

ヘリコプタ用トランスミッションの ドライラン性能

Lub-Starvation Research Test of Helicopter Transmission

名古屋誘導推進システム製作所 林 哲 史*¹ 山 本 博 久*²
技 術 本 部 松 本 将*³ 東 崎 康 嘉*⁴

改訂された耐空性審査要領では、ヘリコプタ用トランスミッション（動力伝達装置）は内包する潤滑油が漏えいしても 30 min 以上の運転（ドライラン）が可能であることが要求されている。本報では、研究用に製作されたトランスミッションを使用して、ドライラン状態下の単体軸受試験とギヤボックス試験を実施し、負荷をパラメータとした軸受等の温度、及びギヤボックスの温度の過渡特性を含む挙動データを取得した。試験後、分解検査を実施し、供試体の状況を確認した。いずれの試験においても、30 min 以上のドライラン運転が実施でき、また、転がり軸受の温度推定手法を見いだした。

The revised airworthiness standard of the Japan Civil Aviation Regulations requires helicopter transmissions to have operational ability for 30 minutes after the loss of lubrication oil, which MHI calls "Dry Running" ability. A bearing unit test and a complete gearbox test were conducted, and temperature and vibration data were obtained with transmitted torque as one parameter. A teardown inspection was conducted and the test results indicate no abnormal phenomena.

1. ま え が き

初期のヘリコプタでは、トランスミッションの潤滑不全、又は潤滑配管の脱落等により、ヘリコプタの飛行が危険となる場合が多く発生した。民間用ヘリコプタにおけるその主な原因には、整備不良あるいは潜在的な設計不良等がある。また、軍用ヘリコプタにおいては、これらに加え、戦闘中の被弾も原因となる。整備者の技能向上、初期設計時点からの整備性考慮等でこれらの解決を図ってきているが、完全な解決策ではない。

このような状況下で、民間用ヘリコプタのトランスミッションに対して、米国で 1980 年代に 15 min のオートローテーション伝達馬力運転の実証が義務づけられ、最近では搭乗者人数、機体重量が大きいカテゴリ A 機体に対して、軍用と同じ 30 min の巡航伝達馬力運転が法律で要求されている。

日本においては、具体的な設計・性能等を規定する耐空性審査要領¹⁾が、米国並みの要求に改訂された。

本報では、給油運転から潤滑油を遮断した無給油運転をドライラン運転と呼ぶことにする。

2. ドライラン運転要求

改訂された耐空性審査要領では、カテゴリ A ヘリコプタのトランスミッションのドライラン運転に関連し、通常の潤滑油系統での潤滑油遮断の結果として生じる故障が発生しても、少なくとも 30 min の安全な運行の持続を妨げないことを試験で示すことを要求している。

実際のドライラン運転試験としては、実機上で実施する場合と台上試験装置上で模擬する場合がある。ドライラン要求の適用が早い米国等では、実機上では試験者に危険がつかまとうこと、試験供試体の範囲が大きくなることから、後者で実施するのが通例である。試験後、供試体は分解されどのような損傷が生じたかが検査される。試験の可否は試験中の運転データと分解検査状況を考慮し最終的に判定されるが、原則として試験供試体に損傷があっても、30 min 以上、所要のトルクと回転が伝達できればよい。

ドライラン試験を実施すること自体は、特別に難しいものではない。しかし、この要求を設計段階でどのように反映し、ドライラン運転試験中のトランスミッション（これを構成する歯車あるいは軸受等）がどのような挙動を示すかを予測することが課題である。

3. ドライラン性能に寄与する諸要因

長時間の無給油状態であるドライラン条件下では、トランスミッションを構成する軸受、歯車等への潤滑油が遮断されるため、これらにトライボロジー面で多大な悪影響を及ぼす。そもそも遮断される潤滑油の主たる機能は、(1) 軸受、歯車等の転がりまたは滑り摩擦を小さくし発熱量を下げ、温度上昇を抑え、熱膨張による固着を防止することと、(2) 転がり又は滑り摩擦、及び攪拌抵抗による発生熱を冷却することである。

