

UDC 621.822.7:  
621.89.

# 航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-514

オイルミスト，ジェット潤滑玉軸受の  
高 $dn$ 値における性能

宮川行雄・関 勝美・野溝国生

1977年10月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# オイルミスト，ジェット潤滑玉軸受の 高 $dn$ 値における性能\*

宮川 行雄 ・ 関 勝美 ・ 野溝 国生\*\*

## Performance of Ball Bearings with Oil Mist and Jet Lubrication at High $dn$ Values

By

Yukio MIYAKAWA, Katsumi SEKI  
and Kunio NOMIZO

### ABSTRACT

The experiments were conducted to clarify the performance of angular contact ball bearings (#30 BNT) with oil mist lubrication at high  $dn$  values as compared with oil jet lubrication. The test bearings were rotated by a 16 PS air turbine at  $110 \times 10^3$  rpm. A thrust load of 50 kg was exerted as the bearing load with mineral oil base, turbo-oil used to lubricate the test bearing.

The test bearings with oil jet lubrication were operated successfully at a  $dn$  value of  $3.27 \times 10^6$  with oil flow above 2 kg/min. However, the test bearings using oil mist lubrication could not be successfully operated at a  $dn$  value above  $2.16 \times 10^6$  with an air flow of 3 kg/min and oil flow of 4 ml/min. At high  $dn$  values, the bearing temperature rise with oil jet lubrication was smaller than that with oil mist lubrication, despite the large friction moment introduced by much oil of jet. Therefore, it was concluded that oil jet lubrication is best suited to ultra-high-speed operation.

### 1. ま え が き

高速ころがり軸受の潤滑方式にはジェット潤滑とオイルミスト潤滑がある。オイルミスト潤滑はジェット潤滑における油の大部分が冷却剤として作用していることから、潤滑にはごく少量の油を用い、冷却は空気で行うという方式である。ジェット潤滑に比較して冷却に空気を用いているため軸受摩擦が小さく、これに伴って軸受温度上昇も低く高速に適した潤滑法であるといわれている。しかし高速においてオイルミスト潤滑の軸受摩擦と軸受温度上昇は低いにもかかわらず非常に焼付きやすいことは経験的に知られているが、高速領域におけるジェット潤滑とオイルミスト潤滑を定量的に比較検討した例はない。

本報ではアンギュラ玉軸受(#30BNT)について、オイルミスト潤滑、ジェット潤滑の限界回転数と、これに至る過程の軸受温度上昇、摩擦トルクなどの諸特性を比較検討する。

### 2. 実験装置および実験法

#### 2.1 実験装置

高 $dn$ 値における玉軸受の性能ならびに限界回転数を明らかにするため、今回新たに試作した軸受試験機の構造を図1に示す。図2はその外観である。なお比較のため従来われわれが用いてきた高速ころがり軸受試験機を図3に示す。今回試作した試験機とこれまでの試験機との大きな相違点はつぎのようである。第1は従来は主軸の支持軸受に2個の深みぞ玉軸受(#6204)を用いていたが、高速では支持軸受の摩擦損失が著しく大きくなり空気タービンの出力のかなりの割合を消費し、かつ長時間

