

ハーモニックドライブの潤滑機構解析 Study on Lubrication Mechanism of Harmonic Drive Gears

総合技術研究本部 部品・材料・機構技術グループ
Electronic, Mechanical Components and Material Group
Institute of Aerospace Technology

小原 新吾
Shingo Obara

Abstract

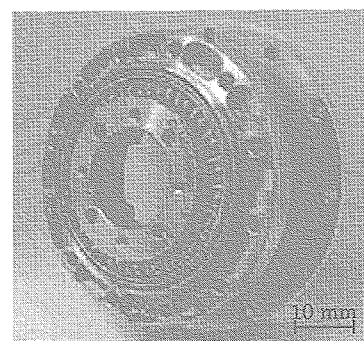
To investigate the lubrication mechanism of Harmonic Drive Gears (HDG), measurement of contact electric resistance among its three main parts, Wave Generator (WG), Flexspline (FS) and Circular Spline (CS), was conducted. In addition, a mixed lubrication analysis on the interface between WG and WS was also carried out. For the contact electric resistance measurement, the HDG was operated in vacuum and in air varying the input rotational speed and the load torque as a parameter. Test results showed that in all the contacting interfaces the contact electric resistance measured in vacuum was lower than that measured in air. In particular, the lubricating condition at the WG/FS interface was drastically changed depending on the test environment. For the mixed lubrication analysis, the analytical model was constructed using the FEM model of the WG and FS and the mixed lubrication model combined with the pressure-compliance equation of roughness contact developed by Greenwood and Williamson and the average Reynolds equation by Patir and Cheng. The lubricant film thickness, the hydrodynamic and asperity contact pressures and the lubricant flow vectors were calculated.

1. はじめに

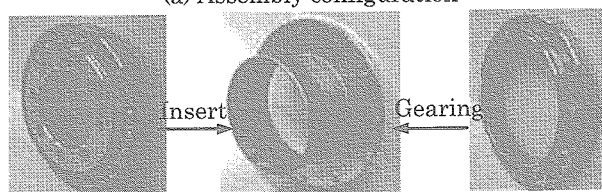
当グループでは、平成16年度より、太陽電池パドル機構や各種回転型アクチュエータに適用可能な減速歯車（ハーモニックドライブ¹⁾、Fig. 1 (a)、以下HDG)の開発を進めている。従来の国産宇宙用HDGに比較して小型軽量であり、最新の合成炭化水素油MAC (Multiply Alkylated Cyclopentane) 及びこれを基油としたグリースで潤滑することによりさらなる長寿命化を目指している。本報は、開発と並行して進めているHDGの潤滑機構の解明に関する基盤技術研究の成果^{[1][2]}をまとめたものである。

HDGは、だ円状玉軸受であるウェーブジェネレータ〔以下WG, Fig.1 (b)〕、外歯をもつ薄肉円筒状のフレクスプライン〔FS, Fig.1 (c)〕、及びリング状で内歯をもつサーキュラスプライン〔CS, Fig.1 (d)〕の3つの要素から構成される。組立て状態では、FSはWGが挿入されてだ円状にたわみ、FS外歯とCS内歯はWGのだ円長軸部でかみあう。Figure 1 (e)、(f)は、それぞれ、FS外歯とCS内歯の長軸部でのかみあい状態、短軸部での分離状態を示している。通常、WG内輪が入力軸に、FSが出力軸に、そしてCSがハウジングに取り付けられ、入力軸の回転によりFS/CSのかみあい位置が移動し、入力軸が1回転するとFS外歯とCS内歯の歯数差（通常2枚）分だけ出力軸が入力軸の回転と反対方向に減速されて回転する。

