

精密減速機用小モジュール歯車向け高精度ホブ盤の開発

Development of High Precision Gear Hobbing Machine for Small Module Gears inside Precision Reduction Gears



石津 和幸*1
Kazuyuki Ishizu

高田 真吾*2
Shingo Takada

近年、ロボット技術の進歩は著しく、工場ラインの省人化・自動化に向け産業用ロボットの導入が加速している。それに伴い、ロボットの関節に使用される精密減速機の需要が増加し、精密減速機内部で使用される小モジュール高精度歯車の生産量の増加が見込まれる。

今後も成長する産業用ロボット市場では、ロボットを高性能化するために高精度な減速機が求められる。そのため、減速機に組み込まれる歯車をより高精度・高能率に安定して加工できる設備が求められている。三菱重工工作機械(株)(以下、当社)はこの要求に応えるべく高精度かつ高能率で加工ができるホブ盤 GE15FRplus を開発した。このホブ盤の特徴と加工事例について紹介する。

1. はじめに

精密減速機用小モジュール歯車は、遊星歯車減速機や波動歯車減速機に使用される。図1に遊星歯車と波動歯車の特徴を示す。遊星歯車は減速機の中央に位置する太陽歯車を中心としてその回りを自転しながら公転する歯車である。一方、波動歯車は楕円と真円の差動を利用した減速機で使用され、減速機内部には薄肉カップ状の金属弾性体の歯車が用いられている。その開口部外周に加工された歯車が相手側の内歯車とかみあい動力を伝達する。波動歯車は薄肉カップ形状のため歯車加工時に変形しやすく、要求精度は遊星歯車以上である。

本報では、この要求精度を実現した波動歯車の高精度・高能率ホブ加工技術について述べる。

*1 三菱重工工作機械株式会社技術本部 主席技師

*2 三菱重工工作機械株式会社技術本部 主席チーム統括

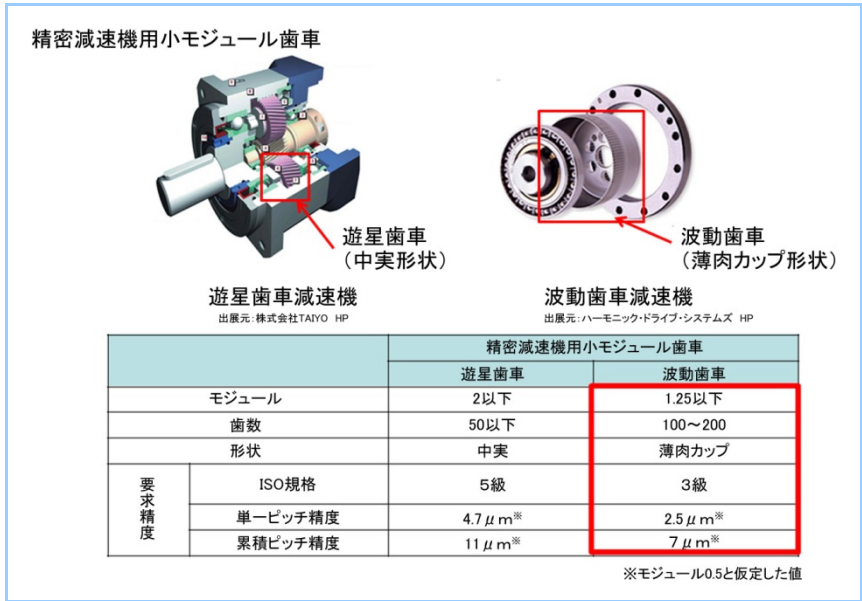


図1 遊星歯車と波動歯車の特徴

2. 波動歯車の特徴と要求精度

波動歯車はモジュール 1.25 以下、歯数は 100~200、要求精度は ISO3級以上が主流である。ロボットの関節部で使用される減速機には、高精度な割出し精度要求や回転中のトルク変動を抑えることが要求される。そのため、減速機内部の波動歯車は、歯車精度の中でも特にピッチ精度の高精度化が求められている。

しかし、薄肉カップ形状の開口部は、歯車加工時に変形しやすく要求精度の確保が困難である。さらに、モジュールが小さく研削砥石の製作が困難、かつ成形法による研削では効率が悪いため歯車研削加工の適用が難しい。また、歯車の歯数も多いため、生産性を高めるためには成形法ではなく創成法を用いたホブ盤で高精度・高能率加工を実現する必要がある。