\* 昭和52年9月17日 受付

\*\* 宇宙研究グループ

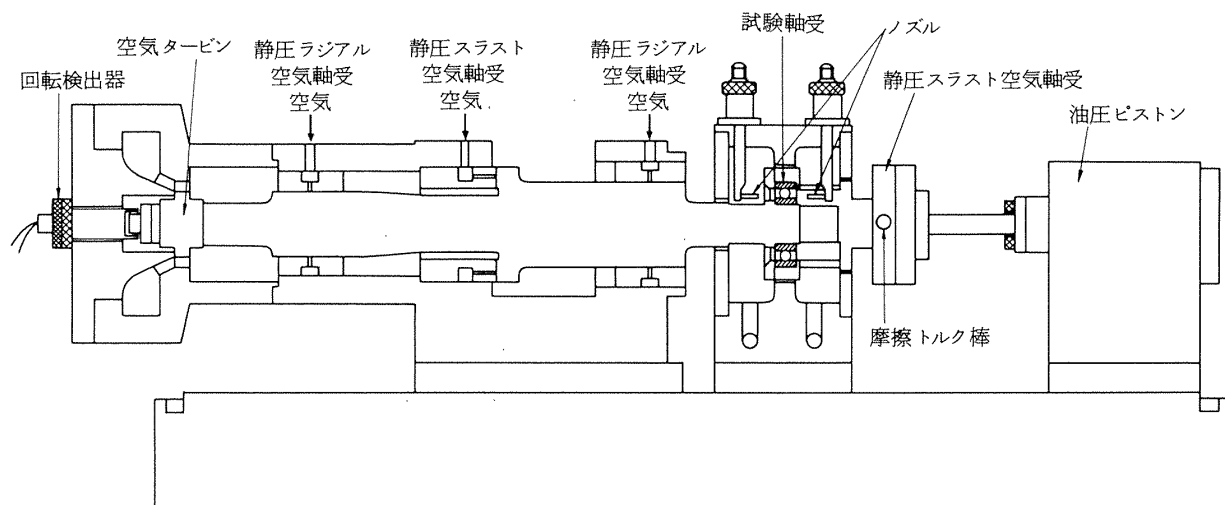


図1 高速ころがり軸受試験機(新型)

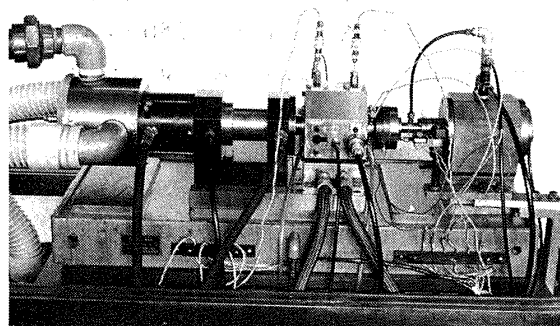


図2 装置の外観

使用するとフレーキングによる破損を生ずるなどの欠点があるため支持軸受を静圧空気軸受に変更したことがある。第2はこれまで主軸はカップリングを介して空気タービンによって駆動されていたが、今回は空気タービンを主軸に直接取り付けられたことである。第3はこれまで試験軸受ハウジングは油圧ピストンに直結されていたが、今回はこの間に静圧空気軸受を入れて摩擦トルクの測定誤差を小さくしたことである。

図1において、試験機は主軸に直結された最高回転数110,000 rpm, 出力16PSの空気タービンによって駆動される。主軸は2個の静圧ラジアル空気軸受によって支持され、軸の右端に試験軸受が取り付けられている。右端の油圧ピストンで静圧スラスト空気軸受を介して試験軸受ハウジングにスラスト荷重を負荷する。このスラスト荷重は主軸中央の静圧スラスト空気軸受によって支持

されている。試験軸受ハウジングのトルクはストレングージをはった板ばねをハウジングからでた摩擦トルク棒にあてて測定した。試験軸受の取り付けは、油圧ピストンでスラスト荷重を50kg 負荷した状態で、主軸に固定したダイヤルゲージの先端を外輪端面にあてて外輪の傾きを1/100 mm 以下におさえた。

試験軸受の温度は熱電対を外輪に接触させ、90°間隔で4箇所測定した。

## 2.2 試験軸受

試験軸受はJIS 4級のアンギュラ玉軸受(#30 BNT)である。保持器は高力黄銅製のみ抜き形で、案内方式は外輪案内である。この形式の軸受を用いたのは、すでに報告<sup>1)</sup>したように、ジェット潤滑下で高速にはこの形式の軸受が最も適していたためである。