HDGは、構造上、作動中に以下の3つの接触部で摩擦が生じる。



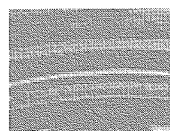
(a) Assembly configuration



(b) Wave Generator
・ Elliptical ball bearing

(c) Flexspline
・ Thin cup
・ External teeth

(d) Circular Spline
・ Internal teeth
・ Rigid body



(e) Engagement at major axis



(f) Disengagement at minor axis

Fig.1 Harmonic Drive Gear

1) ハーモニックドライブは[®]ハーモニック・ドライブ・システムズの登録商標である。

- (1) WG 玉軸受の玉と内外輪
- (2) WG 外輪の外周面と FS 内周面
- (3) FS 外歯と CS 内歯

宇宙用途を模擬した真空中での作動試験では (2) の潤滑が最も厳しくなり、大気中での作動に比べて短時間で寿命に至る場合が多いことが分かってきている[3][4]。HDGの潤滑機構についてはこれまで明らかになっておらず、WG/FS間についても、WG外輪とFSの相対速度がほぼ0で境界潤滑状態（油膜が形成されず接触荷重のほとんどを金属接触が支えている状態）あるいは混合潤滑状態（接触荷重の一部を油膜が支えている状態）であると推定されているものの、これを扱った研究は著者の知る限り報告されていない。真空中で寿命が低下するメカニズムを明らかにするためには、真空/大気の大気環境の違いによってHDGの油膜形成状態がどのように変化するかを調べることが必要である。さらに、定量的な評価が可能となるよう解析モデルの作製も必要である。

そこで、本研究では、接触電気抵抗法を用いて各要素間の金属接触/油膜形成状態を調べた。さらに、有限要素法と混合潤滑理論とを連立させることにより、HDGの潤滑解析モデルを作製した。

2. 接触電気抵抗法による油膜形成状態の測定

2.1 供試体及び試験装置

供試体は、Fig. 1に示した減速比1/160のHDGであり、材質はWGがSUS440C、FSが15-5PH、CSがSUS630である。潤滑剤はMAC、またはMACを基油としウレアを増ちょう剤とした真空用グリースのいずれかを選択し、3カ所の摺動部に塗布した。

Figure 2に試験装置を示す。供試体であるHDGは、真空チャンバ内中央のテストハウス内に組み込まれる。負荷トルクは、重りの付いたアームを出力軸に取り付けて与える。この場合、負荷トルクは出力軸1回転の間に正弦波状に変動する。Figure 3に、HDGが組み込まれたテストハウスの断面図を示す。入力軸にWG内輪、出力軸にFS、テストハウスにCSを取り付けている。

接触電気抵抗の計測回路をFig. 4に示す。本研究では測定電圧が数mV以下または接触電気抵抗が数 Ω 以下で境界潤滑状態（金属接触状態）、49mV以上または1000 Ω 以上で流体潤滑状態（油膜による完全分離状態）であると判断した。これらの間の中間値は、混合潤滑状態での金属接触域の大小を表していると考え、中間値の増加・減少は、それぞれ金属接触面積の減少・増加に対応すると想定した。

作動条件等をTable 1に示す。各回転速度、負荷トルクに対して入力軸に正転(CW)160回転、逆転(CCW)160回転を与え(出力軸はCW1回転、CCW1回転)、接触電気抵抗、入出力トルク及びCSの温度を測定した。

Table 1 Test parameters

Environment	Air (laboratory environment: 20-22°C, 46-51 %RH) Vacuum (less than 10 ⁻⁴ Pa)
Input rotational speed, rpm	0-300
Number of revolutions of input shaft, rev	160 (CW, CCW)
Load torque, N·m	0, 7, 13 (Arm)
Lubricants	Grease & Oil

