

# 宇宙用機構部品(角度検出器、減速歯車)の開発

Development of Moving Mechanical Components for Space-Use

マテリアル・機構技術グループ

(Mechanical and Materials Engineering Group)

宮馬 浩、佐々木 彰、小原 新吾、田中 康夫、岩木 雅宣、鈴木 峰男

Hiroshi Miyaba, Akira Sasaki, Shingo Obara, Yasuo Tanaka, Masanori Iwaki,  
and Mineo Suzuki

## Abstract

Development status of Resolver and Harmonic Drive Gear is described in this paper. These items were selected as having high-priority in the field of moving mechanical components (MMCs), to be developed using own technology, by the Technical Committee on Space Parts and Components. Institute of Space Technology & Aeronautics, JAXA has been responsible for the development. In FY2004, the Resolver design was fixed, based on evaluations including performance of the resolver-to-digital electric circuit, ball bearing frictional torque characteristics, manufacturing ability. The qualification test is scheduled in FY 2005. As for the Harmonic Drive Gear, the effect of grease amount and rotational speed on the life of the Harmonic Drive Gear was examined in air tests. However, an engineering model test in vacuum showed that the life was much shorter in vacuum than in air, and that “lost-motion”, which was useful to detect the life of the Gear operated in air, may not be used in vacuum. The qualification test is scheduled in FY 2005, and the test conditions will be set, based on the analysis of these experimental data.

## 1. はじめに

認定部品の辞退に伴う部品国産化率の低下に逆比例して海外部品の不具合が増加しており、海外部品では技術情報が十分に開示されないため、故障解析が困難という問題がある。このためJAXAは、システムメーカ、部品メーカ、大学等の外部専門家を含む宇宙用部品技術委員会を設立し、宇宙用部品の供給体制の再構築へ向けた検討を進めている。本委員会の勧告で、重要度の高い部品については我が国の技術で開発すべきことが挙げられている。重要部品は、市場性、社会状況、技術性、過去の経緯等を考慮して、委員会が選定し、JAXA(総研)が開発を担当する。機構・材料の分野では、Table1に示す部品・材料が重要な品目としてリストアップされ、その中から第1期重要部品(推薬弁、遮断弁、角度検出器、減速歯車)、第2期重要部品(スリップリング、低衝撃分離機構)が選定された。現在、第1期重要部品の4品目の開発が進められている。

本稿では、平成15年度より開発に着手した角度検出器、及び減速歯車の開発進捗状況について報告する。

Table 1 Moving Mechanical Components and Materials

Item		Components and Materials
Components	Attitude control system	Gyroscope, Wheel
	Valve	Thruster Valve, Shut-off Valve, Pressure Regulator, Check Valve
	Sensor	Pressure Sensor, Temperature Sensor
	Liquid rocket engine	Pump seal, Pump Bearing
	Antenna pointing mechanism	Resolver, Harmonic Drive Gear, DC Brushless Motor, Step Motor
	Solar array driving mechanism	Slip Ring, Low Shock Separation Device
Materials		Thermal Control Material, Paint Hydrazine, NTO (di nitrogen tetra oxide)

## 2. 研究の概要

### (1) 角度検出器

アンテナ駆動機構とのインタフェースを考慮して、輸入品相当の外径から更なる小型化を図り、電子部品の実装設計や軸受設計を見直した。一方、米国で認定試験中のレゾルバ／デジタル信号変換用電子部品(モノリシックIC)は、高い放射線耐性が確認されたことから急遽EL (Export License) 対象品に変更された。このため、EL申請手続きのため部品の入手が遅れ、認定試験用供試体の製作を平成17年度に繰り越した。また、独自性確保の基本方針に従って、バックアップ部品を使用した回路についても、今後評価を行う予定である。