## 2.3 潤滑油

潤滑油はMIL-0-6081, 1010級のEsso・ターボオイル10である。

## 2.4 ジェット潤滑方式

潤滑方式はすでに報告<sup>1)</sup>したと同じである。ノズルは1本で給油量は3, 2, 1, 0.5, 0.25 kg/min に変化したが、すでに報告したようにジェット速度を約20 m/s程度にとる必要があるため油量に応じてノズル孔径を表1のように変化した。

## 2.5 オイルミスト潤滑方式

比較的低速のころがり軸受の潤滑に用いるときのオイルミスト潤滑の油量と空気量はそれぞれ数ml/h, 数100 l/min程度である。しかし高速では油量と空気量をかなり増加させる必要があることから、本実験では油量は2 ml/min を標準とし、空気量は3, 2, 1, 0.5, 0.25 kg

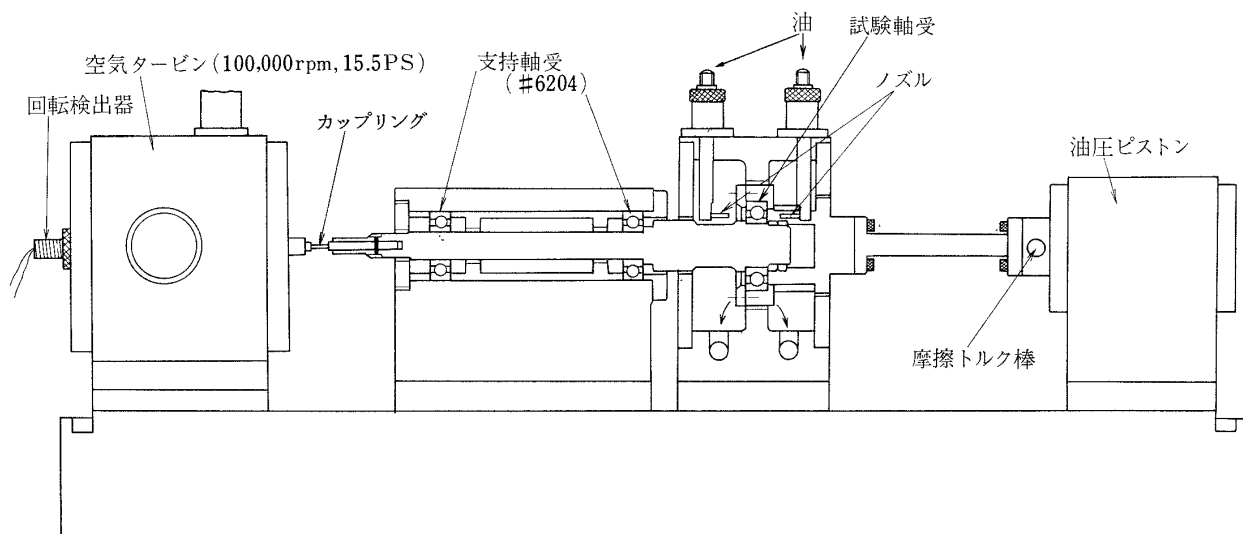


図3 高速ころがり軸受試験機(旧型)

表1 給油量とノズル孔径  
(ジェット潤滑)

