

3O10 浸炭処理技術を利用した宇宙用波動歯車装置の長寿命化

○間庭和聡, 小原新吾 (宇宙航空研究開発機構)
黒木潤一, 金井覚, 上浦啓次 (株式会社ハーモニック・ドライブ・システムズ)

Improvement of Lubrication Life of Strain Wave Gearing for Space Applications by Surface Carburizing
Kazuaki Maniwa and Shingo Obara (Japan Aerospace Exploration Agency)
Jun'ichi Kurogi, Satoru Kanai and Keiji Ueura (Harmonic Drive Systems, Inc.)

Key Words: Strain Wave Gearing, Lubrication Life, Surface Carburizing

Abstract

Strain wave gearings for space applications demand to prolong its lubrication life for future missions. In this study, a carburizing processing and a shot peening was applied to the flexspline inside surface and the tooth surfaces of flexspline and circular spline for improving their wear-resistant characteristic. The surface-modified strain wave gearing was exposed to the vibration test and the life test in vacuum. As a result, the strain wave gearing with the surface modification showed about 3 times longer life compared with the case which has no surface modification.

1. 背景および目的

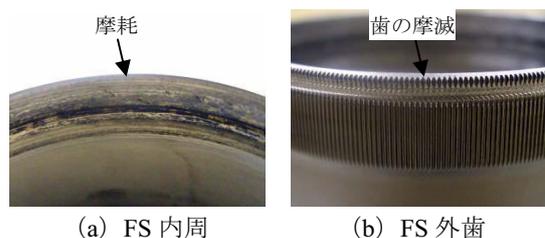
波動歯車装置（一般的にハーモニックドライブ®という名で知られている）は小型軽量，高回転精度などの特長を持つ伝導装置であり，太陽電池パドル駆動機構¹⁾など数多くの宇宙用駆動機構に採用されている。波動歯車装置は図 1 に示すように，楕円状玉軸受のウェーブジェネレータ（WG），薄肉カップで開口部に外歯が刻まれたフレクスプライン（FS），ならびに内歯が刻まれたリング状のサーキュラースプライン（CS）という 3 つの部品から構成される。WG の楕円長径は FS 内径よりもわずかに大きく，FS の中に WG を挿入すると FS は楕円に変形する。そして楕円に変形した FS の長軸で，その外歯と CS の内歯がかみ合う構造となっている。WG 内輪を入力軸，FS を出力軸，そして CS をハウジングに固定した場合，入力軸の回転により FS と CS の歯のかみ合い位置が移動し，出力軸が入力軸と反対向きに回転する。このような構造・動作原理を持つ波動歯車装置は，①WG 玉軸受の玉と内外輪の間，②WG 外周面と FS 内周面の間，③FS 外歯と CS 内歯の間で摩擦・摩耗が生じる。

著者らは，グリースで潤滑された宇宙用波動歯車装置の寿命試験を行い，図 2 に示すように真空中では接触部の厳しい摩耗により大気中と比較して著しく潤滑寿命が短くなることを明らかにした²⁾。この原因については，真空中では WG/FS 間で油膜が形成されにくく金属接触が生じる厳しい潤滑状態となり，

これが他のしゅう動部へも悪影響を与えるためと推定している³⁾。真空中での潤滑寿命を改善するためには，図 2 で示したような厳しい摩耗状態となっている FS 内周や歯面の耐摩耗性を向上させる必要がある。太陽電池パドル駆動機構のような種々の回転駆動機構の長寿命化のためには，波動歯車装置の潤滑寿命を改善することが必須である。



図 1 宇宙用波動歯車装置²⁾



(a) FS 内周 (b) FS 外歯

図 2 宇宙用波動歯車装置の摩耗状態の例²⁾

そこで本研究では、耐摩耗性表面処理を施した宇宙用波動歯車装置について真空中寿命試験を実施し、長寿命化に対する表面処理の有効性を調べた。寿命試験では、グリース潤滑された宇宙用波動歯車装置の潤滑寿命（出力軸回転数 3.5×10^4 rev.）²⁾ の約3倍である出力軸回転数 10×10^4 rev. を目標寿命とした。

