

グループ技術力を結集した波動歯車減速機用超薄肉玉軸受の開発

Developing Ultra-Thin Ball Bearings for Strain Wave Gear Drives by Integrating JTEKT Group Technologies

早川恵司 K. HAYAKAWA 斎藤敏和 T. SAITO 吉田 亘 W. YOSHIDA
長谷川賢一 K. HASEGAWA 竹林忠之 T. TAKEBAYASHI

In recent years, the adoption of industrial robots has been rapidly expanding due to declines in the labor force and the acceleration of digitalization driven by IoT, big data, and artificial intelligence (AI). As part of this expansion, strain wave gear reducers have become more widely employed in robot joints. Bearings incorporated into strain wave gear reducers present unique performance requirements, including the ability to accommodate elliptical deformation caused by camshaft insertion while providing high load-carrying capacity. This paper describes how development of ultra-thin section ball bearings for wave gear reducers was promoted by JTEKT, along with the core technologies that support their design and performance.

Key Words: strain wave gear, ultra-thin ball bearing, high load capacity, fatigue strength, heat treatment, high ball count

1. はじめに

近年、労働人口の減少に伴い、さまざまな産業分野において技能の伝承が困難となっている。製造現場も例外ではなく、熟練作業者が不足する中、品質維持が重要な課題である。他方、IoT (Internet of Things)、ビッグデータ、AI をはじめとするデジタル技術の進展により、製造現場への産業用ロボットの導入が加速しており、品質の確保および向上が図られている。

産業用ロボットの関節に搭載される精密減速機には、高精度、高剛性の特性と、小型・軽量および長寿命であることが求められる。これらの要求を満たす機構として、小型から中型のロボットに広く採用されているのが波動歯車減速機である。波動歯車減速機には超薄肉玉軸受が組み込まれており、一般的な玉軸受とは異なり、だ円変形への追従性と高負荷容量の両方が求められる。

本報では、当社が推進する波動歯車減速機用超薄肉軸受の開発内容と、それを支えるコアコンピタンスを紹介する。

2. 波動歯車減速機

2.1 波動歯車減速機の構造

図1に示すとおり、波動歯車減速機は内歯歯車のサーキュラスプライン、外歯歯車のフレックスプラインおよびフレックスプラインに圧入されるウェーブジェネレーターから構成される。ウェーブジェネレーターは、だ円形状のカム軸と、これに組み込まれただ円変形が可能な超薄肉玉軸受からなる。

サーキュラスプラインの歯数は、フレックスプラインの歯数より数枚多く設定されている。入力側のウェーブジェネレーターにより、フレックスプラインがだ円

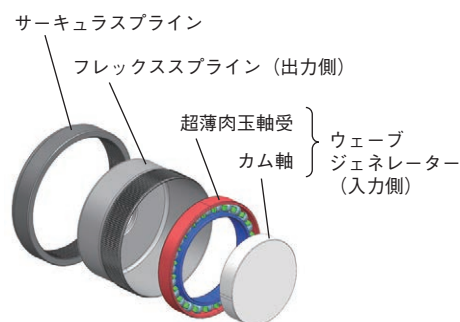


図1 波動歯車減速機の構造
Strain wave gear structure

状に変形し、長径方向の2箇所でサーキュラスプラインとかみあう。一般的な使用形態では、入力側であるカム軸が1回転することにより出力側であるフレックスプラインが歯数差に応じて逆方向に回転する。このように、わずかな歯数差によって差動的な回転運動を生じさせる構造を有するため、波動歯車減速機は高い減速比を実現できることが特長である（図2）。