給油量 (kg/min)	ノズル孔径 (mm)
3	1.7
2	1.4
1	1.0
0.5	0.7
0.25	0.5

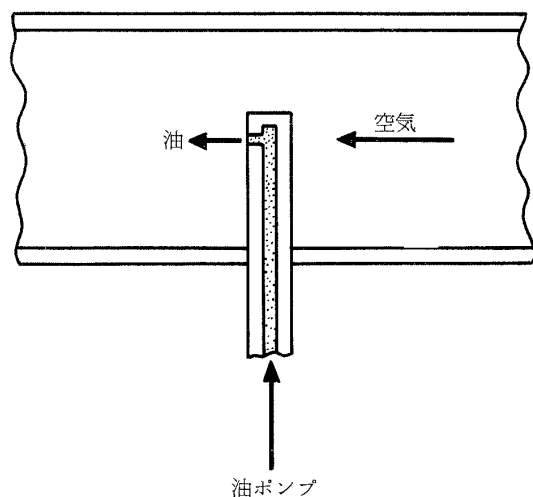


図4 オイルミスト発生装置

/min に変化した。

オイルミスト発生装置はこのように油量大なこと  
から、図4に示すようにノズルから1m先の空気管  
の中に油ポンプで油を吹き出す簡単な方式を用いた。この  
形式では数 $\mu\text{m}$ 以下の細かい油の粒子を用いるマイクロ  
フォッグ形式に比較して、油粒子の大きさはきわめて大  
きいものから小さいものまでまちまちである。したがっ  
て発生装置から軸受までの配管が長いと油粒子は途中で  
落ちる恐れがあるが、実験によると支障はなかった。

ノズルはふつうの直線ノズルである。マイクロフォ  
ッグ形式ではノズル部で気流の速度を著しく大きくしたり、  
あるいは乱流を生ぜしめて実際に軸受に達するときはあ  
る程度粒子を大きくするが、今回は粒子がかなり大きい  
ためその必要はなかった。ノズル数と孔径はつぎの予備  
実験から決定した。

図5は回転数 50,000 rpm, スラスト荷重 50 kg におい  
て、直径 9 mm のノズルを1本用いて空気量を 1 kg/min  
一定とし、油量を 0.5 ml/min から 15 ml/min までに変  
化したときの空気入口温度 25℃からの軸受外輪温度上昇  
である。なお軸受外輪温度は図5に示したように、外輪  
外周の 1, 2, 3, 4 の4個所で測定し、ノズルは1と4の  
中間においた。この結果から明らかなようにノズル1本  
では回転方向の温度変化が大きく、回転方向のノズルに  
もっとも近い1の温度がもっとも低く、ついで急激に増  
大し2で最大となり、3, 4で低下している。この際油  
量が多いほど軸受外輪温度上昇は大きく、図6に示すよ

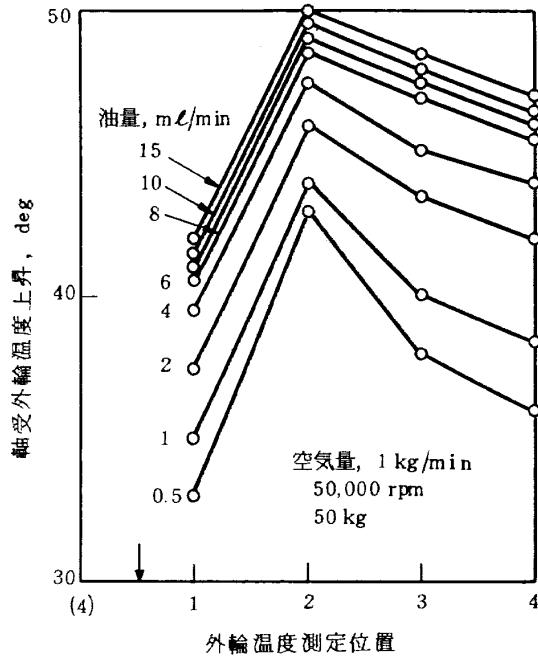


図5 軸受外輪温度上昇と油量 (オイルミスト潤滑)

うに軸受の摩擦トルクも油量が多いほど増大している。ただし回転方向の温度変化は油量が多いほど減少している。これは油量が多いと粘性抵抗は増大するが、回転方向の温度は平均化されることを示している。しかしかなり油量を多くしてもノズル1本では回転方向の温度変化が大きい。

つぎにノズル1本では回転方向の温度変化が大きいことからノズル数を増加してその効果をしらべた。

図7はスラスト荷重 50 kg において、ノズル数×ノズル径を 1本×9 mm φ, 2本×6 mm φ, 4本×3 mm φ に変化し、空気量を 1 kg/min, 油量を 2 mL/min 一定としたときの各回転数における空気入口温度 25℃からの軸受外輪温度上昇である。ノズル数が増えるにしたがって外輪外周の回転方向の温度変化は減少し一様化している。図8は外輪外周の最高温度上昇とノズル数との関係である。このようにノズル数が多いほど回転方向の温度が一様化するとともに最高軸受温度上昇も低下しており、ノズル