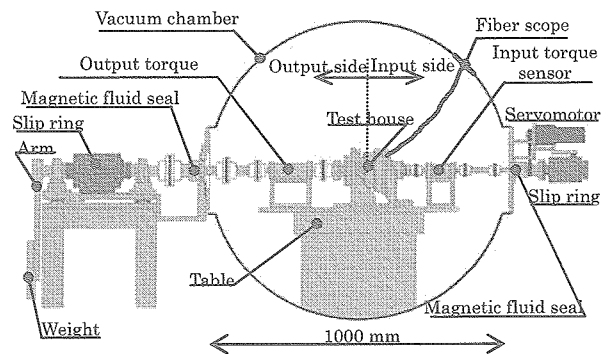


Fig.2 Schematic drawing of experimental apparatus

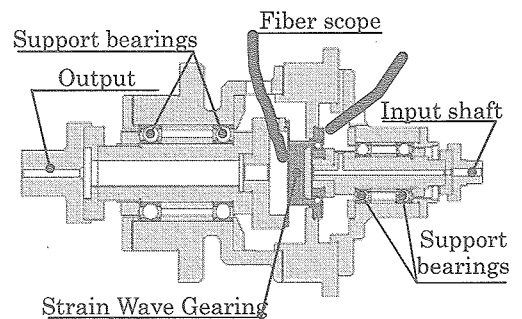


Fig.3 Cross-section of test house

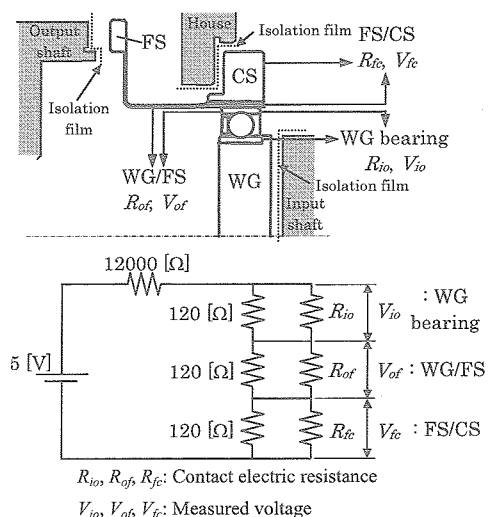
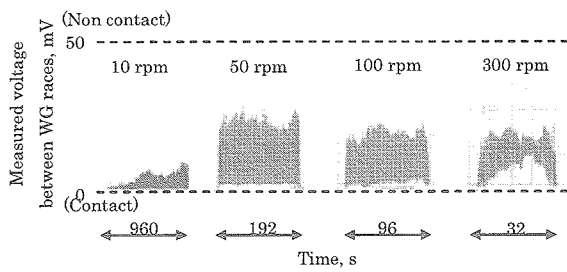
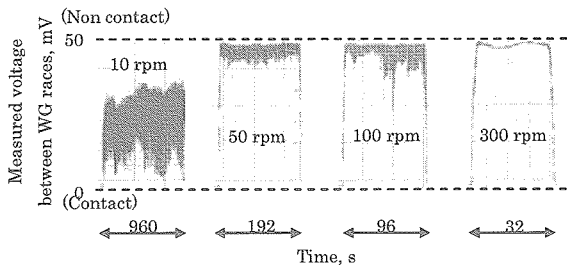


Fig.4 Contact electric resistance measuring circuit

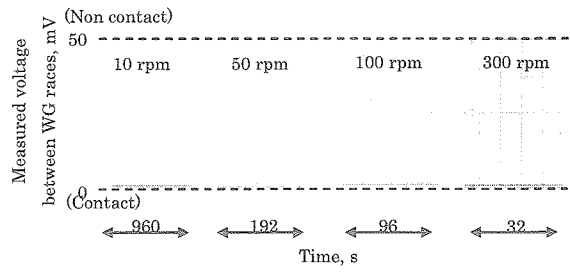


(a) In vacuum

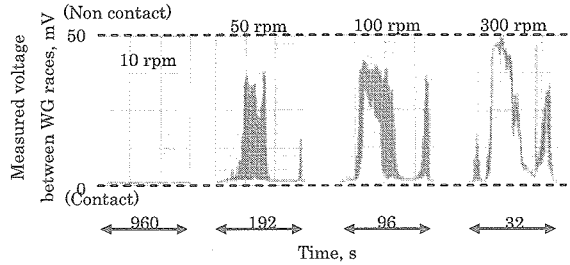


(b) In air

Fig.5 Measured voltage between WG inner and outer races (grease, load torque 13 N·m)

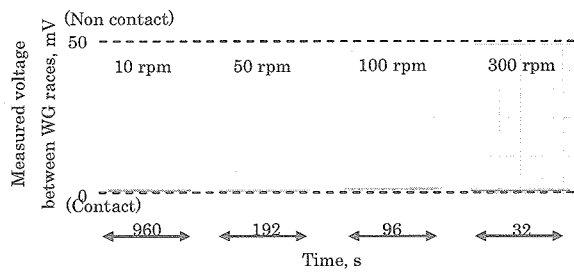


(a) In vacuum

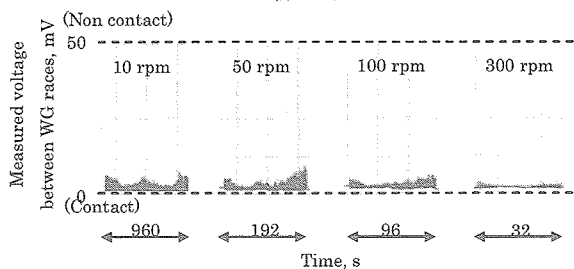


(b) In air

Fig.6 Measured voltage between WG and FS (grease, load torque 13 N·m)