### (2) 減速歯車

長期使用タイプと軽量タイプの2種類の開発に取り組んでおり、昨年度からの試作試験を継続すると共に長期使用タイプのEM試験を実施した。

## 3. 成果の概要

### (1) 角度検出器

アンテナ駆動機構とのインタフェースを考慮して筐体外形を140mmから125mmへ変更した。基本設計及び詳細設計の断面図を比較しFig. 1に示す。レゾルバ・デジタル変換回路基板は、部品実装密度を上げることで基板数を4枚から2枚に削減し、小型化を実現した。また、外径の縮小に伴い軸受を小さいサイズのものに変更した。これらの設計変更を受けて、引き続き試作基板や軸受部の試作試験を進めている。

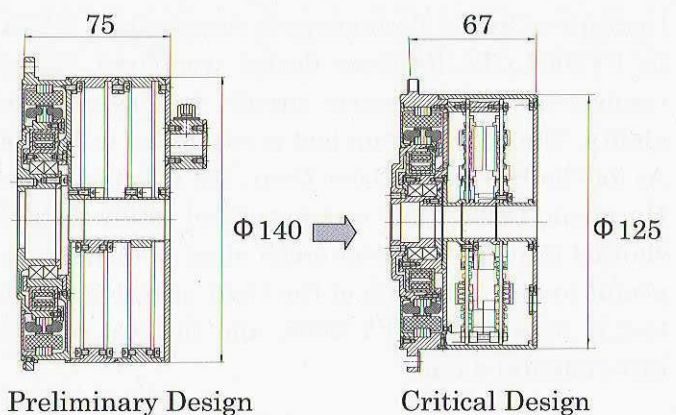


Fig.1 Resolver

温度を変化させた時の軸受摩擦トルクの計測結果をFig. 2に示す。温度が低下すると共に軸受摩擦トルクが増加し、回転速度が低いほど顕著であることを示している。

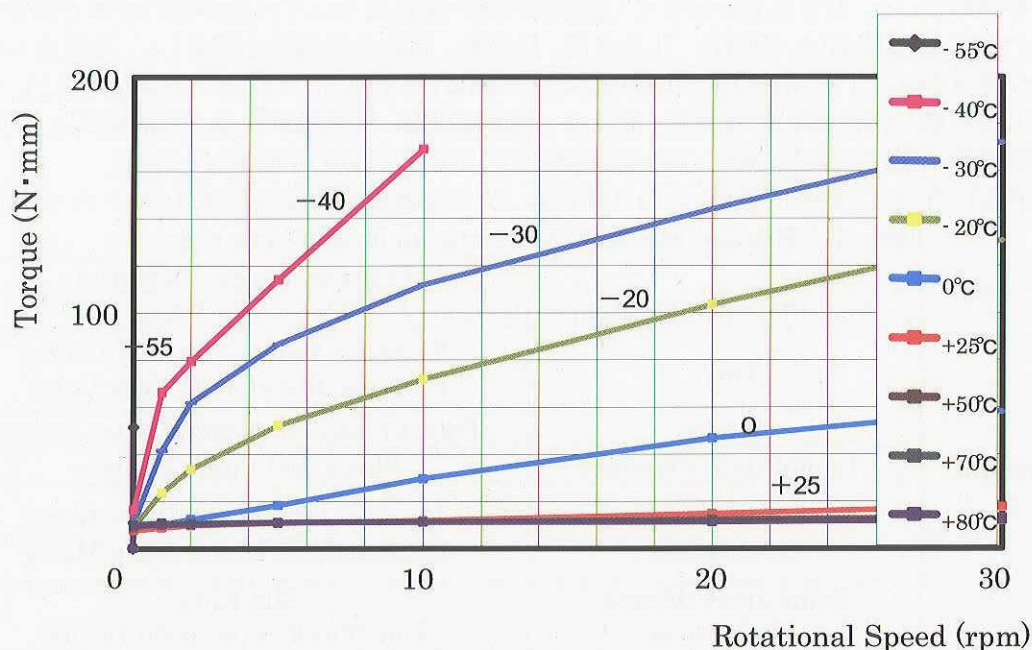


Fig. 2 Effect of temperature on frictional torque of bearing



## (2) 減速歯車

### 1) 長期使用タイプのEM試験における摩耗状態

長期使用タイプの減速歯車の EM 試験として、振動試験、熱真空試験、さらにその後に真空中で寿命試験を実施した。