

高効率プラネタリ用針状ころ軸受の開発

Development of Needle Roller Bearing for High-efficiency Planetary Gear

谷山宗久 M. TANIYAMA 小谷一之 K. KOTANI 中島義仁 Y. NAKASHIMA 佐藤崇彦 T. SATOU

In order to improve the fuel efficiency of vehicles to counter the current environmental crisis, the development of automatic transmission (AT) has continued to progress for increasing gear steps to multi-speed, requiring planetary bearings for high-speed revolution. Moreover, planetary bearings for ATs are used under severe conditions such as high moment and centrifugal force. This paper describes the characteristics and design technique of the planetary gear bearing developed by our company which facilitates high efficiency and high-speed revolution.

Key Words: needle roller bearing, planetary gear, automatic transmission, cage and roller

1. はじめに

乗用車の変速機は、イーゼードライブを実現する自動変速機が主流となってきている。近年の地球環境問題に対応し、レシプロエンジンを動力源とした自動車だけでなく、エンジンとモータを組み合わせたハイブリッド自動車（以下、HEV）や、モータのみで駆動する電気自動車などと、多彩になってきている。また、従来のレシプロエンジンも自動変速機の進化などに伴い、燃費向上が進められている。

近年、自動変速機として無段変速機（以下、CVT）を採用した車種が増加し、デュアルクラッチトランスミッションも登場するなど多様化しているが、トルクの大きい大排気量車ではプラネタリギヤ機構で変速を行うステップ式オートマチックトランスミッション（以下、AT）が主流となっている。

ATでの低燃費化対策としては軽量化、高効率化および多段化による減速比の増大が進められている。このため、図1に示すようにATのプラネタリギヤインナに用いられる針状ころ軸受（以下、プラネタリ軸受）は、より高速回転への対応が必要となってきている。これに伴い、従来主流であった総ころ形の針状ころ軸受に代わり、ラジアル保持器付き針状ころ軸受（以下、ケージ&ローラ）が使用される例が増えている。

また、HEVの動力切換部でもプラネタリギヤ機構が使用されている。HEVではモータ走行時にオイルポンプが停止することにより、潤滑油の供給が止まるという

特徴があり、プラネタリ軸受の潤滑性向上のため、ケージ&ローラが使用される例も増えつつある。

本報では、高効率化および高速化に対応したプラネタリ用針状ころ軸受開発の取り組みを紹介する。

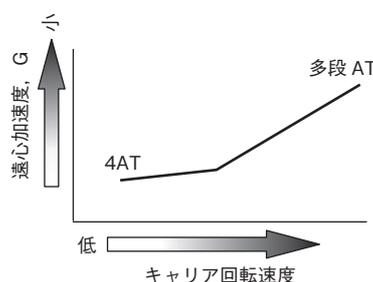


図1 ATの多段化による影響
Effects of multi-speed AT

2. プラネタリ軸受の取組み

図2にシングルピニオンタイプのプラネタリギヤ機構を示す。最近では、ダブルピニオンタイプやラビニオンタイプなどの各種の機構を用いて多段化したATが多いが、軸受への課題は、それら軸受においてもシングルピニオンタイプに使用されるプラネタリ軸受と同じである。

近年の地球環境問題に対応して、軸受の遠心加速度や自転の回転速度は高まっている。これに伴い、プラネタリ軸受には長寿命化、保持器強度の向上および耐焼付き性の向上が要求される（図3）。これらの要求に対応して開発した長寿命プラネタリ軸受、高速回転プラネタリ軸受、および超薄肉スラスト針状ころ軸受を紹介する。