2. 供試体

供試体の主な仕様を表1に示す。図1に示した宇宙用波動歯車装置のFS内周（WG外周との接触部）と外歯およびCS内歯に、浸炭処理とショットピーニング処理を施した。なお、本表面処理技術は（独）NEDO「SBIR 技術革新事業」における朝日熱処理工業（株）の研究開発により得られたものである。本表面処理により、摩擦部表面の硬度上昇、粗さの平滑化、油溜り効果を持つディンプル（くぼみ）形成の効果が得られ、耐摩耗性の向上による長寿命化が期待できる⁴⁾。潤滑剤は低蒸気圧特性で真空において良好な潤滑特性を有する合成炭化水素系グリース⁵⁾を使用した。

3. 試験条件および装置

試験の流れを図3に示す。本研究では、宇宙用波動歯車装置の認定試験²⁾と同等の条件で振動試験および寿命試験を実施した。また、寿命試験前後において、角度伝達誤差、ばね定数、低速ランニングトルク、伝達効率を測定した。各特性の測定条件を表2に示す。

図4に供試体が組み込まれるテストハウスの断面図を示す。入力軸にWG、出力軸にFS、そしてテストハウスにCSが固定されている。入力軸と出力軸はグリース潤滑されたアンギュラ玉軸受で支持されている。入力軸を回転させると、出力軸は1/160に減速されて回転する。テストハウスを分解すること

表1 供試体の主な仕様

| | |
|------|----------------------------------------------------------------|
| 型式 | SHF-20-160-2A-GR-SP |
| サイズ | φ 82 mm × 30.4 mm |
| 減速比 | 1/160 |
| 材質 | ウェーブジェネレータ玉軸受：SUS440C フレクスプライン：15-5PH サーキュラースプライン：SUS630 |
| 潤滑剤 | グリース 基油：Multiply Alkylated Cyclopentane 増ちょう剤：ウレア |
| 表面処理 | 適用箇所：FS内周と外歯，CS内歯 処理内容：浸炭処理，ショットピーニング処理 |

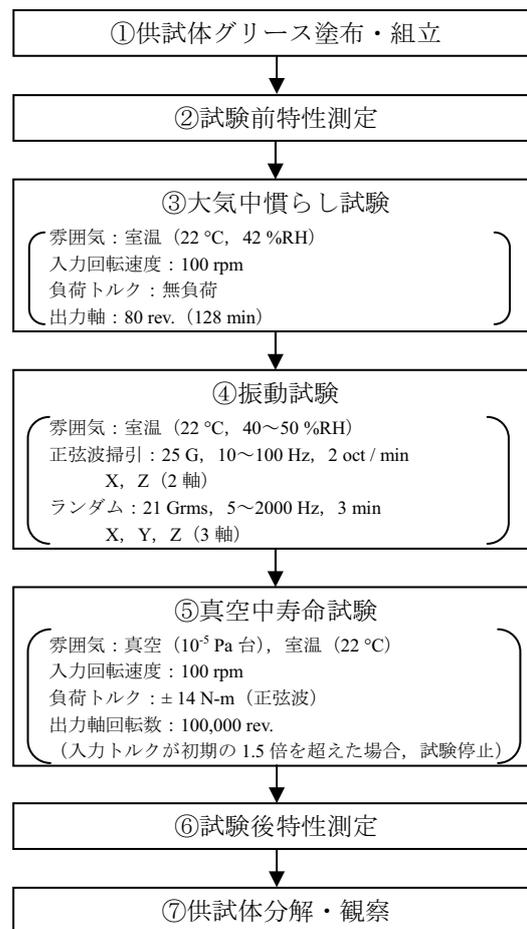


図3 試験の流れ

表2 各特性の測定条件

| | |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| 角度伝達誤差 [arc-sec] | 入力回転速度：50 rpm 負荷トルク：無負荷 回転方向：CW および CCW 測定範囲：出力軸1回転 |
| ばね定数 [N-m/rad] | 入力軸を停止させ、出力軸に負荷トルクを与えてねじれ角を測定 負荷トルク：7 N-m 測定箇所：入力軸90°位置2ヶ所 |
| 低速ランニングトルク [N-m] | 入力回転速度：2 rpm 負荷トルク：無負荷 回転方向：CW および CCW 測定範囲：入力軸2回転 |
| 伝達効率 [%] | 負荷トルク / (入力トルク × 160) × 100% として算出 入力回転速度：50 rpm 負荷トルク：14 N-m (一定) 回転方向：CW のみ |

なく一連の試験（試験前後の特性測定，振動試験，寿命試験）を行うことができる。

図 5 に振動試験の様子を示す。供試体の半径方向（X，Y 軸）と軸方向（Z 軸）について，寿命試験前に正弦波掃引振動試験およびランダム振動試験を実施した。振動試験条件は図 3 に示した通りである。