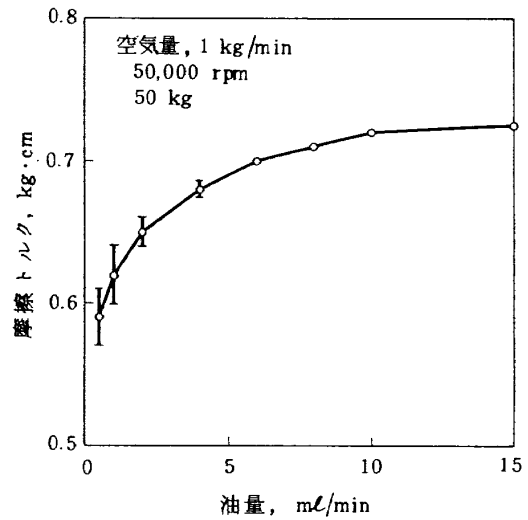


図6 摩擦トルクと油量 (オイルミスト潤滑)

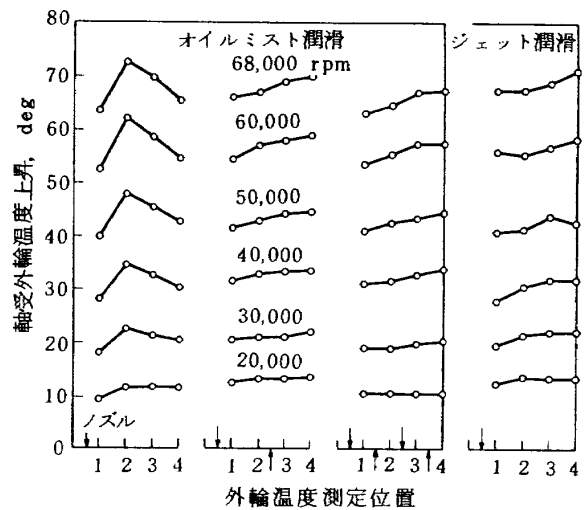


図7 軸受外輪温度上昇とノズル数

数の多いほど有利である。なお図7に比較のためジェット潤滑におけるノズル1本, 油量 1 kg/minの結果も合わせて示したが、この場合はノズル1本でも回転方向の温度変化は少なく、オイルミスト潤滑におけるノズル数4本と匹敵している。

以上の結果から空気量の多い場合にはノズル4本を用い、実験により油の付着性と空気圧を検討しながらノズル数とノズル径は空気量に応じて表2のように変化した。

2.6 実験法

ジェット潤滑の一般の実験はスラスト荷重を 50 kg, 油入口温度を 25℃一定にしたまま、給油量を 0.25 ~ 3 kg/min に変化し、一定油量において許容限界回転数まで順次回転をあげて行ったときの軸受外輪温度、排油温度、摩擦トルク、貫通率を測定した。オイルミスト潤滑においても油量を 2 mL/min 一定とし空気量を 0.25 ~ 3 kg

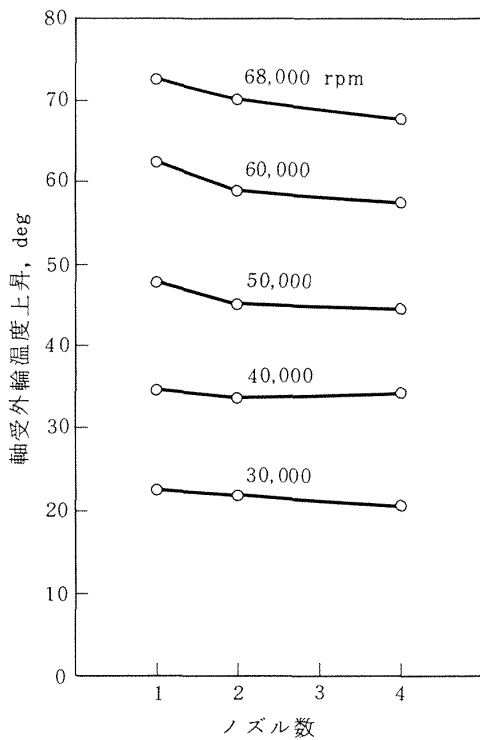


図8 軸受外輪温度上昇とノズル数 (オイルミスト潤滑)