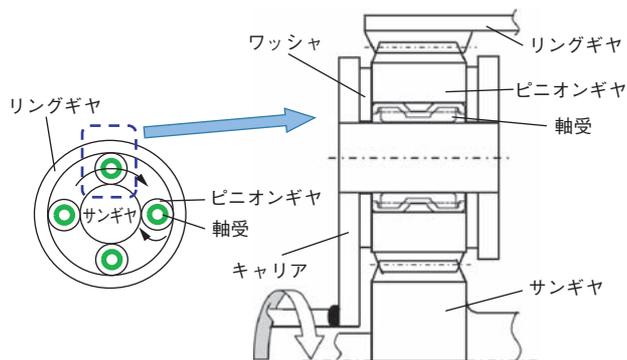


図2 シングルピニオンタイプのプラネタリギヤ機構
Mechanism of single pinion type planetary gear

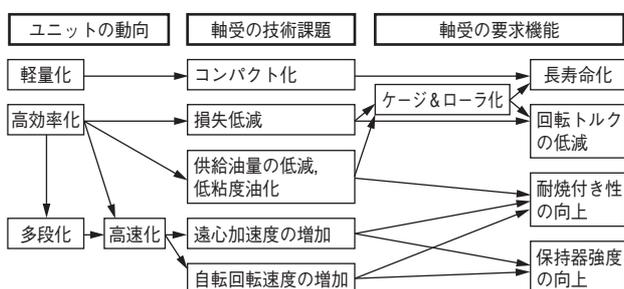


図3 プラネタリ軸受の要求機能
Required functions of planetary bearing

2.1 長寿命プラネタリ軸受

ATのプラネタリギヤにはヘリカルギヤが用いられるため、ギヤインナのプラネタリ軸受には接線力 F_t 、半径方向力 F_r 、およびねじり角による軸方向力 F_a が作用している(図4)。軸方向力 F_a は、軸受にモーメントとして作用する。モーメントはラジアル荷重に付加される形で作用するため、モーメントによりギヤが傾く。このため、ころ転動面の端部の接触面圧が高くなり限界を超えるとエッジロードが発生する。エッジロードは寿命を極端に低下させるため、ころ表面に適正なクラウニングを与えてエッジロードを防止する必要がある。

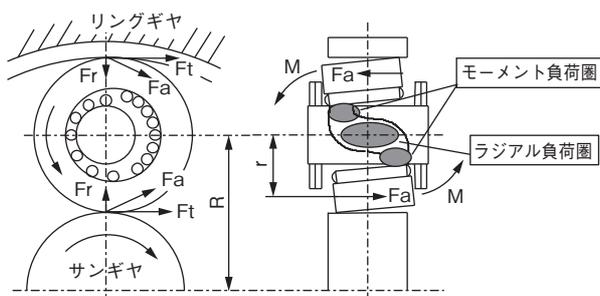


図4 ピニオンギヤに作用する力
Forces acting on pinion gear

従来の総ころ形のプラネタリ軸受は、ケージ&ローラに対して負荷容量が大きいという特長がある。しかし、隣り合うころ同士がしゅう動と衝突を繰り返すため、高速で回転する場合、回転トルクが大きいことや、焼付き発生の問題がある。

これに対し、ケージ&ローラは、ころ同士の直接の接触がないことから、高速で回転することができる。しかし、ころ数が総ころ形より少ないため負荷容量が小さく、寿命が短いという課題があった。このような背景により、ケージ&ローラの寿命の向上に取り組んだ。

プラネタリ軸受はピニオンギヤ(外輪)、ころ、シャフト(内輪)の中で、シャフトが最も損傷しやすい。一般的なラジアル針状ころ軸受は、外輪固定、内輪回転の状態で使用される。この場合、接触面圧は曲率の関係から、内輪のほうが外輪よりも高いが、繰り返し数は、固定輪である外輪の方が内輪よりも多い。このため、寿命への影響の観点では、内輪と外輪の負荷は大差がない。これに対し、プラネタリ軸受は、ピニオンギヤ(外輪)回転、シャフト(内輪)固定の状態で使用される。シャフトは接触面圧が高いだけでなく、繰り返し数も多いため、負荷条件が最も厳しいためである。

また、モーメントの作用で、ころ転動面の端部の接触面圧が高く、潤滑油の油膜も薄くなることから、油膜切れによる表層の剥離が発生しやすい。そこで、当社はこれらの課題に着目し、従来の寿命を大幅に向上させた軸受を開発した。寿命の向上は、以下の二つの手法の組み合わせによるものである。

一つ目は、ころの表面粗さを向上させて鏡面状に仕上げることにより、油膜パラメータ λ を向上させることである。しかし、これだけでは寿命向上の効果は小さい。そこで二つ目として、シャフトの疲労強度を向上させる取り組みを実施した。従来は、シャフトに特殊熱処理を施して寿命を改善していたが、これにショットピーニングによる表面改質を追加し、高い残留圧縮応力を付与(図5)することで、標準の軸受に対して8倍の寿命を達成した(図6)。