3. 波動歯車に特化したホブ盤の開発

ホブ盤にて波動歯車の高精度化と高能率化を両立させるためには、切削力を抑えた高速高送り加工が必要である。しかし、当社のホブ盤 GE15A は、最大モジュール4にまで対応できる重切削を志向した中実無垢材からの削り出しが主対象であり、ホブカッタ径 φ 32mm で切削速度 200m/min、最大切削力 3500N で加工精度 ISO5級を実現できることが特徴である。最大回転速度は、ホブ主軸 2000min⁻¹、テーブル軸 300min⁻¹であり、それぞれアンギュラ軸受4列、円筒ころ軸受を用いて最大切削力にも耐えうる構造としているが、波動歯車加工には不向きであった。

そこで、波動歯車加工用にホブカッタ径 φ 32mm で切削速度 800m/min の高速高送り条件で加工精度 ISO3級(単一ピッチ精度 2.5 μm、累積ピッチ精度 7 μm)を実現できる小モジュール歯車向け高精度ホブ盤 GE15FRplusを開発した。ホブ盤 GE15FRplus のホブ主軸、テーブル軸の特長を含む外観図とその機械仕様を図2に示す。ホブ主軸最高回転速度は、8000min⁻¹である。

3.1 ホブ主軸の高速化と高精度化

ホブ主軸高速化と高精度化の課題として、回転の上昇に伴う主軸振動や発熱の低減が挙げられる。なお、波動歯車加工時の切削力は数十 N と小さく振動や発熱に与える影響は軽微である。

まず、ホブ主軸構成は一次危険速度が仕様回転速度 8000min⁻¹ の 1.2 倍以上になるようにホブ主軸形状や高速軸受の配置や必要な支持剛性をシミュレーションで求めた。次に、機上のホブカッタの回転振れ精度を向上させるため、ホブカッタは2面拘束 HSK アーバーを介して両持ち構造のホブ主軸と締結した。なお、HSK インターフェースは、ホブ主軸高速回転時にテーパ部が遠心膨張した際に生じるホブカッタの軸方向への引き込みを防止できることも利点の一つである。

駆動方式は、ダイレクトドライブモータにして回転軸系から回転軸の非線形要素を排除した。また、アンバランスによる励振力を抑えるために低慣性仕様とし、それを除去できるようモータ両側にバランス修正面を設け、組立時の調整をできるようにした。

