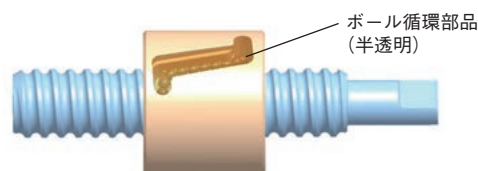


図2 循環ボールねじ
Circulating ball screw

2. 非循環ボールねじの構造と課題

非循環ボールねじは循環部品の代わりにナット軌道にばねを複数配置した構造となっている。負荷が小さい状態ではボールを弾性保持により固定し、ブレーキを作動させる際にはばねがボールの公転によって縮み、ブレーキ解除時にはボールが元の位置に戻る仕組みとなっている (図3)。

ブレーキに求められる厳しい要求仕様を満足するためには、ナット内部のばねを最適化する必要があり容量、体格、効率のバランスを追求しなければならない。ただし、ばねはナット内部に円弧状に曲げられて使用されることから一般的なストレート状での使用とは異なる挙動を示し、その把握が重要となる。また、トルク低減や耐久性も課題となる。

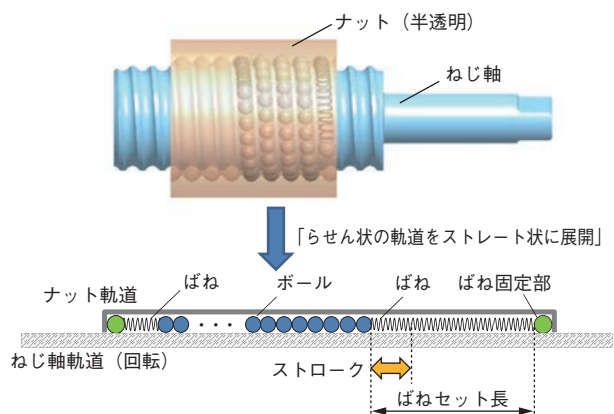


図3 非循環ボールねじ
Non-circulating ball screw

3. ばねによるボール位置の制御

非循環ボールねじにはストローク中にボールが軌道外に流出しないための制御機構として、ナット軌道両端にボールを挟み込むばねが配置されている。こうすることで、ブレーキ作動によるボールねじストローク時にはボールはばねを圧縮させながら公転し、無負荷に近い場合はボールを公転させずにばね力がつりあう位置を初期位置として、弾性保持することが可能である。

したがってここでは、無負荷時にボールが初期位置から外れると、ストローク時のばね圧縮量が増えてばね破損につながる恐れがある。そこで、3.1 でボールを初期位置に戻すメカニズムに関して述べる。

次に、ボールを初期位置で弾性保持するためのばね力とばねの許容ストロークを設定する必要があるが、ばね外径は軌道との摩擦が生じるため、ばねがストレートの状態とはばね力やたわみ方が異なる。

そこで、3.2 で摩擦を推定し、正確なばね力と疲労検討に基づいた許容ストローク設計について明らかにする。

3.1 ボールを初期位置へ戻すメカニズム

ボールねじはアキシアル荷重を受ける転がり軸受と軌道形状が近いので、共通項が多くある。一方で、ボールねじにはリードが設けられているため、ボールと軌道の接触部にボールねじ特有のすべり成分が存在し、ストローク時にボールが軌道に食い込むように移動する。移動する方向はストローク方向に応じて逆転するため、往復のボールの移動量が若干異なる²⁾。また、ボールねじの精度に起因して発生するボールの進み遅れも発生するため、ブレーキ作動の前後でピストンやナット位置は変わらない一方、ナット軌道に対するボールの微妙な進み遅れは機構上避けられずボール位置は変化する。そこで、初期位置からのボールずれを元に戻す手段としては、ボールをばね力で強制的に動かす、追加ストロークによってボールを公転させる、といった方法が考えられる。