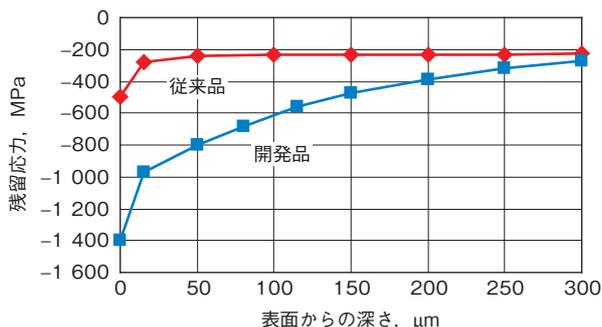


図5 残留圧縮応力測定例

Example of residual compressive stress measurement

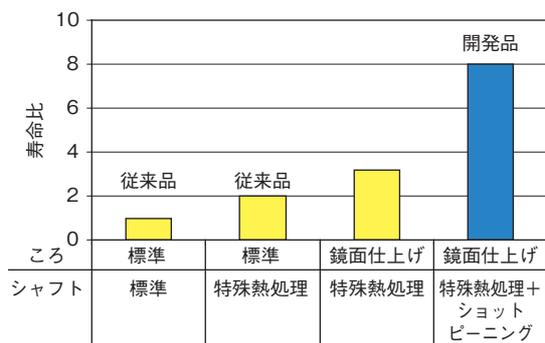


図6 寿命試験結果
Life test results

2.2 高速回転プラネタリ軸受

保持器には遠心加速度により、保持器自身の質量による遠心力が作用する。このため、保持器はピニオンギヤ内径に押し付けられてピニオンギヤと一緒に回転しようとする。しかし、ころはピニオンギヤの約1/2の速度で公転するため、保持器外径面とピニオンギヤ内径面の摩擦力に相当する力でころが保持器を押し返すことになる。

さらに、ころにはサンギヤ中心の公転による遠心力が働いているため、この遠心力によりころ1本1本が保持器に負荷を与える。

これらの力は保持器の自転により繰り返し作用するため、保持器に発生する応力が疲労限以下となるように設計する必要がある。当社では、負荷の大きさに応じて、図7に示す保持器の形式を選択して適用している。遠心力が低い場合は、樹脂保持器を適用し、遠心力の増加に伴い鉄保持器を適用し、標準タイプと高速タイプを使い分けている。

これまでの開発では、保持器のリブや柱の根元の応力は高くなる傾向があり、設計検証が難しい部位であることが分かっている。この応力を低減させるため、当社独

自の塑性加工技術を活用して、保持器の断面を最適に成形し、高強度の保持器を開発した。

図8に標準タイプ、高速タイプ（従来品）、高速タイプ（開発品）の保持器の比較表を示す。開発品は保持器強度が高いため、従来品より応力を12%低減することができた。これにより従来品よりも、12%大きな遠心加速度にも対応できるようになった。

また、従来と同じ使用条件の下では、保持器が高強度であるため、ころ本数を増加させることも可能であり、軸受の動定格荷重が増加することで、寿命の向上も可能となった。

動定格荷重Cの増加から計算した寿命の向上は約1.25倍であり、前項で紹介した長寿命プラネタリ軸受の技術と組み合わせることにより、標準の軸受に対して10倍の長寿命を達成している。

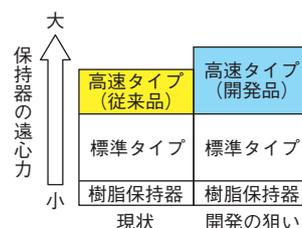


図7 プラネタリ軸受の保持器形式
Types of planetary bearing cages

	標準タイプ	高速タイプ	
		従来品	開発品
形状			
質量, g	4.9	4.4	4.2
ころ本数	12	12	13
2 000Gでの発生応力, MPa	270	170	149
定格荷重 C/C0, kN	17.5/22.9	18.0/24.0	19.3/26.0

図8 鉄保持器の性能比較
Comparison of steel cage performance

近年、ATの多段化にともない、キャリアの公転半径や、軸受サイズが大きくなり、保持器の遠心力は増加してきている。保持器の遠心力が大きく、さらに自転の回転速度が速い場合は、ピニオンギヤ内径面と保持器外径面の摩擦力が大きいため、保持器の外径面が焼付くことも考えられる。

保持器外径面の焼付きの防止には、ATユニットでの

プラネタリ軸受への供給油量を増量することが必要だが、ATの高効率化の観点では、供給油量を大幅に増量できない場合がある。その場合、保持器外径面とピニオンギヤ内径面の摩擦力を低減する目的で、保持器にコーティングを施すこともある。

保持器外径面とピニオンギヤ内径面の接触面圧 P と、しゅう動速度 V の積である摩擦指標 PV 値は、保持器へのコーティングにより、1.3 倍向上することを実験により確認している。