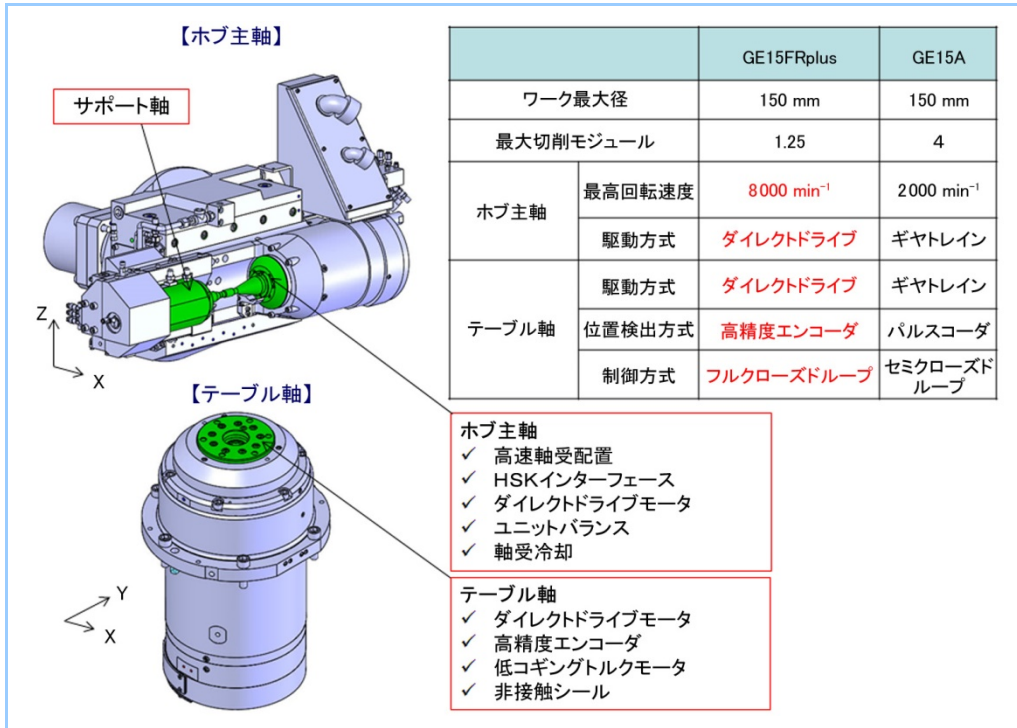


図2 ホブ盤 GE15FRplus のホブ主軸、テーブル軸の特長を含む外觀図とその機械仕様

また、ホブ主軸軸受やモータの発熱対策として機体温度と同調させた冷却油を発熱源近くに循環させた。これによりホブ主軸の温度上昇を抑制し加工精度への悪影響を排除した。

この結果、ホブ主軸軸受近傍点でホブ主軸振動を測定し 8000min⁻¹時のホブ主軸回転振動振幅 1 μm^{P-P} 以下、ホブ主軸の回転非同期成分振れ (NRRO*) は 0.5 μm 以下、ホブ主軸端面振れは 1 μm 以下となり、ホブ主軸の高速化と高精度化を実現した。ホブ主軸近傍部の振動振幅とホブ主軸のリサージュ波形を図3に示す。

NRRO*: Non-Repetitive Runout

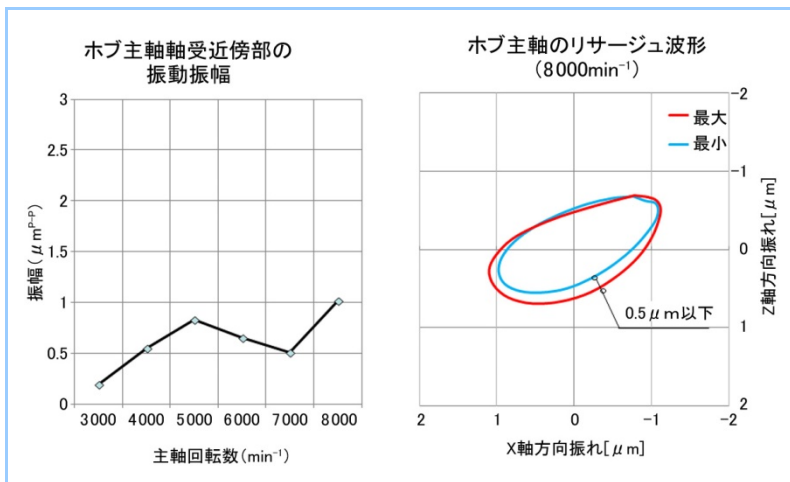


図3 ホブ主軸近傍部の振動振幅とホブ主軸のリサージュ波形

3.2 テーブル軸の高精度化

波動歯車のピッチ精度は、テーブル回転軸の回転非同期振れに依存する。高精度化を実現するためには、ホブ主軸以上に回転精度に配慮した軸系の構成にする必要がある。

GE15A のテーブル軸は、ギヤトレイン構造のセミクローズドループ制御であるが、GE15FRplus のテーブル軸は、ダイレクトドライブモータと高精度エンコーダを採用し、フルクローズドループ制御とした。しかし、回転精度の悪化、ムラに対する新たな影響が懸念されたため以下の解決策をとることとした。

1点目は、加工中のモータコギングトルク変動による影響である。ホブ盤ではホブ主軸とテーブル軸の同期制御が不可欠である。特に、波動歯車加工時のテーブル軸回転速度は低回転のため、コギングトルクの影響を受けやすい。そのため、コギングトルク変動量が最小となるようにモータの極数やスロット数の選定、マグネット配置、ロータとステータの回転方向相対位相関係が軸断面にて異なるスキュータイプを検討の上、採用することとした。

2点目は、テーブル軸の接触シール摺動抵抗による影響である。光学式エンコーダを使う場合、油分との隔離が必要なため接触式シールを使うことがある。テーブル軸回転時は、摺動抵抗に起因する回転トルクの増加や変動がテーブル軸の回転精度に影響する。そこで、摺動抵抗低減のために非接触式シールでも油分の隔離可能な構造とし、テーブル軸の回転精度の安定化を図った。テーブル軸回転トルク比較を図4示す。