(a) In vacuum



(b) In air

Fig.7 Measured voltage between FS and CS (grease, load torque 13 N·m)

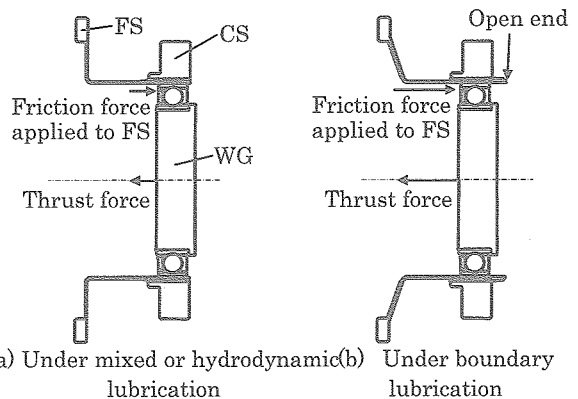


Fig.8 Deformation of FS due to change in WG/FS lubrication condition (Deformation of FS is exaggerated.)

2. 2 試験結果及び考察

Figure 5~7に、グリース潤滑、負荷トルク 13 N·m、入力回転速度 10, 50, 100, 300 rpm における WG 内外輪、WG/FS、FS/CS 間の測定電圧の時間変化を示す。

真空中では、WG 内外輪間は、Fig. 5 (a) に示すように測定電圧として 0~30 mV 程度の間接値を示し、回転速度に伴い抵抗値が上昇する傾向となった。WG/FS 間と FS/CS 間は、Fig. 6 (a), 7 (a) に示すように作動条件に依存せず測定電圧はほぼ 0 mV であり、境界潤滑状態であった。

一方、大気中ではすべての接触部位で測定電圧は高くなり、高回転速度域で WG 内外輪間及び WG/FS 間は混合または流体潤滑状態を、FS/CS 間は回転速度にほとんど依存せず境界または混合潤滑状態を示した。なお、本報で図示されていない他の負荷トルク、入力回転速度においても同様の結果となった。

すべての接触部位において、大気中よりも真空中の方が測定電圧（接触電気抵抗）が低くなり、油膜が形成されにくい状況となったメカニズムについては、特に、Fig. 6 の WG/FS 間の測定電圧が真空中と大気中との間で差が著しいことから、真空中で WG/FS 間が境界潤滑状態となったことが主原因と推定している。一般的に、作動状態にある HDG では、WG は FS の弾性変形により FS 内部へ引き込まれる方向にスラスト力を受ける。Figure 8 (a) に示すように、WG/FS 間が混合または流体潤滑状態で FS に働く摩擦力が小さい場合は、WG 外輪と FS の軸方向の相対位置はほとんど変化しないと推測され

る。しかし、同図 (b) のように WG/FS 間が境界潤滑状態となり FS に働く摩擦力が大きくなると、FS が WG 及び CS に対して軸方向に変形し、これにより、WG 外輪は軸方向荷重を受け、玉と内外輪間の接触荷重が増加すると思われる。一方 FS/CS 間については、Fig.8 (b) では WG の FS に対する挿入位置が同図 (a) と比較して相対的に開口部から奥側に変化するため、FS 開口部のだ円変位量が大きくなり FS 外歯と CS 内歯のかみあいがきつくなると考えられる。

3. WG/FS 間の混合潤滑解析

HDG のすべての摺動部に影響を与える WG/FS 間の潤滑状態を定量的に把握するため、Fig. 9 に示す混合潤滑解析モデル (油膜と金属接触の共存を考慮したモデル) を作製した。表面粗さの突起の固体接触圧力は Greenwood - Tripp の弾性接触モデルから、油膜圧力は表面粗さを考慮した Patir - Cheng による平均流モデルから求める。WG 外輪と FS の変形は有限要素法で求め、FS と CS の歯の噛み合いは、負荷トルクを FS の有限要素モデルに加えて模擬する。一方、WG の玉と内輪の接触応力はヘルツの接触理論より算出する。