寿命試験は、負荷トルク 20Nm 及び 40Nm、入力軸回転数 500rpm、連続一定回転の条件で行ったが、20Nm のケースでは、入力軸を  $2.2 \times 10^6$  回転させた時点で駆動トルクの急増により試験を停止した。試験後の検査でトルク急増の主要因は入力軸支持軸受(試験治具)の不具合であることが判明したが、供試体である減速歯車自体もトルク増の原因の一つであった可能性も残された。このEM寿命試験結果をFig. 3に示す。大気中での試験結果から、寿命はトルクの3乗に逆比例する傾向があり、過去の試験結果からグリースの性能と真空環境の影響を見込んだ寿命推定線に近い結果が得られている。

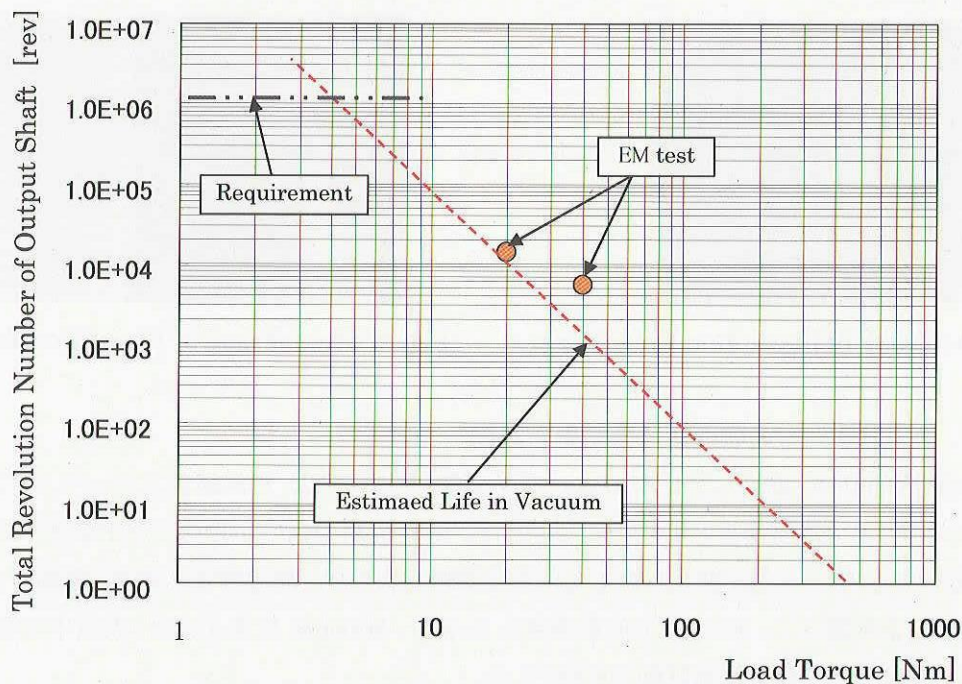


Fig.3 EM Durable test results

Fig. 4～8は、負荷トルク 20Nm でのEM試験に用いた減速歯車の主要構成部品の外観写真である。主な摩擦部位は、Fig.4のウェーブジェネレータベアリング外径部と Fig.5のフレックスプライン内径部間、及び Fig. 5のフレックスプライン外径歯車と Fig.6のサーキュラспライン内径歯車の歯のかみ合い部の2カ所である。Fig. 7、8のフレックスプライン内径部、歯形部の拡大写真に示すように、いずれの摺動部にもかなりの損傷が認められ、寿命に達していたと判断した。減速歯車の寿命判定には、入出力軸間の遊び(ロストモーション)の増大量が、各部位の摩耗が累積されて計測されるため有効とされていたが、今回の試験ではロストモーションは顕著には増大していない。真空中での運転では、減速歯車の寿命判定にロストモーションは有効ではない可能性が高い。