テーブル軸の回転非同期成分振れ(NRRO)は $0.3\mu\text{m}$ を実現した。テーブル軸のリサージュ波形を図5に示す。

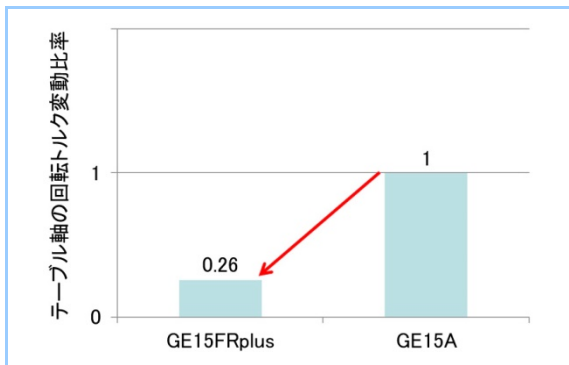


図4 テーブル軸回転トルク比較

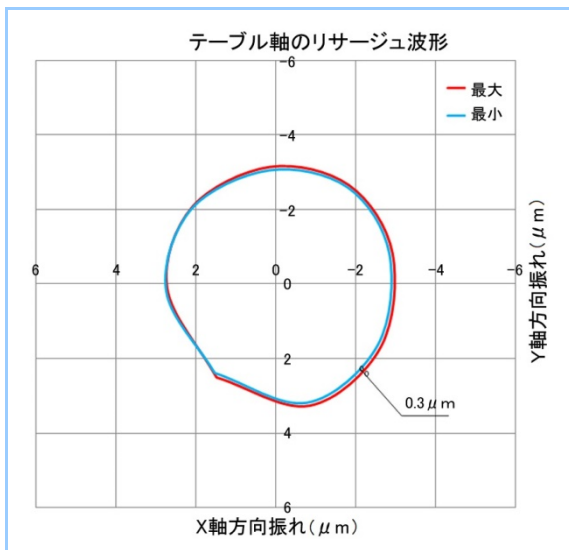


図5 テーブル軸のリサージュ波形

4. 波動歯車の高精度ホブ盤による加工事例

加工事例を紹介する。モジュール0.5, 歯数100, ねじれ角 0° , 歯幅15mmの波動歯車を超硬ホブカッタで切削速度800m/min, アキシヤル送り0.5mmの高速高送り加工を行った。結果は下記のとおりである。

- 1) ピッチ精度は、目標としていたISO3級に対して、ISO1級(単一ピッチ精度 $0.4\mu\text{m}$, 累積ピッチ精度 $2.0\mu\text{m}$)を達成した。単一ピッチ精度と累積ピッチ精度は、歯車研削加工と同水準でありホブ盤加工による波動歯車の高精度化を達成した。GE15FRplusのピッチ精度加工結果を図6に示す。
- 2) サイクルタイムはGE15Aホブ盤の約1/3に短縮した。
サイクルタイム比較を図7に示す。

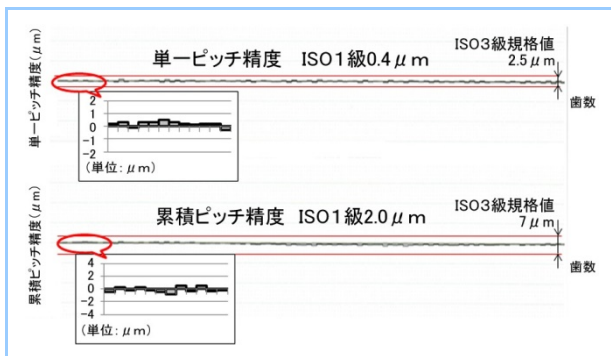


図6 GE15FRplusのピッチ精度加工結果

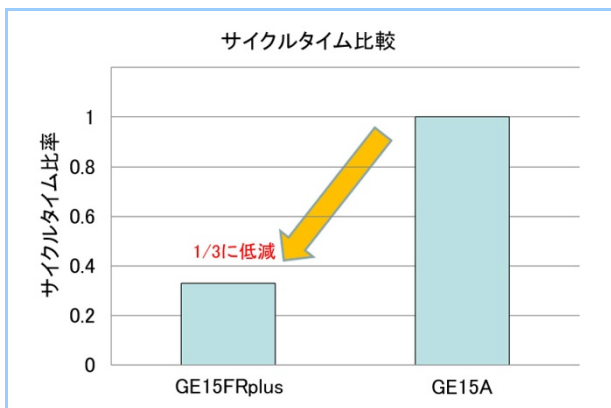


図7 サイクルタイム比較

5. まとめ

ロボット関節の駆動の要となる精密減速機用小モジュール歯車生産の高精度化, 高能率化に応えるべく, 当社は精密減速機用小モジュール歯車向け高精度ホブ盤GE15FRplusを開発した。これにより, 精密減速機用小モジュール歯車の波動歯車でISO1級のピッチ精度を達成し, 実加工時間をGE15Aの1/3に短縮した。この実績を基にロボット減速機関連の国内外主要ユーザに最適なギヤ加工ソリューションを提供していく。