軸受の場合、ドライラン条件下で長時間運転すると、強制的に潤滑油が供給されないため、形成される油膜厚さが薄くなり、転がり摩擦抵抗が増加したり、また接触面から潤滑油が完全になくなると、面が荒れて焼付く可能性がある。また部品に残留する熱量が増え、この残留熱による温度上昇で軸受すきまが減少し、最終的に破壊に至る。ドライランが要求される軸受では、材料、軸受すきま等を考慮する必要がある。なお、最近のヘリコプタ用トランスミッションでは、接触形態が面である滑り軸受はほとんど使用されず、点/線接触となる転がり軸受が選択される。

歯車の場合、考慮すべき点は軸受とほぼ同じである。点/線接触であるが、軸受の場合はそれがほぼ転がり接触であるのに対して、歯車の場合はピッチ円上で点接触となる以外はほとんどが滑り接触を伴った転がり接触である。また、歯車の場合の軸受すきまに相当するバックラッシュ量も重要である。運転中は、歯車は熱膨張し、バックラッシュは組立時よりも減少することがある。

ドライラン条件下では、通常運転よりも熱膨張も増大するので、組立時のバックラッシュ量が小さすぎると実際のバックラッシュが零となり、最悪状態では回転不可能となる。

また、ドライラン運転開始時に軸受や歯車の接触部近隣に潤滑

*1 エンジン・機器部主査

*3 長崎研究所トライボロジー研究室長 工博

三菱重工技報 Vol. 33 No. 3 (1996-5)

*2 エンジン・機器部ガスタービンエンジン設計課

*4 長崎研究所トライボロジー研究室

油をできるだけ残留させておくという点も重要である。ドライラン運転は、通常の給油状態からより潤滑条件が厳しい状態に移行するが、全くの無潤滑運転とは異なるという点を利用するのである。例えば、軸受にオイルダムを設けて潤滑油を残留させる方法がある。

以上がドライラン運転性能に寄与する要因の一部である。ドライラン運転成功の理想的な方法は、これらを設計段階で十分考慮しドライラン条件下の製品挙動を事前に予測することである。

ドライラン運転が全くの無潤滑運転と異なるという点は設計の幅を広げると同時に、製品挙動の予測も困難にしている。次に、トランスミッション（特にギヤボックス）の挙動を予測するための基礎データ収集の目的で実施した試験について報告する。

4. ドライラン試験

ドライラン運転中の製品挙動を調べるため、2種類のドライラン試験を実施した。一つが単体軸受試験であり、他方がギヤボックス試験である。単体軸受試験は、ギヤボックス試験供試体の構成部品の一つの軸受を取出し、事前に軸受単体でドライラン運転を実施したものである。ギヤボックス試験は、単体軸受試験実施後、ギヤボックス全体でドライラン運転を実施したものである。

4.1 試験供試体

今回対象としたギヤボックス（以降、供試ギヤボックスと称す）を図1に示す。供試ギヤボックスは、伝達馬力が1400 hp級、入力回転数が約6000 rpmであり、入力軸、出力軸とも2箇所減速比約18のギヤボックスである。また、単体軸受試験に使用した軸受（以降、供試軸受と称す）は、供試ギヤボックスの入力部に使用される円筒ころ軸受である。一般に航空機用ギヤボックスに使用される軸受は、軽量化を念頭においた耐熱合金鋼であるM50材料製品であるが、供試軸受は、将来の低コスト化も考慮したSUJ材料製品である。