表2 空気量とノズル孔径, 本数 (オイルミスト潤滑)

空気量 (kg/min)	ノズル孔径 (mm)	本数
3	8	4
2	6	4
1	3	4
0.5	3	2
0.25	3	1

/min に変化した以外はジェット潤滑におけると同様である。

### 3. オイルミスト潤滑とジェット潤滑における限界 $dn$ 値

図9はオイルミスト潤滑の空気量 0.25 kg/min + 油量 2 ml/min とジェット潤滑の油量 0.25 kg/min の限界回転数とこの過程における空気入口温度あるいは油入口温度からの軸受外輪温度上昇と回転数との関係である。オイルミスト潤滑の空気量とジェット潤滑の油量は同一であるが、オイルミスト潤滑の軸受温度上昇はジェット潤滑よりも低い。このようにオイルミスト潤滑の軸受温度上昇は低いのであるが 68,000 rpm 付近で急激に焼付く。

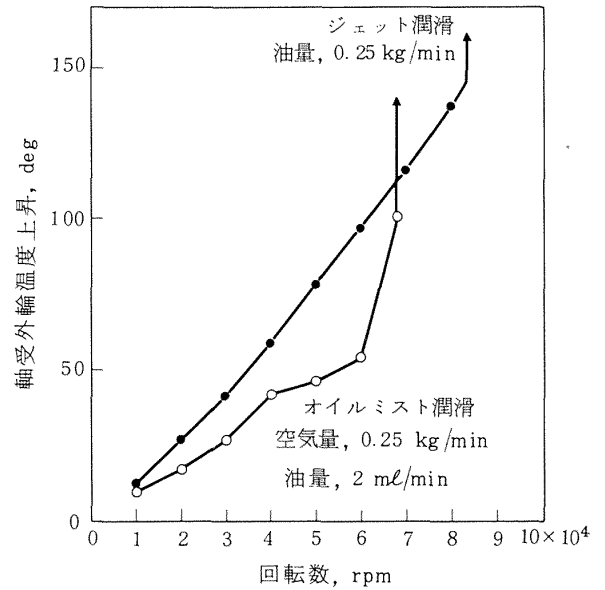


図9 オイルミスト潤滑 (空気量 0.25 kg/min + 油量 2 ml/min) とジェット潤滑 (油量 0.25 kg/min) の軸受温度上昇と回転数

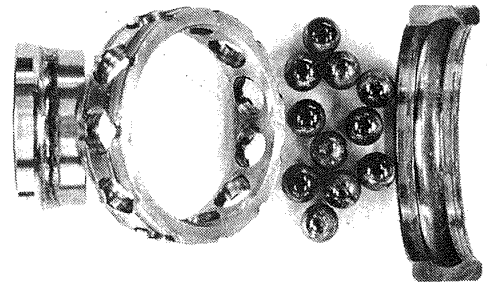


図10 オイルミスト潤滑 (空気量 0.25 kg/min + 油量 2 ml/min) の 68,000 rpm で焼付いた軸受の外観

これに対しジェット潤滑はオイルミスト潤滑よりも軸受温度上昇は高いが焼付きは 83,000 rpm で生じ、限界回転数ははるかに高い。

図10はオイルミスト潤滑で 68,000 rpm, 図11はジェット潤滑で 83,000 rpm で焼付いた軸受の外観である。オイルミスト潤滑では鋼球, 内外輪に保持器材の黄銅が移着して, また鋼球の転動面, 内輪の軌道面は部分的に紫色に変色しておりかなり高温に達したことを示している。なお内輪に比較して外輪の損傷が少ないのは遠心力の関係で油が外輪側にとばされるためである。ジェット潤滑は外輪の案内面を除いて, 鋼球, 内外輪の軌道面への保持器材の黄銅の移着は生じていない。ただ内輪の軌道面が変色して損傷していることはオイルミスト潤滑