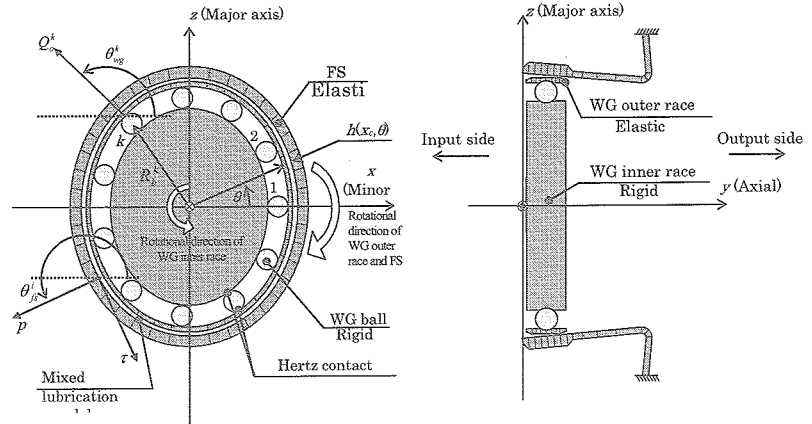


Fig.9 Lubrication analysis model of HDG

Figure 10 は、大気中作動時の WG/FS 間の油膜圧力、油量ベクトル及び油膜厚さの計算結果である。接触面には圧力が発生し、WG/FS の特に出力側端面で油の流入が激しいことがわかる。一方、真空中を仮定した場合には、Fig.10 に比較し WG/FS 間への油の流入が少ないことが他の解析により明らかになっている。真空中の作動で WG/FS 間が境界潤滑になりやすいのは、大気中作動のような周囲圧力によるすきま内への油の戻りがないために、油不足となりやすいことによると推測される。

4. まとめ

本研究により、HDG の潤滑状態は、真空中と大気中とで大きく異なり、真空中では接触部に油膜の生じにくい厳しい条件であることが明らかとなった。これは、雰囲気圧力と WG/FS 間の油膜圧力のバランスに関係しており、大気中に比較して、真空中の方が WG/FS 間の油量を維持しにくいと推測される。油やグリースを用いた宇宙用 HDG の寿命試験等は、窒素などの不活性気体中ではなく、真空中で確実に実施しなければならない。

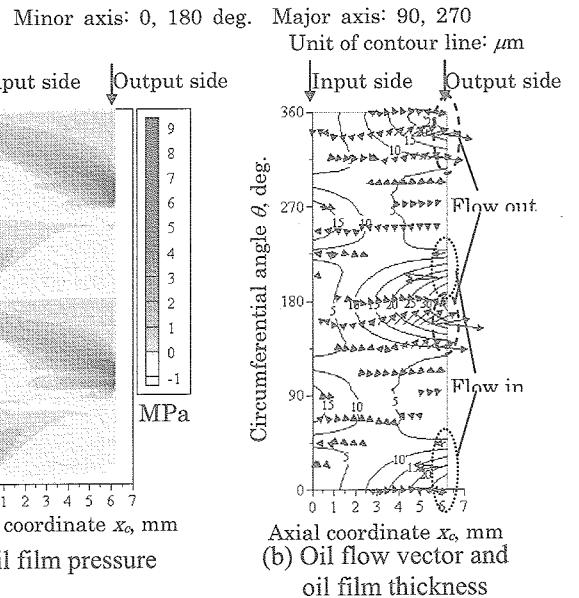


Fig.10 Calculation results for WG/FS lubrication (atmospheric pressure, load torque 13N·m, 100 rpm)

謝辞 本成果は、JAXA 及び首都大学東京の教育研究協力に関する協定 (連携大学院) に基づく研究活動により得られたものです。本研究を担当した同大学院航空宇宙工学専攻の間庭和聡君に感謝します。

[参考文献]

- [1] 間庭, 小原: 真空及び大気中における波動歯車装置のウェーブジェネレータ/フレクスプライン間の潤滑機構, トライボロジスト, 掲載予定.
- [2] 間庭, 小原: 負荷トルク印可時における波動歯車装置のウェーブジェネレータ/フレクスプライン間の混合潤滑解析, トライボロジスト, 掲載予定.
- [3] 宇宙航空研究開発機構 平成 15 年度 減速歯車の開発 (その 2) 成果報告書, 宇宙航空研究開発機構 (2004) 8.
- [4] I. Schafer, et al.: Space Lubrication and Performance of Harmonic Drive Gears, Proc. 11th European Space Mechanisms and Tribology Symposium (2005) 65.