4.2 単体軸受試験

本試験は、軸受への給油量を5段階にステップ状に減少させて連続運転し、最終破損に至るまでの運転時間と軸受外輪温度等を

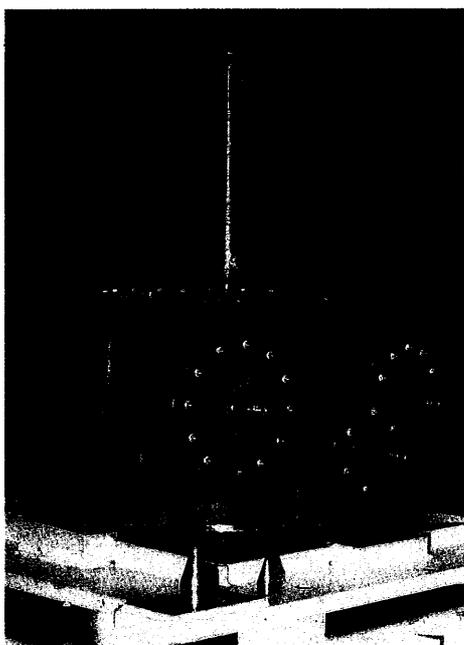


図1 供試ギヤボックスの外観
Overview of test gearbox

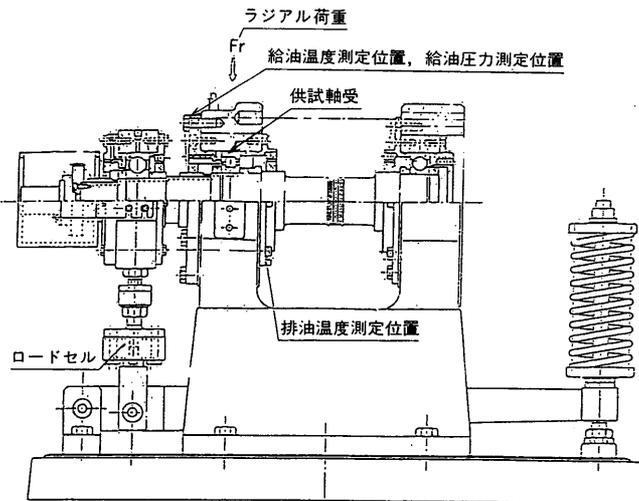


図2 単体軸受試験機の外観
Overview of test equipment for bearing unit test

表1 単体軸受試験条件
Test condition of bearing unit test

ステップ No.	給油量 (l/min)	荷重 (kgf)	運転時間 (min)	ステップ No.	給油量 (l/min)	荷重 (kgf)	運転時間 (min)
1	1	823	30~60	5-1	0	max 50	30~60
2	0.8	823	30~60	5-2	0	647	30~60
3	0.6	823	30~60	5-3	0	647	30~60
4	0.4	823	30~60				

- (注) (1) 回転数：6156 rpm
- (2) 給油温度：100℃
- (3) 使用潤滑油：エクソターボオイル 2380 (MILL-23699 相当)
- (4) ステップ5-1、5-2は排油ポンプ作動、ステップ5-3排油ポンプ停止

表2 単体軸受試験の温度測定データ
Test result of temperature data during bearing unit test

ステップ No	計測温度(℃)					運転時間 (min)
	給油	外輪	内輪	排油	室温	
1	106	108	121	111	27.5	94
2	104	111	123	113	27.5	30
3	105	114	127	117	27.5	34
4	106	116	129	118	27	34
5-1	X	108~117	121~135	X	27	30
5-2		101~107	113~129		27	30
5-3		92~101	108~113		27	30

計測するものである。

4.2.1 試験装置及び試験条件

試験機の概略を図2に示す。潤滑油の遮断は、給油ポンプを停止させると同時に、給油回路も閉じて行った。軸受内外輪温度、給油温度、排油温度等の測定は、ハイブリッドレコーダにより自動記録した。

試験条件を表1に示す。

4.2.2 試験結果

試験ステップ1~5-3における温度測定データを表2に示す。給油量を1 l/minから0.4 l/minに順次減少させたときの外輪温度は、約10℃上昇したが、急激な上昇は認められなかった。

潤滑油遮断試験の運転時間は、ステップ5-1が30 min、ステップ5-2、5-3が60 minである。ステップ5-3は、5-2の試験完了後、給油せずに連続して行ったが、軸受破損の前兆と考えられ