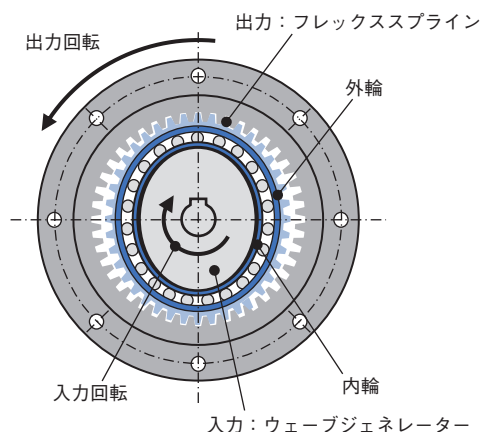


図2 波動歯車減速機の減速機構

Mechanism of deceleration using strain wave gearing

2.2 超薄肉玉軸受

ウェーブジェネレーター内部に配置される超薄肉玉軸受は、内輪にカム軸が圧入されることにより、真円形状から、だ円形状へと変形する。これに伴い、外輪は転動体を介して内輪と同期し、だ円形状に変形する。このだ円変形により、内輪および外輪のそれぞれに引張応力と圧縮応力が発生する。さらに、内輪では長径部および短径部が円周上で常に特定の位置にあるのに対し、外輪では長径部・短径部が入力回転（カム軸）の位相により円周方向に移動する。その結果、円周上の特定位置において引張および圧縮応力が繰り返し作用する。このような負荷条件下で使用されるため、軸受には十分な曲げ疲労強度が求められる。

また、外輪の長径部における外径寸法は歯車のかみあい状態に直接影響し、波動歯車減速機の位置決め精度に大きく影響する。したがって、超薄肉玉軸受では、回転中における外輪長径部の寸法変動を低減することが重要である。

さらに、波動歯車減速機の多くの破損は軸受に起因することが知られており、メンテナンスフリーのロボットを実現するには軸受の長寿命化は不可欠である。

2.3 超薄肉玉軸受の仕様

本節では、超薄肉玉軸受の代表的な設計仕様を示す。

本軸受は、玉径および玉数を増加させることで負荷容量を向上させるとともに、軌道輪の薄肉化を図り、曲げ変形に対する安全性を高めている。同一外径を有する軸受系列68の一般品を1とすると、開発品の超薄肉玉軸受では断面比（玉径／軸受高さ）1.2、軌道輪肉厚比0.6、玉数比1.3、負荷容量比1.5を達成した（図3）。さらに、同じ軸受系列の型番6805相当の場合、軌道周長に対する玉数を従来の50%から75%に増加させることにより、基本定格負荷容量を1.5倍に向上させた。また、発生応力を42%低減し、曲げ変形に対する安全性を向上させている（図4）。

これらの性能向上は、加工、熱処理および組立てを含む製造プロセス全体の最適化によって達成されており、当社で長年蓄積された各技術分野のノウハウが生かされている。

	一般品	開発品
軸受断面		
断面比 (玉径/軸受高さ)	1	1.2
軌道輪肉厚比	1	0.6
玉数比	1	1.3
負荷容量比	1	1.5

※1 現行の軸受系列68の一般品を1としたときの比率を示す

図3 超薄肉玉軸受（開発品）の設計仕様※1

Specifications for ultra-thin ball bearings

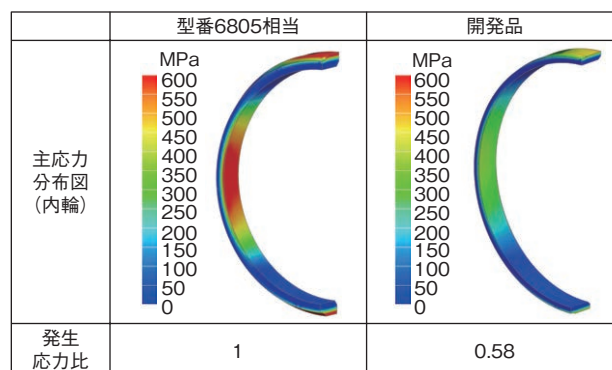


図4 超薄肉玉軸受の発生応力

Stresses developed in ultra-thin ball bearings

3. 波動歯車減速機用超薄肉玉軸受のコア技術

本開発では、波動歯車減速機用の超薄肉玉軸受に求められる性能を満たすため、熱処理技術、研削加工技術、組立て技術、解析技術といった当社が保有するコア技術を活用した。

これらにより、設計自由度の確保と量産時における再現性向上の両立を図った。以下では、それぞれの技術について解説する。

3.1 熱処理技術

軸受の内輪では、歯車の摩耗粉などの異物が軌道面にかみ込むことによって表面に圧痕が形成され、これを起点として剥離が発生する。剥離を防止するには、圧痕の生成を抑制するとともに圧痕部における応力の集中を低減する必要がある。