今回のEM試験では、2カ所の主な摺動部位のいずれも摩耗が認められたが、後述の 2)の試作試験に使用した供試体を観察したところ、フレックスプライン内径部には摩耗が観察されたが、フレックスプライン歯面にはほとんど摩耗が認められなかった。このことから、ウェーブジェネレータベアリング外径面とフレックスプライン内径面間の摩耗が、まず先行して発生すると推測される。ただし、試作試験では試験雰囲気が大気中であることもあり、今後、宇宙用の減速歯車ではどの摺動部位が寿命を支配するのか、寿命モニターに有効なパラメータは何か、などについてさらに検討を進める予定である。





Fig. 4 Wave Generator  
Bearing(W/G)

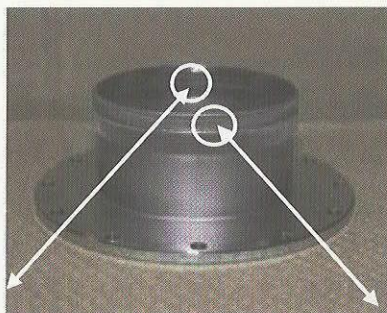


Fig. 5 Flexspline(F/S)



Fig. 6 Circular spline(C/S)



Fig. 7 Wear Track of Flexspline Inner bore

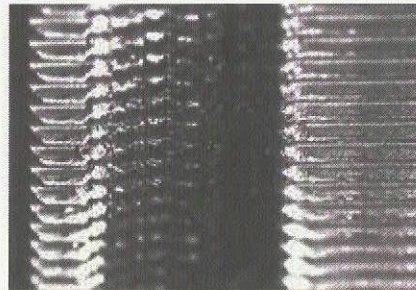


Fig. 8 Wear Track of Flexspline Teeth

## 2) 試作試験

### ①グリース塗布量, 加速試験が寿命特性に及ぼす影響評価

減速歯車の主な摩擦部位は、前述したようにウェーブジェネレータベアリング外径部とフレックスプライン内径部間、及びフレックスプライン外径歯車とサーキュラスプライン内径歯車の歯のかみ合い部の2カ所である。これらの摺動部位に塗布するグリース量を変化させて大気中で試験を行ない、減速歯車の寿命(摩耗)への影響及び最適なグリース塗布量を調べた。また、入力回転速度を 5rpm～500rpm に変化させ、大気中で寿命(摩耗)評価を行い、QT 試験における寿命評価試験法を検討した。

試験した条件の範囲では、グリース塗布量や回転速度を変化させても入力軸総回転数 $1 \times 10^6$  回転(一部は $5 \times 10^6$  回転)までの試験では運転中のトルクやロストモーションには顕著な劣化は認められなかった。摺動面の摩耗に関しては、フレックスプライン内径面で相違がみられる場合があった。

フレックスプライン内径面のグリース塗布量(F/S:0.1～0.4g, 0.4～1.2g)を変化させ、50rpm で $1 \times 10^6$  回転、500rpm で $5 \times 10^6$  回転させた後のフレックスプライン内径面の摩耗形状を Fig.9 に示す。なお、図中に示した曲線は、推定した未使用時の形状である。回転速度 500rpm の比較では、フレックスプライン内面に 0.1g 塗布した試験ケースが顕著な摩耗を示した。これよりグリース量が多いケースは有意差があるとはいえないが、長期運転ではグリース消耗により摩耗が進行することも予想される。

入力回転速度を 5～500rpm に変化させて比較評価を行った後のフレックスプライン内径面の摩耗形状を Fig.10 に示す。未使用品のフレックスプライン表面は約  $10\mu\text{m}$  の粗さを有しているが、5rpm での試験後は「なじみ」が見られ、それ以上の高速回転では接触部位が開口部側に偏り、中央部は摺動前の表面あらしを残しつつ開口部側の摩耗が大きくなっている。摩耗量は僅かであるものの回転速度により摩耗位置が変わることが確認された。