る外輪温度の異常な上昇はなく、運転可能であった。

試験後に外観検査を実施した。軸受には、摩耗、変色、焼付きの前兆は認められなかった。また、わずかに潤滑油の残存が見受けられた。

4.2.3 考察

転がり軸受の動摩擦トルク M は転がり摩擦抵抗 M_f と潤滑油の攪拌抵抗 M_v に分けられる。

$$M = M_f + M_v \text{ (kgf}\cdot\text{mm)} \quad (1)$$

転がり摩擦抵抗 M_f は潤滑油の攪拌抵抗以外の転がり摩擦を含むもので、実験的に式(2)のように表現される⁽²⁾。

$$M_f = f_1 F_r d_m \quad (2)$$

ここで、 f_1 、 F_r 、 d_m は次のように与えられる。

$$f_1 : 0.00025 \sim 0.0003$$

$$F_r : \text{ラジアル荷重 (kgf)}$$

$$d_m : \text{軸受のピッチ円径 (mm)}$$

ドライラン運転時には、潤滑油の攪拌抵抗による発熱はない。そのため潤滑油攪拌抵抗を除き、上式で転がり摩擦抵抗を求め、その摩擦熱を基に軸受試験機部分をモデル化してFEM（有限要素法）にて温度解析を行った。なお、冷却要素は空気中への熱伝達及び軸とハウジングへの熱伝導しかないとした。

得られた結果を図3に示す。解析条件はステップ5-3の条件で行った。外輪側で実測温度 92°C で計算結果 95°C 、内輪側で実測温度 108°C で計算結果 97°C という結果が得られた。実測結果と計算結果の差は約 10°C 以内である。

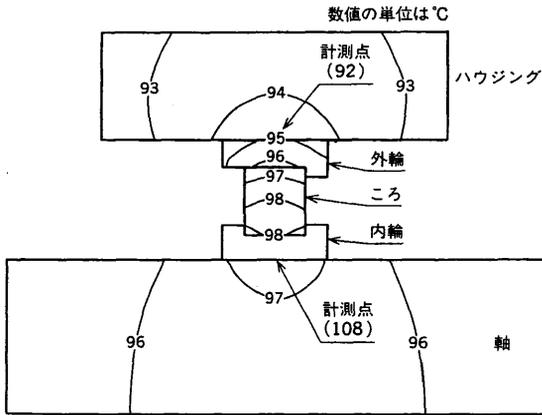


図3 供試軸受の温度解析結果 単体軸受試験に使用した供試軸受の温度解析結果を示す。
Temperature analysis result of test bearing

この計算結果から、今回実施したドライラン試験において、次のことが分かり、試験時間内では、焼付きは発生しなかったと推定される。

- (1) ドライラン運転時の主な発熱源は、転がり摩擦抵抗であり、冷却要素は空気中への熱伝達及び軸とハウジングへの熱伝導である。
- (2) ドライラン運転時の軸受温度は最高で 113°C であり、MILL-23699 相当油が潤滑性能を失う温度（約 300°C ）ではない。
- (3) ドライラン運転中のラジアルすきまを実測内外輪温度差（約 20°C ）から計算すると $20 \mu\text{m}$ 程度は確保できる。

4.3 ギヤボックス試験

本試験は、まず給油運転を行い、潤滑油配管中の排油弁を開くことで内蔵ポンプにより潤滑油を外部に排出させる。潤滑油圧力

が $1.0 \text{ kgf/cm}^2\text{G}$ より下がった時点でドライラン開始とする。

ドライラン運転は、伝達馬力を段階的に増加させて運転し、ギヤボックスを破損に至らしめたときの運転時間とギヤボックス各部の温度等を計測するものである。

4.3.1 試験装置及び試験条件

試験装置の概略を図4に示す。本試験装置は、供試ギヤボックス入力部前方に直流モータを配置し、出力部に配置した水動力計により動力を吸収させるオープン・サイクル方式である。供試ギヤボックスの潤滑油圧力と温度、各部温度、各部振動はアンプを介して計測コンピュータにより記録した。なお、本試験は片発運転で実施した。