そこで当社は、軌道面硬さおよび残留オーステナイト量を最適化し、異物かみ込みや微小摩耗粉に対して高い耐性を有する新規熱処理プロセスを開発した。図5に示すとおり、本熱処理を適用した軸受は、従来仕様と比較して耐異物寿命が約3倍に向上することが確認された。製品に要求される品質を安定的に確保するため、炉内の温度分布などを考慮して各工作物を配置している。また、昇温過程における温度履歴のばらつきを低減するとともに均熱過程では温度の均一性を確保することで高精度な温度・雰囲気制御を実現している。

一方、外輪では、だ円変形の繰り返しにより、引張応力と圧縮応力が交互に作用するため、この曲げ疲労に対

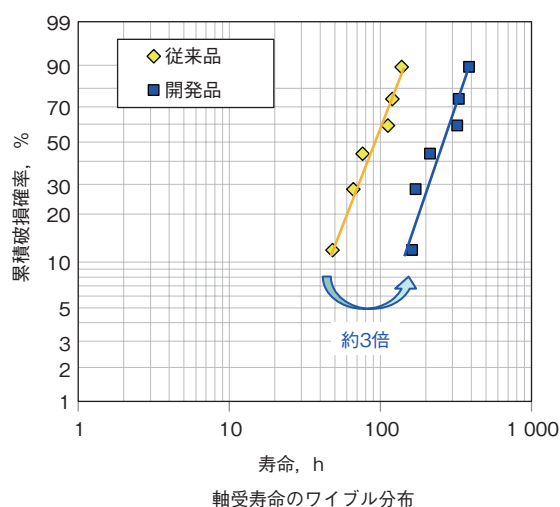


図5 異物存在下における軸受の高寿命化
Life extension of bearings under contamination

して十分な耐性を確保する必要がある。そのため、曲げ疲労強度の向上を目的として外輪に特殊な熱処理を適用した結果、従来の熱処理と比べて安全率が約1.3倍に向上した。

以上のように、軸受の内輪および外輪に対して温度・雰囲気制御の熱処理を行い、耐異物寿命や曲げ疲労強度の向上を実現した。本成果は、深溝玉軸受で培った基盤技術と豊富な知見に基づいている。

3.2 研削加工技術

当社では変形追従性の確保および各位相での長径の寸法ばらつきの抑制を目的として、薄肉加工にくわえ、軌道面・内径面・外径面との間の偏肉を低減する独自の研削技術を適用している。

本軸受の研削加工は、株式会社ジェイテクトプレジジョンベアリング（以下、JPB）において実施している。JPBは、1936年の創業以来、約90年にわたって軸受製造を行っており、加工に関する知見を蓄積している。薄肉の深溝玉軸受についても軸受系列60、69、68の加工実績を有している。一般的に、軸受は薄肉化するほど研削条件に対する感度が高くなるが、JPBでは、これまでに蓄積された加工ノウハウに基づき、従来の薄肉軸受と比較して厚みが約半分となる1mm未満の軸受についても最適な研削条件を設定できる。

薄肉軸受は半径方向の剛性が低いため、加工時の支持条件に起因する変形の抑制が重要である。外輪外径研削の研削構成を図6(a)に示す。研削砥石、調整車およびブレードの3点で工作物を支持する構成となっている。研削状態は図6(b)に示すとおり、センタレス研削によって外周面を創成している。本研削法は設定条件の影響を強く受け、特に工作物と砥石中心のオフセット量の設定が不適切な場合、真円度に三角形の周期誤差（三山