図 6 に寿命試験装置の概略図を示す。真空チャンバの外に設置されたモータにより入力軸を回転させて，テストハウス内の波動歯車装置で減速し出力軸を回転させる。真空チャンバ内に設置された入力トルクセンサと出力トルクセンサにより，供試体の入

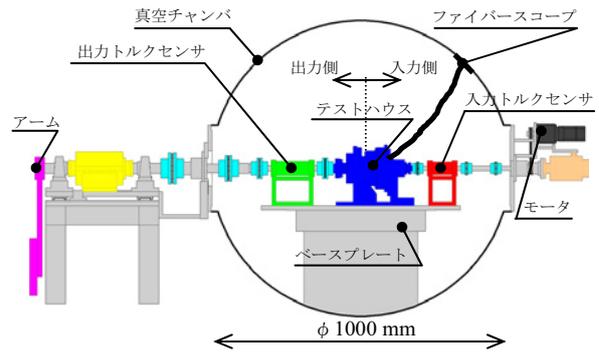


図 6 寿命試験装置の概略図

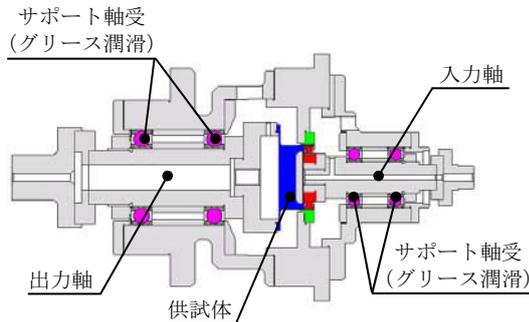


図 4 テストハウスの断面図

力トルクと出力トルクをそれぞれ測定することができる。出力軸への負荷として，アームによる正弦波状の負荷トルクを与える。テストハウス（CS 近傍）に熱電対を貼り付けて，寿命試験中の供試体温度の測定が可能である。また，ファイバースコープにより寿命試験中のグリース状態の変化の様子を観察することができる。

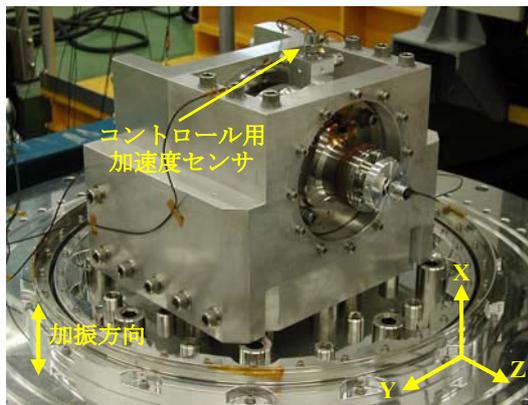
寿命試験は出力軸回転数 100,000 rev. で打ち切り，もしくは実際の回転駆動機構を想定して入力トルク（回転抵抗）が初期の 1.5 倍以上となった場合に寿命に達したと判断することとした。

4. 試験結果

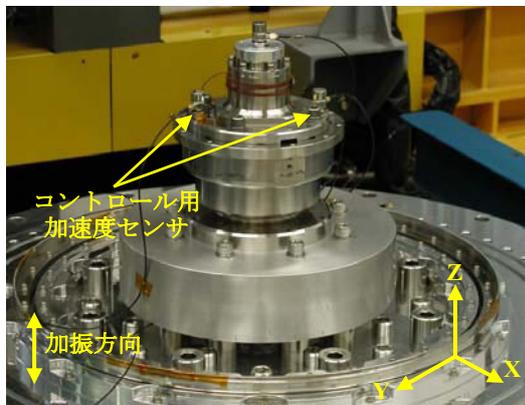
4.1. 特性測定結果

表 3 に寿命試験前後における特性測定結果を示す。

- ・ 角度伝達誤差は寿命試験後に増加した。
- ・ ばね定数は寿命試験後に低下した。
- ・ 低速ランニングトルクは寿命試験後に CW のみ低下した。
- ・ 伝達効率（CW）は寿命試験後に増加した。



(a) 半径方向（X 軸）振動試験



(b) 軸方向（Z 軸）加振
図 5 振動試験の様子

表 3 特性測定結果

| | |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 角度伝達誤差 [arc-sec] | 試験前：CW 26.2, CCW 25.6 試験後：CW 31.5, CCW 30.2 |
| ばね定数 [10 ⁴ N-m/rad] | 試験前：0°位置 0.81, 90°位置 0.81 試験後：0°位置 0.61, 90°位置 0.58 |
| 低速ランニングトルク（平均） [N-m] | 試験前：CW 0.027, CCW 0.029 試験後：CW 0.020, CCW 0.031 |
| 伝達効率（平均） [%] | 試験前：CW 68.5 試験後：CW 77.0 |