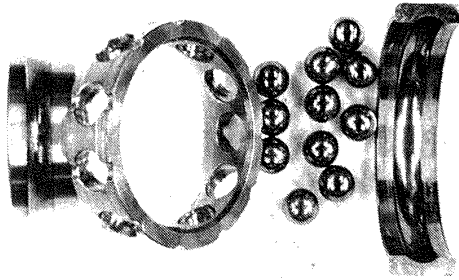


図 11 ジェット潤滑 (油量 0.25 kg/min) の  
83,000 rpm で焼付いた軸受の外観

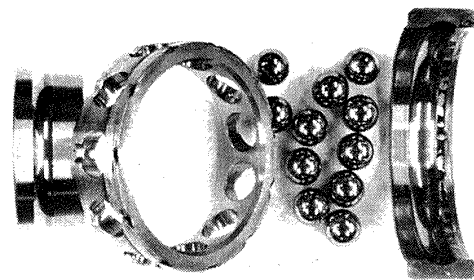


図 14 ジェット潤滑 (油量 0.5 kg/min) の  
91,000 rpm で焼付いた軸受の外観

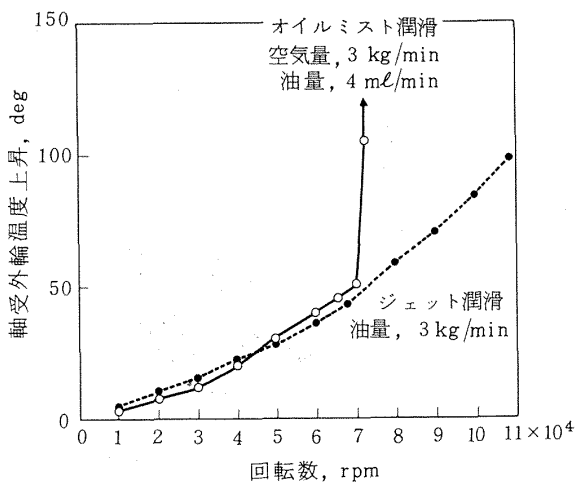


図 12 オイルミスト潤滑 (空気量 3 kg/min + 油量  
4 ml/min) とジェット潤滑 (油量 3 kg/min)  
の軸受外輪温度上昇と回転数

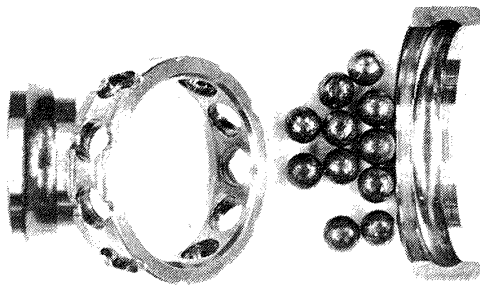


図 13 オイルミスト潤滑 (空気量 3 kg/min + 油量  
4 ml/min) の 72,000 rpm で焼付いた軸受の  
外観

におけると同様であるが、その他の損傷はオイルミスト潤滑よりも非常に少ない。

図 12 はオイルミスト潤滑の空気量 3 kg/min + 油量 4 ml/min とジェット潤滑の油量 3 kg/min の限界回転数とこの過程における空気入口温度あるいは油入口温度からの軸受外輪温度上昇と回転数との関係である。回転数 45,000 rpm まではジェット潤滑よりもオイルミスト潤滑の軸受温度上昇は低いが、これ以上ではジェット潤滑よりもオイルミスト潤滑の軸受温度上昇は大きくなり 72,000 rpm 付近で急激に焼付きを生ずる。これに対しジェット潤滑は 109,000 rpm でもなんら異常なく回転しうることから、限界回転数はさらに高いところにある。