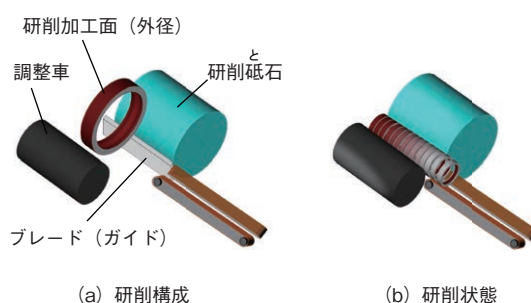


図6 外輪外径研削

Grinding the outside diameter of an outer ring

成分)が発生する。そのため、熟練技能者の経験に基づいた条件設定が重要である。

センタレス研削盤は、株式会社ジェイテクトマシニングシステム（以下、JMS）製を用いている。JMSは1963年よりセンタレス研削盤を生産しており、長年の製造実績を有している。

超薄肉玉軸受の軌道輪に偏肉が生じると、だ円変形が理想どおりに伝達されなくなる。その結果、フレックススプラインとサーキュラスプラインの歯車のかみあい状態に影響を及ぼし、減速機の位置決め精度が低下する。このため、軌道輪の偏肉を抑制することが弾性変形の均一化ならびに回転精度の向上において重要である。

内面研削（外輪軌道）の研削構成を図7(a)に示す。外輪軌道をバックングプレートおよびシューで支持し、研削砥石を内面に挿入する。図7(b)に示すとおり、研削砥石によって外輪軌道の内周面を研削する。研削砥石には一般砥石を用い、株式会社ジェイテクトグラインディングツール（以下、JGT）製のロータリーダイヤモンドドレッサーにより、総型ドレス成形を行っている。1975年の会社創立以来、JGTはロータリーダイヤモンドドレッサーを市場に提供しており、寿命、成形精度およびドレッシング性能の向上を目指し、開発を継続している。本ドレッサーにおいても高精度な輪郭形状を研削砥石へ転写することで外輪軌道面と外輪内径面の同時加工を実現している。

以上のように、本超薄肉玉軸受は、JMS製研削盤、JGT製工具およびJPBの加工技術といったジェイテクトグループが保有する技術の統合により実現されている。

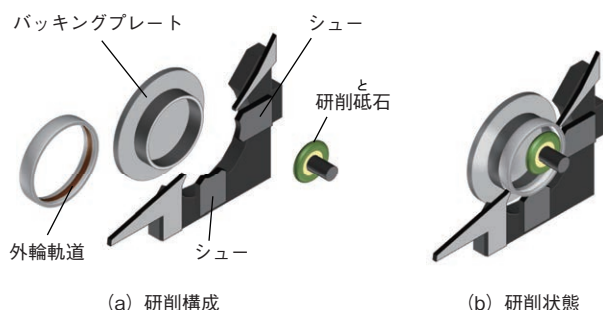


図7 内面研削（外輪軌道）

Grinding the raceway on an outer ring

3.3 組立技術

軸受寿命を延ばし、回転位置決め精度を向上させるためには、玉数の増加が不可欠である。これにより、接触点の周方向分布が高密度化され、外輪の弾性変位のばらつきが抑制されるため、外輪外径の長径方向における寸法変動が低減する。

玉の組み込みは、従来から一般的に用いられる挿入法ではなく、内輪および外輪の双方に弾性変形を付与する独自の手法によって実現した。その結果、同一外径を有する軸受系列68の一般薄肉玉軸受と比較して、玉数比1.3倍を達成した。