この試験結果から、500rpm でのEM試験で損傷が確認されたこと、及び寿命要求は高速回転時(約 100rpm)を評定としていることを踏まえ、今後、QT 試験での寿命試験条件を検討する。



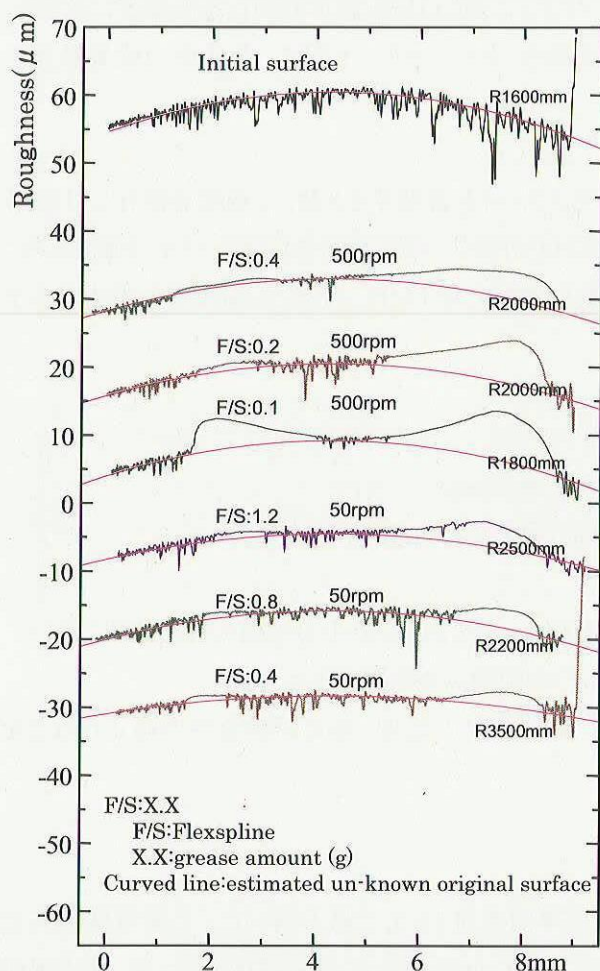


Fig.9 Effect of grease amount

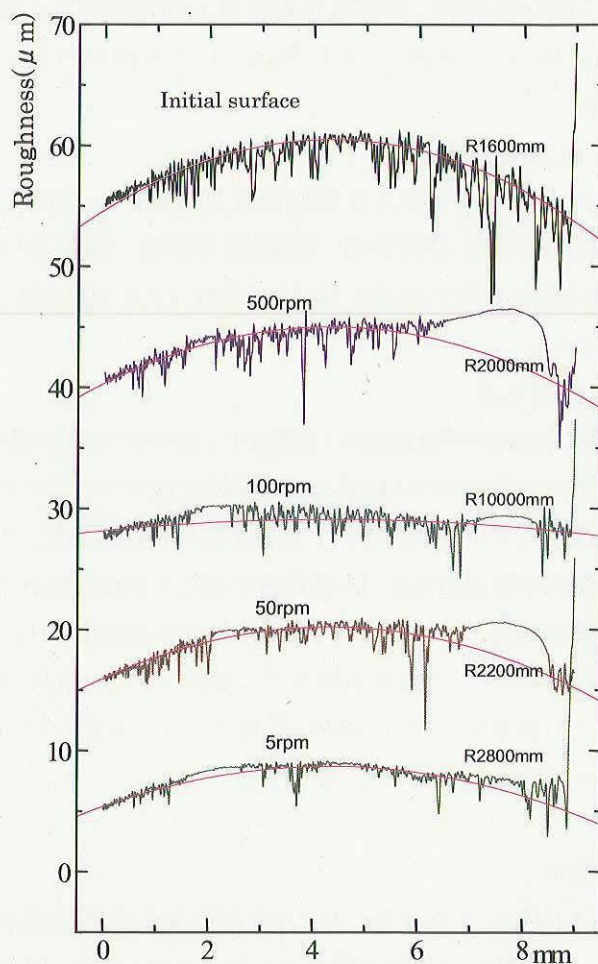


Fig.10 Effect of revolution speed

## ②無電解ニッケルめっきの耐久性評価

軽量タイプの減速歯車では、サーキュラースプライン、ウエーブジェネレータプラグを Ti-6Al-4V チタン合金製とし、軽量化を図っている。チタン合金同士が直接摺動すると凝着する恐れがあり、これを防ぐため表面に無電解ニッケルめっきを施している。このため、無電解ニッケルめっきの耐久性を評価しておく必要がある。