円弧状に配置されたボールをばね力で動かす場合、軌道との摩擦によりボール末端まで伝達するばね力は減衰する。ボールねじのように何巻もボールが連なると、ば

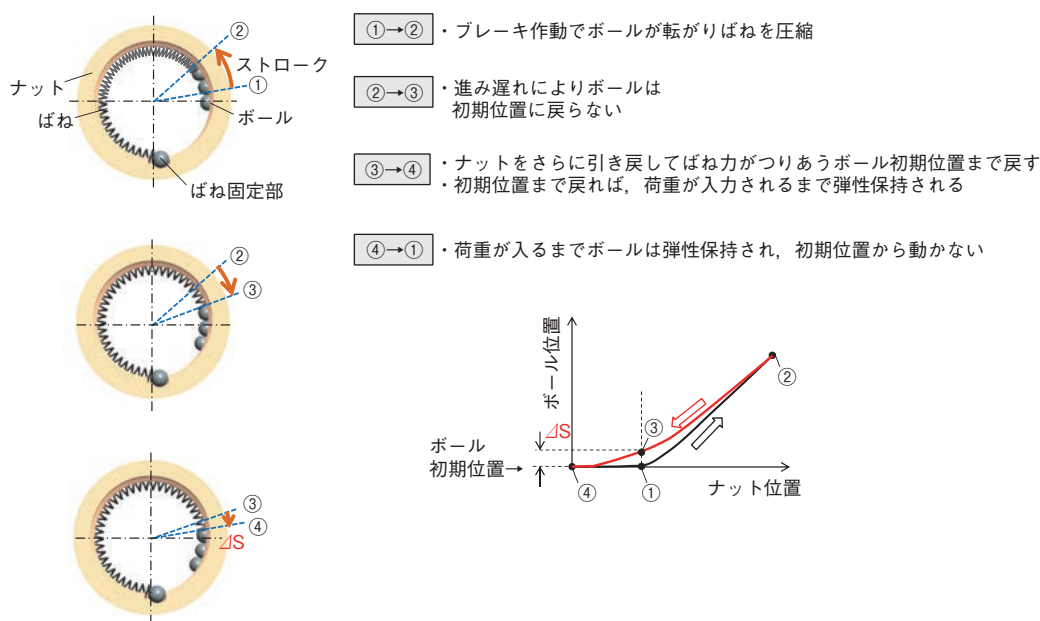


図4 ストロークによるボール初期位置へ戻すメカニズム
How to return to the ball initial position by stroke

ね力で全てのボールを動かすことは現実的ではない。よって、当社ではボールをばね力で動かす設計ではなく、ストロークによる調整を想定している。

同じ軸力で比較した場合、上述の通りボールを動かす荷重は非常に大きいですが、ボールの公転を止める荷重は非常に小さくて済むことが計算および実測から分かっている。軽く予圧を与える程度であれば、開発品のボールねじは数 N 程度の荷重で十分にボールの公転を止めることができる。したがって、図4の通り、ストローク後に軸力がゼロ付近になった後(②→③)、ボール位置がΔSだけ初期位置から外れたとすると、さらにナットをわずかに引き戻してボールを初期位置に戻せば良い(③→④)。

3.2 軌道間との摩擦を考慮したばね力と許容ストローク

軌道にばねを配置すると、ばね圧縮時にナット軌道からの反力によってばね外径に摩擦力が発生するため、ばねがストレートの状態(一般的なばね計算の前提条件)での計算結果をそのまま使うことができない。したがって、この摩擦力を考慮したばね力の推定式を独自で作成

し、推定式から得られた値と実測値がよく一致することを確認している(図5)。

同様にばねピッチ変化を検討すると、ばねはボールと接触する側が最も圧縮することが分かったため、ばね疲労検討はこの領域で行えば良い(図6)。ばねが破損するまで耐久評価を実施すると、やはりこの領域で破損することが確認できた(図7)。また、固定側のばねは徐々に圧縮量が小さくなっていくため、一定以上長くすると、圧縮しない無駄なスペースとなってしまふ。以上を考慮して、ばね長およびストロークが決まる。

このようにして設計したばねを配置すると、ストローク時のトルクは軸力に応じて線形に増加するが、ばねを全圧縮近くまでストロークさせない限りトルクは安定している(図8)。

