1101 打撃試験による宇宙用潤滑剤の性能評価

Impact Tests of Advanced Space Lubricants

大野信義・佐賀大理工

永尾聡一郎・佐賀大・院

Nobuyoshi Ohno, Saga University

Soichiro Nagao, Saga University

森田繁樹・佐賀大理工

塩見裕・宇宙航空研究開発機構

小原新吾・宇宙航空研究開発機構

Shigeki Morita, Saga University

Hiroshi Shiomi, JAXA

Shingo Obara, JAXA

Key Words: Tribology, Space Lubricant, Oil, Grease, Impact Test

1. はじめに

ロケット打上げ時の衝撃と振動により転がり軸受転走面に打痕が発生し、その打痕が転がり軸受の性能を低下させることが問題となっている。宇宙機器用転がり軸受の潤滑剤としては、従来固体潤滑剤が使用されていたが、近年宇宙機器の長寿命化、運転条件の過酷化に伴い、PFPE 系や MAC 系潤滑油およびそれぞれを基油とするグリースの使用傾向が増加している。本研究では基油 2 種類とグリース 6 種類を使用し、打撃試験を行うことで、オイルピット形成に及ぼす油剤の影響ならびに基油とグリースの相違について検討した結果について報告する。

2. 基油およびグリースの性状

試料油は PFPE 系潤滑油 815Z, MAC 系潤滑油 2001A の 2 種類と、これらを基油とする宇宙用グリース(PFPE 系 600EF, 601EF, 602EF, MAC 系 R2000, ML, MU)の 6 種類を使用した。グリース 600EF, 601EF と 602EF の増稠剤は PTFE, グリース R2000 の増稠剤は Na 石けん, グリース ML の増稠剤は Li 石けん, グリース MU の増稠剤はウレアである。なお、601EF には腐食防止剤と防錆剤, 602EF には MoS_2 が添加されている。Table 1 に基油の性状を示す。表には密度 ρ , 動粘度 ν , 粘度圧力係数 α を記入している。なお、グリースは基油の値を使用する。

Table 1 Properties of base fluid

Fluid	ρ , g/ml	ν , mm ² /s	α , GPa ⁻¹
	288K	313K	373K
815Z	1.858	139.1	42.70
2001A	0.851	103.2	14.35

3. 実験方法

Fig. 1 に実験装置を示す。試験機はアーム式打撃試験機を使用した。衝撃は空気軸受で支えられたアームの先端に、 $\Phi 13.49$ の鋼球を袋ナットで固定したハンマーを高さ 30mm から落下させることにより与えた。平板試験片は S45C で HB198 に調質したも

Fig. 1 Schematic diagram of impact apparatus.

のを使用した。鋼球部の等価質量は 4.9N である。実験は室温条件下で各 10 回行い、打撃時に分離電圧による油膜形成状態の計測、鋼球の反発挙動および AE 計測を行った。また、圧痕形状はレーザー変位計および干渉顕微鏡で計測した。

4. 実験結果

Fig. 2 に乾燥条件下での鋼球の反発挙動、分離電圧および AE の波形を示す。Fig. 3 にレーザー変位計で計測した乾燥と基油 815Z の圧痕形状の相違を示す。乾燥に比べ、815Z では圧痕中央部で鋭くまた深い塑性変形が生じている。この乾燥との差を Δh として求めた。実験は各試料につき 10 回行った。その平均値を Table 2 に示す。

油膜形成状態は分離電圧波形から求めた。Fig. 4 に乾燥と基油 815Z の初回衝突時の電圧波形の相違を示すが、乾燥の電圧波形を基準に分離度 S を算出すると $S=66\%$ となる。各潤滑剤の平均分離度 $S\%$ を算出した結果も Table 2 に示している。なお、表中の $\alpha \eta$ は潤滑油パラメータで実験油温 293K での粘度圧力係数 α (GPa⁻¹) と絶対粘度 η (Pa·s) の積である。

弾性流体潤滑条件下の接線方向の運動(横の運動)において、油膜形成には粘度圧力係数 α と粘度 η の積である潤滑油パラメータが支配的因子であり、また、垂直方向の運動(スクイズ作用、縦の運動)でも閉じ込め油膜厚さが潤滑油パラメータに支

Fig. 2 Synchronization among displacement sensor, AE sensor and contact voltage.

Fig. 3 Indentation depth difference Δh for dry condition and 815Z.

Fig. 4 Variation of contact voltage during the primary collision period.