大気中の摩擦試験で無電解ニッケルめっきの耐久性を評価した結果、展開構造等の用途(要求作動回数 100 サイクル)としては、めっきには十分な耐久性があることを確認できた。しかし、摺動部の相手方材料(無電解ニッケルめっきより硬度が低い)に摩耗が見られたため、長寿命、高信頼性化を目指し、さらにメッキ条件の最適化や無電解ニッケルめっきの真空中での評価を進める予定である。

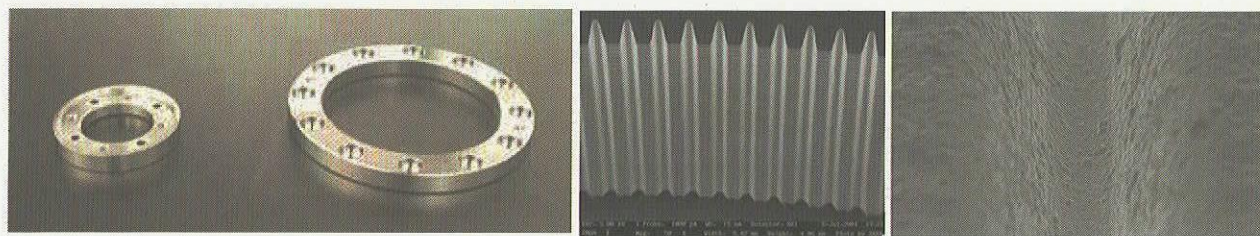


Fig. 11 Titanium alloy parts and nickel plated inner teeth of circular spline.

#### 4. まとめ

平成16年度は、角度検出器の電子回路用部品の調達リードタイムからQM供試体の製作を次年度に延期せざるを得なかったが、これ以外については概ね当初の成果を得ることができた。下記に、今年度の成果概要を示す。

##### ① 角度検出器

レゾルバ・デジタル変換回路基板を試作し、製造に関するノウハウを蓄積すると共に、軸受を試作し寸法形状計測、オイル含浸処理、摩擦トルク計測、回転軸の回転ぶれを計測し、軸受設計を要素レベルで確認した。これら試作試験の成果を踏まえ、平成17年度上期に詳細設計審査を完了した。今後、QM製作に着手する予定である。

##### ② 減速歯車

試作試験やEM試験の結果から、以下の知見を得た。

- a. 加速試験の回転速度により、摩耗位置やモードが異なる可能性がある。
- b. 少量のグリース塗布では顕著な摩耗が確認され、グリース切れとなった可能性が高い。
- c. 初期の低速回転により摺動面のなじみが確認された。
- d. 展開構造用として要求される運転総回転数に対して、無電解ニッケルめっきの十分な耐久性を確認した。
- e. EM試験により認定試験までに解決すべき、治具(軸受など)の問題点を把握できた。

この結果を受けて、摩擦・摩耗モードの考察を行うとともに試験治具の改良、認定試験条件の適正化などを行い、今後、認定試験に着手する。

#### 5. 謝辞

本開発を実施するにあたり宇宙用部品技術委員会の外部専門委員としてご協力頂いた、三菱電機株式会社 中川潤氏、NEC東芝スペースシステムズ(株) 川島教嗣氏、(株)アイ・エイチ・アイ・エアロスペース 秋山正雄氏に対し深謝いたします。

また、角度検出器は多摩川精機株式会社、減速歯車は株式会社ハーモニック・ドライブ・システムズが担当しており、本報告は各社の平成16年度成果に基づくものである。