ストロークを大きくさせたい場合は、容量・体格とのバランスを考慮しながらリードを大きくすることが有効である。

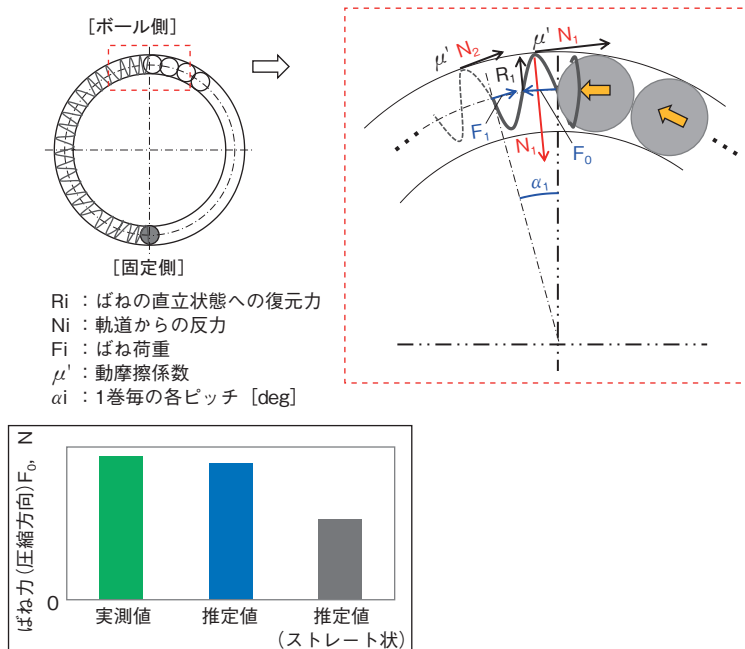


図5 軌道間摩擦を考慮したばね力
Spring force with friction from raceway

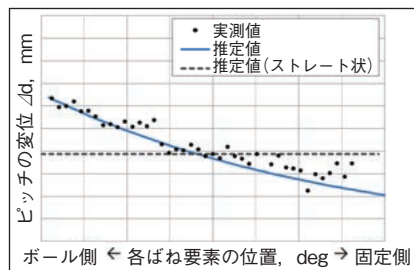
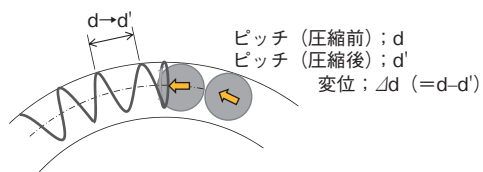


図6 軌道間摩擦を考慮したばねピッチ変化
Pitch change considering friction from raceway



図7 耐久評価によるばね破損部位の確認
Confirmation of spring breakage position by durability test

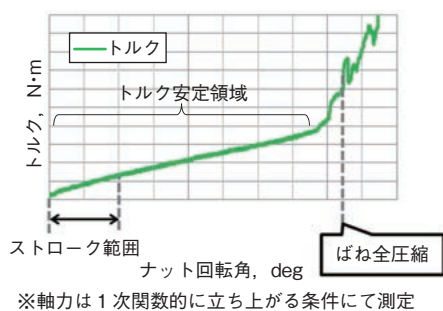


図8 ボールねじストロークに応じたトルク安定性の確認
Confirmation of torque stability according to ball screw stroke

4. トルク損失の低減

動力源となるモータの小型化にはボールねじ効率の向上が有効であるが、非循環ボールねじはばね力によりボール間のすきまが詰まった状態で公転するため、ボール間の摩擦低減は循環ボールねじよりも重要となる。摩擦低減の方法としては、ボール径が数十 μm 小さいスペーサボールをボール間に配置することでスペーサボールの自転方向をボールと逆転させて摩擦低減する方法が一般的である^{1), 3)} (図9)。