3.4 解析技術

軸受の内輪および外輪の長径部では、だ円変形に伴って外径面側に引張応力、内径面側に圧縮応力が発生し、短径部ではこれらが反転することが明らかとなっている。

当社では、蓄積された解析技術の知見に基づき、破損リスクの高い領域を特定し、軌道輪の肉厚および肩部形状の最適化により、十分な安全率を確保する設計指針を確立した。この指針に基づき、お客様が使用するカム軸のだ円形状および使用条件を考慮したうえで、軸受内部の負荷状態や軸受の寿命・強度を解析するツールを開発した。図8に示すように、本解析ツールに入力条件を設定することでFEM（Finite Element Method）モデルを迅速に自動生成し、設計者は効率的に解析できる。その結果、超薄肉玉軸受を設計するときの検討工数は従来比で約80%削減された。このような実績を積み重ね、本解析ツールをモデルベース開発（Model-Based Development：MBD）にも適用している。

以上のように、使用条件を考慮した解析結果を設計に反映するとともに玉・内輪・外輪に最適化された仕様を適用することで剥離寿命および変形に対する繰返し疲労寿命の向上を実現した。

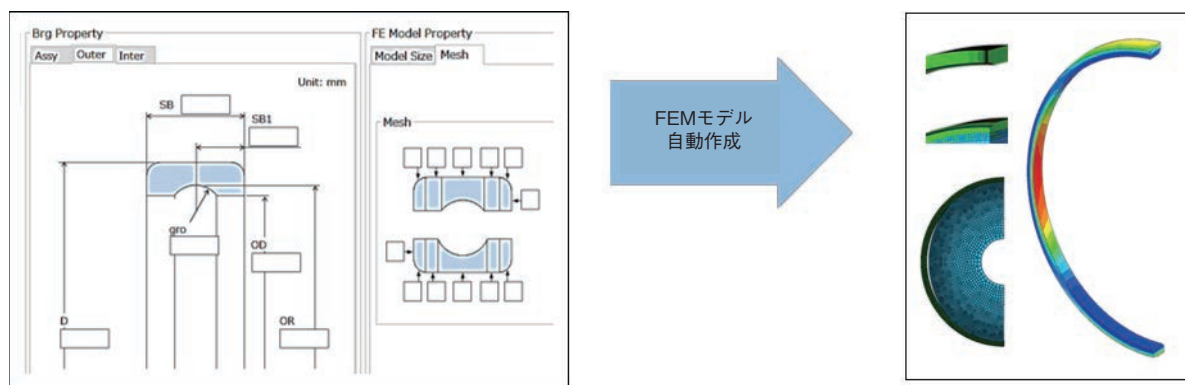


図8 超薄肉玉軸受を用いた FEM モデルの自動生成
Analysis method for ultra-thin bearings in strain wave gearing

4. おわりに

本報では、波動歯車減速機に用いる超薄肉玉軸受の開発と、それを支えるコアコンピタンスについて紹介した。当社は前身会社の光洋精工株式会社から軸受の製作事業に従事しており、90年以上にわたり技術を蓄積してきた。さらに、ジェイテクトグループ各社が保有する熱処理、加工、組立て、解析の技術を融合させることにより、本軸受の開発が実現した。今後は、産業用ロボットの高精度、高剛性、小型・軽量および長寿命に寄与することで、さらなる市場拡大と高付加価値化に貢献していきたい。

参考文献

- 1) 早川恵司：ロボット減速機用軸受の技術紹介, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1018(2021)54-57.
- 2) 株式会社ジェイテクト：超薄肉深溝玉軸受（高負荷容量タイプ）, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1016(2018)88.
- 3) 古吉正和：波動減速機，玉軸受，及び治具，特開 2017-36747 号(2017-2-16).
- 4) 日本機械学会：機械工学便覧，応用システム編 C7 メカトロニクス・ロボティクス，日本機械学会(2008).

筆者



早川恵司*
K. HAYAKAWA



斎藤敏和**
T. SAITO



吉田 亘***
W. YOSHIDA



長谷川賢一****
K. HASEGAWA



竹林忠之*****
T. TAKEBAYASHI

- * 産機・軸受事業本部 産機ソリューション技術部
- ** 生産技術本部 熱処理生技部
- *** イノベーション本部 材料研究部
- **** 産機・軸受事業本部 技術企画部
- ***** 株式会社ジェイテクトプレジジョンベアリング 生産技術部