4.2. 寿命試験結果

寿命試験中における入力トルクと供試体温度の変化を図7に示す。入力トルクは出力軸1回転に伴い正弦波状に変化するため、最大値をプロットしている。なお、入力トルクセンサにより測定した摩擦トルク値は、テストハウス内の入力側サポート軸受の摩擦トルクを含んでいるため試験前にこの摩擦トルク値を測定し、図7では差し引いてプロットしている。

- ・ 入力トルクは試験開始から終了までわずかに減少傾向であり、大きな変動は確認されなかった。表面処理なしの供試体では試験初期に入力トルクの一時的な増加が確認されたが²⁾、本供試体では発生しなかった。
- ・ 寿命判定基準（初期入力トルクの1.5倍）に達することなく出力軸 10×10^4 rev.の寿命試験を完了した。
- ・ 供試体温度は出力軸回転数 44,000 rev.までほとんど変化はなく、23~24℃(室温よりも1~2℃高い)であった。出力軸回転数 44,000 rev.以降は若干低下し、22~23℃を示した。この供試体温度の変動は、室温の変動によるものである。

続いて、図8に入力側からファイバースコープにより撮影した寿命試験前後におけるグリース状態を示す。図8(a)の試験開始前ではグリースの色は白く、WG外輪とFSの間、FS外歯とCS内歯を覆うように塗布されている。試験終了直前では摩耗粉の混入によりグリース溜りはやや茶色を帯びているが、白い部分も多く残っている。

4.3. 寿命試験後の供試体観察結果

寿命試験後に供試体を分解し、摩擦部表面の観察

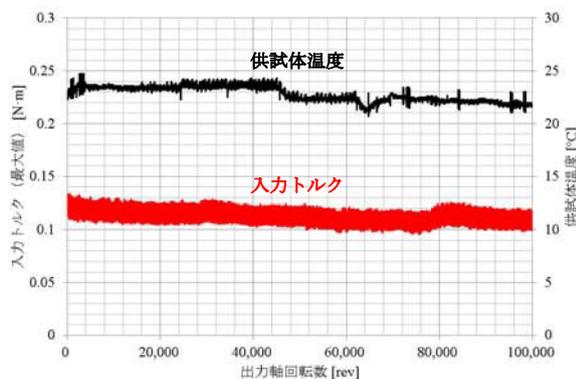
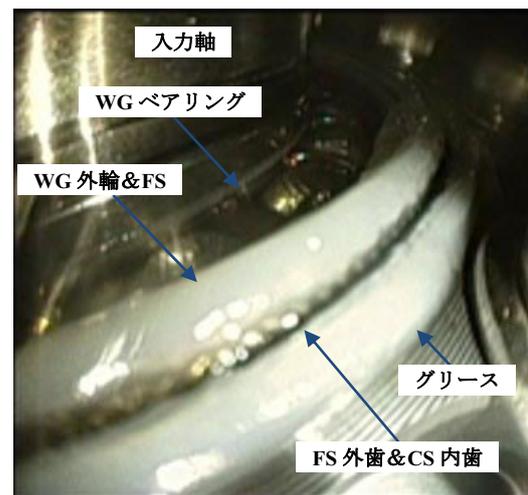