また、試験条件を図5に示す。試験は、回転数一定で、トルクをステップ状に変化させる運転を3回実施した。第1回目の試験は供試体を規定回転数で回転させるために必要な最小トルクで、第2回目の試験は双発最小巡航必要馬力相当トルクで、第3回目は最小巡航必要馬力相当トルクよりも大きなトルクでかつ破損を

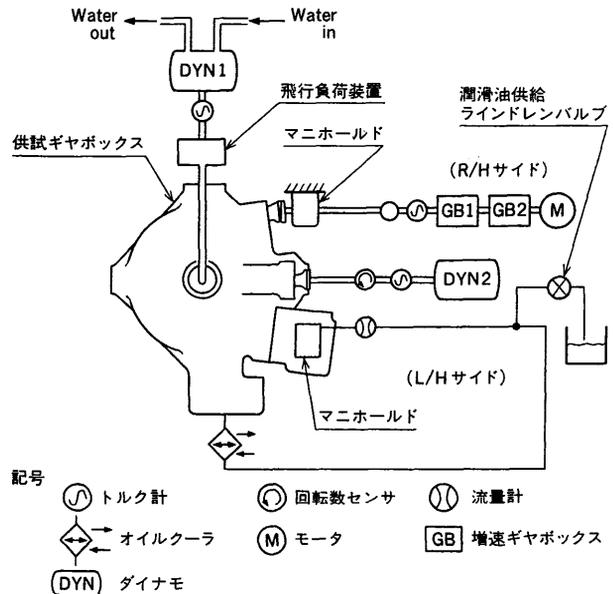


図4 ギヤボックス試験の試験装置概略 ギヤボックス試験に使用した試験装置のシステムダイヤグラムを示す。
System diagram of test equipment for gearbox test

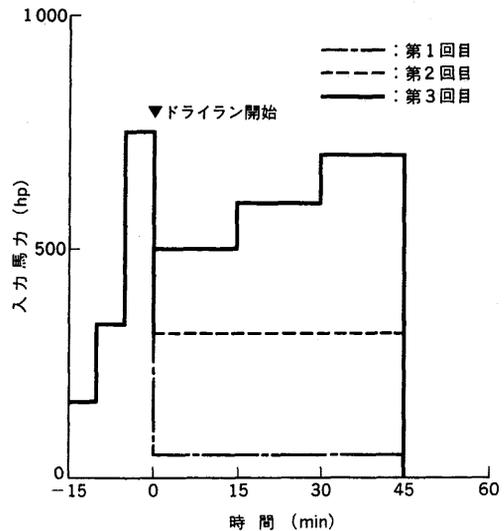


図5 ギヤボックス試験の試験条件 ギヤボックス試験の試験条件を示す。
Test condition of gearbox test

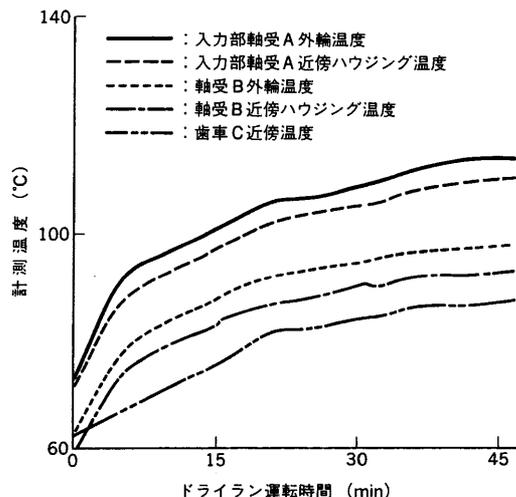


図6 ギヤボックス試験の温度測定データ(第3回目)
第3回目の試験における測定温度の推移を示す。
Test result of temperature data during gearbox
test (3rd test)