また、スペーサボールの代わりにボール間詰まりを軽減するために自由長が短いばねを配置する方法も考えられる (図10)。この構造では、ばねを圧縮する方向に進み遅れを吸収することができるため、ボール間の摩擦をさらに低減させることができると考え評価した。同数のスペーサボールと比較した結果、同一軸力に対するトルク値が改善したことを確認できた (図11)。さらに、EMB用ボールねじには、従来のブレーキフルードではなく、グリース潤滑が想定されるためボール間にばねを配置することは、グリース保持や供給が有利になるものと期待できる。

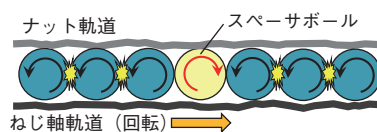


図9 スペーサボールによるボール間摩擦低減
Friction reduction between balls by spacer balls

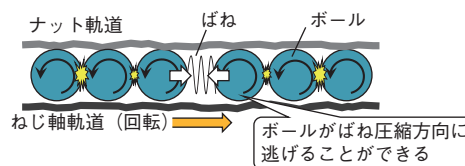


図10 ばねによるボール間摩擦低減
Friction reduction between balls by spring

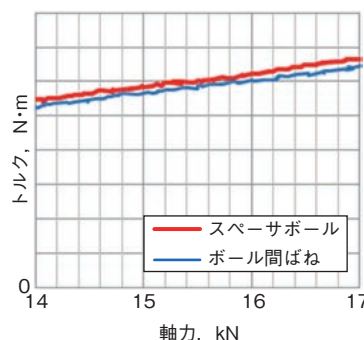


図11 スペーサボールおよびばねを使用したトルク値の比較
Comparison of torque values using spacer balls and springs

5. 耐久性

車両での使用を想定した条件にて耐久評価を実施した結果、十分な耐久性を確認できた（図12）。

ストレート状態のばねを用いたが、評価後品の外観は新品と同様で破損は見当たらなかった（図13）。

したがって、電動ブレーキキャリパには非循環ボールねじが有効であることが示された。

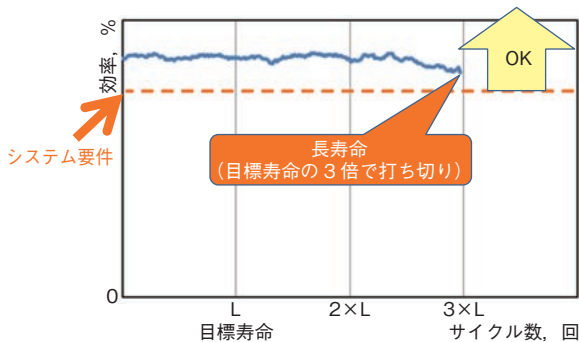


図12 耐久試験結果
Durability test result

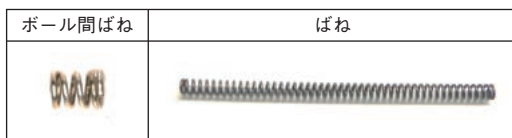


図13 耐久評価後のばね外観
Spring after normal temperature durability test

6. おわりに

ここでは、電動ブレーキキャリパへの用途として、循環部品を用いない非循環ボールねじの適用を検討した。まず、ボールねじの循環タイプと非循環タイプを比較後、非循環ボールねじのボール位置の制御メカニズムについて明らかにし、トルク損失の低減についても検討した。さらに、非循環ボールねじの耐久試験を行い、実用に十分耐えられることを確認した。その結果、非循環ボールねじが電動ブレーキキャリパに適用できる可能性を明らかにした。

今後、軌道形状やばね諸元を最適化し、ストロークや負荷容量などの改善を含めて開発を進めていく。

参考文献

- 1) 井澤 實：ボールねじ応用技術，工業調査会(1993) 9-21, 75-90, 173-176.
- 2) 上田真大, 下田博一：精密工学会誌, Vol. 76, No. 12 (2010)1371-1376.
- 3) 朝倉正芳, 内山 清, 井上俊治：JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1015(2017)44-48.

筆者



新本元東*

G. ARAMOTO



小林 恒**

T. KOBAYASHI



田代明義*

A. TASHIRO

* 軸受事業本部 自動車軸受開発部

** 研究開発本部