図7 寿命試験中における入力トルクと供試体温度の変化

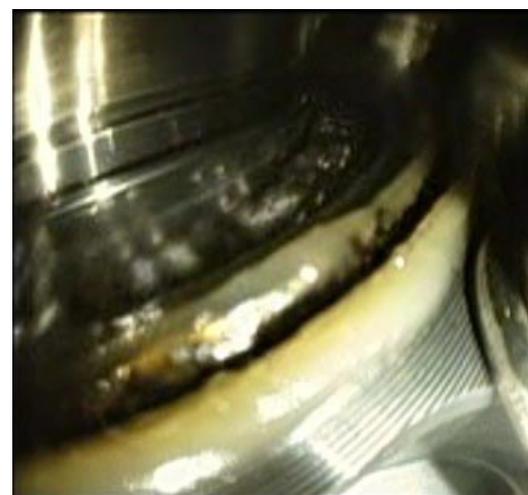
を行った。図9に寿命試験後のFSの外観写真を示す。

- ・ 供試体分解時、WGをFSから引き抜く際に要する力は小さく、WGとFSの間に“焼付き”は発生していなかった。
- ・ FS内周には周方向の摩耗痕が2箇所確認できるが、表面がなじむ程度の軽微な摩耗であった。WG外周にも軽微な摩耗痕が確認された。
- ・ FSとCSの両歯面について、図2(b)で示したような歯の摩滅は発生していなかったが、軽微な摩耗が見られた。
- ・ 寿命試験後のWG玉軸受は、回転は滑らかであり、ボール表面に付着したグリースの黒色化は軽微であった。

以上のように、WGとFSの接触部およびFSとCSの歯面の摩耗はいずれも軽微であり、出力軸 $10 \times$



(a) 試験開始前 (出力軸 0 rev.)

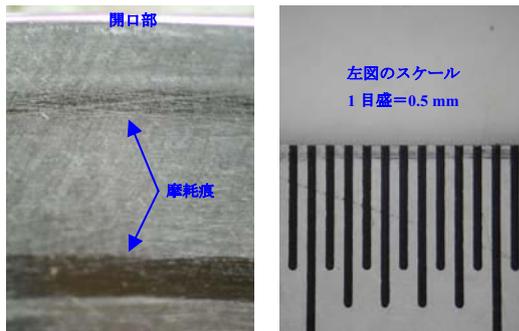


(b) 試験終了直前 (出力軸 99,875 rev.)

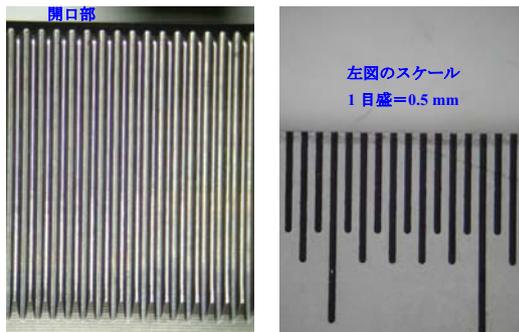
図8 寿命試験前後におけるグリース状態



(a) 外観写真 (洗浄前)



(b) FS 内周拡大写真 (洗浄後)



(c) FS 外歯拡大写真 (洗浄後)

図9 寿命試験後のFSの外観写真

10^4 rev.以上の回転が可能であったと判断できる。寿命試験後における角度伝達誤差の増加とばね定数の低下は、主に歯面の摩耗により生じたものと考えられる。また、試験後にCW方向とCCW方向でランニングトルク値に差が生じたのは、寿命試験はCW方向で行っていたためCW方向に対するなじみ効果が強く表れたものと考えられる。

5. おわりに

宇宙用波動歯車装置のFS内周およびFS/CS歯面に浸炭処理とショットピーニング処理を施し、振動試験、寿命試験を行った。その結果、本表面処理は波動歯車装置の長寿命化に有効であり、約3倍の寿命延長効果を持つことが分かった。

参考文献

- 1) 剣持伸朗, 濱井雅裕, 岡田康彦, 川島教嗣, 野口一秀, 中村修治, 濱一守: 次世代パドル駆動装置 (APDM) の開発と宇宙実証結果, 第49回宇宙科学技術連合講演会予稿集 (2005) 1506-1509.
- 2) Keiji Ueura, Yoshihide Kiyosawa, Jun'ichi Kurogi, Satoru Kanai, Hiroshi Miyaba, Kazuaki Maniwa, Mineo Suzuki & Shingo Obara: Tribological Aspects of A Strain Wave Gearing System with Specific Reference to its Space Application, Proc. IMechE, Journal of Engineering Tribology, vol.222, part J (2008) 1051-1061.
- 3) 間庭和聡, 小原新吾: 宇宙用波動歯車装置の潤滑機構に関する研究, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, JAXA-RR-06-017 (2007) .
- 4) 今田卓見, 青山豊, 鈴木学, 三好和寿: 析出硬化系ステンレス鋼の耐摩耗性向上に及ぼす表面改質の効果, トライボロジー会議予稿集 福井 2010-9 (2010) 153-154.
- 5) 吉井保夫, 服部仁志, 川島教嗣, 納富良文, 木村浩, 益子正文: 真空環境下における合成炭化水素系およびフッ素系グリースのすべり摩擦特性, トライボロジー会議予稿集 東京 2002-5 (2002) 69-70.