Table 2 Parameters of different lubricant impact conditions
(S% is the degree of oil film formation)

Fluid	$\alpha \eta, \times 10^{-9} \text{s}$	$\Delta h, \mu \text{m}$	S, %
815Z	7.24	2.36	65.9
600EF-G	7.24	4.06	71.5
601EF-G	7.24	2.99	75.8
602EF-G	7.24	3.31	57.5
2001A	4.00	2.93	75.9
R2000-G	4.00	3.65	73.5
ML-G	4.00	2.94	79.7
MU-G	4.00	3.34	82.0

配されることは先に報告した¹⁾。各潤滑剤の潤滑油パラメータ $\alpha \eta$ と分離度Sの関係を図5に、閉じ込め油膜厚さ Δh との関係を図6に示す。図中の実線は多種類の潤滑油の打撃試験から求めた分離度と閉じ込め膜厚に及ぼす潤滑油パラメータ $\alpha \eta$ のマスターカーブである¹⁾。全体的傾向としてはPFPE系基油・グリースとMAC系基油・グリースの閉じ込め油膜厚さ Δh の実験点はマスターカーブより上部にあるのに比べ、分離度S%はPFPE系基油・グリースに比べMAC系基油・グリースの方が良好で、しかも、MAC系では実験点がマスターカーブより上部にあることが特長である。

Fig. 5 Relation between contact voltage S% and $\alpha \eta$ at impact test.

Fig. 6 Relation between dent depth difference Δh and $\alpha \eta$ at impact test.

5. 考察

本研究の目的は衝撃荷重下の表面損傷防止であり、この観点からすれば閉じ込め油膜厚さ Δh が浅く、分離度S%が大きいほど良好な潤滑剤となる。潤滑剤の相違を明確にするため分離度S%と閉じ込め油膜厚さ Δh の関係を図7に示す。まず、基油PFPE815ZとMAC2001Aを比べると、潤滑油パラメータ $\alpha \eta$ が大きい815ZがS%, Δh 共に2001Aより小さくなっている。著者らは先に高面圧EHL条件下で、815Zが一時的粘度低下および永久粘度低下を生じることを報告した²⁾。815Zの打撃試験時の低いS%, と浅い Δh はEHLスクイズ条件下でも815Zに粘度低下が発生したことを推測させる。815Zの永久粘度低下はアセタールグループ(-OCF₂O-)の高圧下での分子切断によるもので、大気中の水分下で加水分解し、カルボン酸とフッ化水素を発生し、著しく軸受寿命を低下させる³⁾。

さて、図5、図6、図7より全体的傾向としてMAC系(基油2001A, グリースR2000-G, ML-G, MU-G)はPFPE系(基油815Z, グリース600EF-G, 601EF-G, 602EF-G)に比べ、油膜形成状態が良好であり、特にML-G, MU-Gが最適なグリースとなる。

ML-G, MU-Gの良好な潤滑特性を究明するために、先に報告したEHL条件下の油量不足発生までの時間とEHL停止時の閉じ込め油膜厚さ実験の結果⁴⁾を参照した。図8にEHL条件下の油量不足発生時間と本打撃試験での分離度S%の関係を示す。ML-G, MU-GはEHL条件下で油量不足を発生し難く、打撃試験でも油膜形成状態が良好であることが分かる。基油の微量油

量EHL実験での油量不足発生までの時間はPFPE815Zで10 s, MAC系2001Aで1078 sであり、グリースにおいても基本的にはこの基油の性質が結果を左右している。図9にEHL条件下の油量不足発生直後にEHLを停止させた場合の閉じ込め油膜厚さと本打撃試験での油膜閉じ込め深さ Δh の関係を示す。EHL停止時の閉じ込め深さと打撃試験での閉じ込め深さ Δh の関係は同一傾向にあることが分かる。先の光干渉式EHL試験ではPFPE系グリース600EF-G, 601EF-Gの増稠剤PTFEが転走面付着していることを、また、602EF-GではPTFEの付着と同時にMoS₂粒子も観測している⁴⁾。したがって、PFPE系グリースの打撃試験での Δh と分離度S%の増大は増稠剤PTFEの付着によることが考えられる。一方、MAC系グリースML-G, MU-Gでは増稠剤リチウム石けん、ウレアの転走面への付着は殆ど認められなかった。このことが本打撃試験でPFPE系グリースに比べMAC系グリースの Δh が浅くなった原因と考えられる。

Fig. 7 Relation of contact voltage S% and dent depth difference Δh .

Fig. 8 Relation between contact voltage S% and oil starvation time.

Fig. 9 Relation between dent depth difference Δh and film thickness.

6. 結言

本実験範囲で、基油PFPE815Zは高圧EHLスクイズ条件下でも粘度低下が生じること、また、衝撃荷重下の表面損傷防止にMAC系グリースMLとMUが最適であることが分かった。

文献

- 1) Ohno, N., et al., "Effect of Lubricant Parameter on Oil Pit Formation," World Tribology Congress, Kyoto, C2-432 (2009) 842.
- 2) Mia, S., et al., "Viscosity Loss in PFPE Lubricant for Space Applications under EHL Conditions," Tribology Online, 2, 2 (2007) 54-58.
- 3) Ohno, et al., "Bearing Fatigue Life Tests in Advanced Base Oil and Grease for Space Applications," STLE Tribology Transactions, 52, 1 (2009) 114-120.
- 4) 山下祐史ほか, 弾性流体潤滑下における宇宙用グリースの油膜挙動, トライボロジー会議予稿集(東京 2009-5)97.