起こすため15minおきにトルクをステップ状に増加させた試験である。

4.3.2 試験結果

3回の試験のうち、第3回目の試験における温度測定データを図6に示す。ドライラン運転時間は、第3回目の試験だけで総計47minである。なお、第1回目と第2回目の試験は、20~25minで各部温度が安定し急激な温度上昇が見られず、それぞれ30minで打ち切った。いずれの試験においても、試験中、供試ギヤボックスに装備されたチップディテクタは点灯せず、金属片はなかった。

第3回目の試験の各部温度は、約40minで安定した。また、ドライラン開始後のトルク増加の時点では、供試軸受外輪温度及びその近傍ハウジング温度はその影響で温度上昇が見受けられるが、温度上昇率が増加せず安定した。試験中の最大温度は第1回目、第2回目と同じ入力部軸受の外輪温度で、ドライラン開始時よりも約40°C上昇した。

試験後に分解検査を実施した。ほとんどの部品にわずかながら潤滑油の付着が認められた。歯車及びハウジングには、特に異常はなかった。軸受は、計測温度中最大温度が測定された入力部軸受のケージのめっきに淡茶色の変色が見受けられたが、回転調子は良好であった。

4.3.3 考察

(1) 軸受

ドライラン運転の最終目的としては、接触面がどのような状態になっても軸が回転し動力を伝達することである。そのためには、軸受の焼付きを防止することが第一目的となる。回転数が高く温度的にも厳しい入力軸を支持する軸受に関しての温度解析を行った。解析手法は単体軸受試験の解析と同じ手法を用

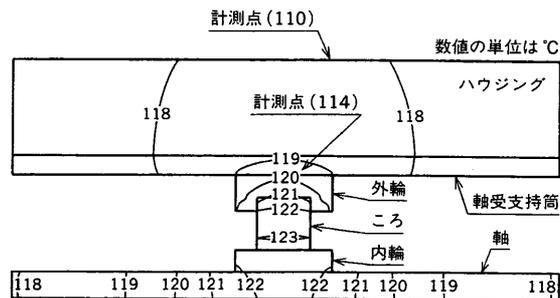


図7 ギヤボックス試験時入力軸受部温度解析結果
ギヤボックス試験中最大トルク負荷時の温度解析結果を示す。
Temperature analysis result of input bearing on max
torque condition during gearbox test

いた。

得られた結果を図7に示す。解析条件は3回目の試験中の最大馬力条件で行った。ハウジング側が実測温度110°Cで計算結果118°C、外輪側がそれぞれ114°Cと120°Cという結果であり、実測結果と計算結果では良好な対応が得られた。

また、ドライラン運転中のラジアルすきまを内外輪温度差(約3°C)から計算すると、軸受すきまの減少は1 μ m程度であり、運転中、問題がないことが分かった。

(2) 歯車

歯車の焼付きに寄与する因子としては、歯面の発熱量のようになる面圧 P と歯面滑り速度 V の積、 PV 値がある。今回のドライラン条件で PV 値を検討してみたが、従来他機種へのりコプタ用トランスミッションの PV 実績値以下であり、歯面に潤滑油が付着している状況下では焼付くことはない。

5. ま と め

ドライラン運転性能に寄与する要因を考慮し、ドライラン条件下の製品挙動を事前に予測するため、単体軸受試験とギヤボックス試験によりドライラン運転中の挙動データを取得した。

いずれの試験においても、30min以上のドライラン運転が実施できた。試験に供された部品は、試験後の分解検査で一部に軽微な変色等が発見された以外は、極めて良好であった。

計測結果からドライラン運転中の転がり軸受の温度を推定する手法を見だし、軸受温度、軸受すきまの点で試験時間内では、焼付きが発生しないことが分かった。

最後に、単体軸受試験を実施し、データを取得・提供していただいたNTN(株)関係者に心から謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 運輸省航空局航空機安全課編集, 耐空性審査要領
- (2) Harris T. A., ROLLING BEARING ANALYSIS (THIRD EDITION)