3. 超薄肉スラスト針状ころ軸受

当社は、プラネタリ軸受の周辺部品の開発にも取り組んでいる。

プラネタリ軸受では、ころ軸受特有のスキュー（軸受中心軸に対し、ころの自転軸が傾く）により軸受に内部アキシャル荷重が発生する。これをスキュー力と称する。ピニオンギヤの精度やキャリアの剛性の影響により、さらに大きなスキュー力が発生することも考えられる。スキュー力は、保持器端面よりサイドワッシャに作用する。サイドワッシャはすべり部位に使用されていることから摩擦トルクが大きいため、転がり軸受化によるトルクの低減を目的として、小型で超薄肉のスラスト針状ころ軸受（図9）を開発した。開発品は、外径 $\phi 1\text{mm}$ × 長さ 2.5mm の小径ころを使用し、レース2枚付きで厚さ 2mm の世界最小クラスのスラスト針状ころ軸受である。

一般的なスラスト針状ころ軸受は、標準寸法の外径 $\phi 2\text{mm}$ のころを使用する。そのため、ころ外径を半分の 1mm まで小さくすることを目標としたが、長さが短いスラスト用のころでは当初、加工が難しかった。しかし、外径を 1mm まで小さくする加工技術の確立により、超薄肉スラスト針状ころ軸受を開発することができた。

現行の銅ワッシャと、スラスト針状ころ軸受の摩擦トルクを比較した試験結果を図10に示す。軸受単体では、80%以上のトルクの低減効果を示している。プラネタリ軸受のスキュー力が大きい場合に、ピニオンギヤ端面の摩擦トルクの低減に効果がある。

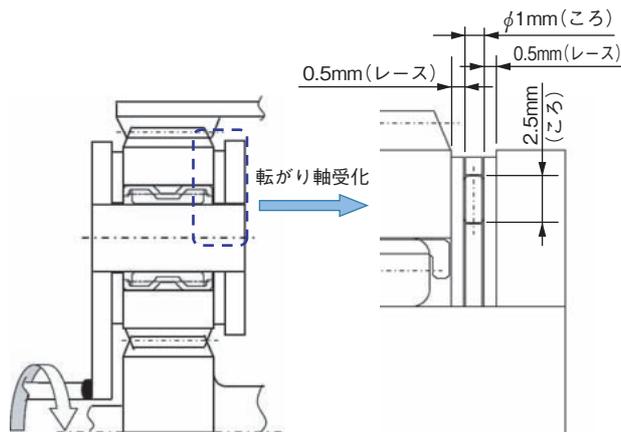


図9 超薄肉スラスト針状ころ軸受
Ultra-thin section thrust needle bearing

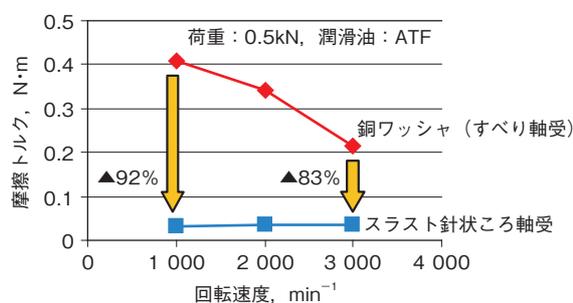


図10 軸受単体試験結果
Bearing bench test results

4. おわりに

以上、高効率化および高速化に対応して開発したプラネタリ用針状ころ軸受の効果を図11に示した。今後も低燃費化はますます進行していくことから、今回の開発を基本として、今後の動向に対応した軸受製品を開発していきたい。

軸受	開発軸受の効果		
長寿命プラネタリ軸受	寿命向上： 標準品の8倍		寿命向上（合計）： 標準品の10倍
	ころ本数： 1本増加	寿命向上： 1.25倍	
高速回転プラネタリ軸受	保持器応力：12%低減		
	→遠心加速度対応：12%向上		
	保持器外径面のコーティング追加 →摩擦指標PV値：1.3倍向上		
超薄肉スラスト針状ころ軸受	サイドワッシャの転がり軸受化 →摩擦トルクの80%以上低減（軸受単体）		

図11 開発軸受の効果まとめ
Summary of effects of developed bearing

参考文献

- 1) 千原勝彦, 佐藤崇彦 : Koyo Engineering Journal, No. 168, (2005)42.
- 2) 北村昌之 : Koyo Engineering Journal, No. 164, (2003) 19.

筆者



谷山宗久*
M. TANIYAMA



小谷一之**
K. KOTANI



中島義仁*
Y. NAKASHIMA



佐藤崇彦***
T. SATOU

- * 軸受事業本部 ニードル事業開発部
- ** 軸受事業本部 中部テクニカルセンター
- *** 軸受事業本部 東部テクニカルセンター