図 13 はオイルミスト潤滑で 72,000 rpm で焼付いた軸受の外観である。オイルミスト潤滑の図 10 に示した油量 2 ml/min のときと比較すると鋼球、内外輪への保持器材の黄銅の移着は大幅に減少しているが、これは今回の油量が 4 ml/min と大きいためと考えられる。しかし鋼球の転動面、内輪の軌道面は変色し損傷している。

図 14 はジェット潤滑の油量 0.5 kg/min で 91,000 rpm で焼付いた軸受の外観である。図 11 の同じジェット潤滑の油量 0.25 kg/min に比較して内輪の軌道面は全く損傷していないが、ノズルの反対側の保持器の案内面の摩耗が著しく、これに対する外輪案内面に保持器材の移着と焼けを生じている。このようにジェット潤滑で油量が多いときの焼付きはいずれもまず保持器と外輪の案内面におこり、この焼付きが限界回転数をおさえている。したがってオイルミスト潤滑で内輪の軌道面、鋼球が損傷するということは、油量が不十分で油ぎれ状態になって焼付くことを示している。

図 15 はオイルミスト潤滑における限界  $dn$  値と空気量、

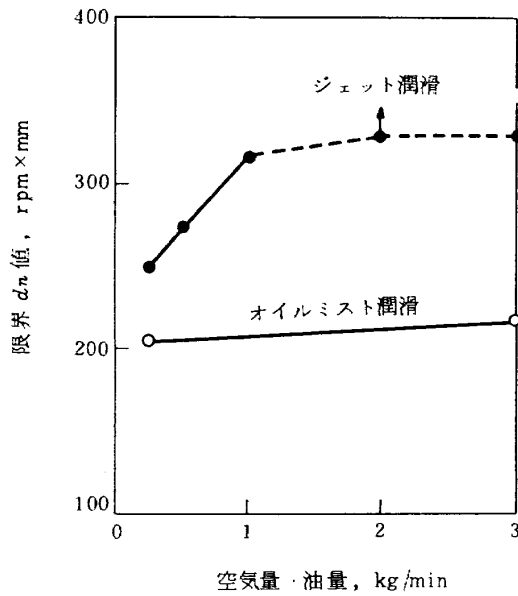


図 15 オイルミスト潤滑，ジェット潤滑の限界  $dn$  値

ジェット潤滑における限界  $dn$  値と油量との関係である。オイルミスト潤滑の限界  $dn$  値は空気量に無関係に  $200 \times 10^4$  内外である。もっとも空気量  $0.25 \text{ kg/min}$  よりも  $3 \text{ kg/min}$  のほうが若干限界  $dn$  値は増大しているが、これはさきに述べたように前者の油量が  $2 \text{ mL/min}$  であるのに対し後者は  $4 \text{ mL/min}$  と 2 倍大きいためと考えられる。ジェット潤滑では油量  $0.25 \text{ kg/min}$  では  $83,000 \text{ rpm}$ ， $0.5 \text{ kg/min}$  では  $91,000 \text{ rpm}$ ， $1 \text{ kg/min}$  では  $106,000 \text{ rpm}$  付近で焼付きを生じている。 $dn$  値ではそれぞれ  $249 \times 10^4$ ， $273 \times 10^4$ ， $318 \times 10^4$  となる。油量  $2 \text{ kg/min}$  以上では  $109,000 \text{ rpm}$  でも異常なく回転し限界  $dn$  値は  $327 \times 10^4$  よりもさらに高いところにある。

オイルミスト潤滑においては空気は冷却剤として作用するから、後で詳細に述べるように空気量が少ないほど軸受温度上昇は高くなる。しかし図 15 においてオイルミスト潤滑の限界  $dn$  値が空気量にほぼ無関係であるということは、この程度の軸受温度上昇の大小は限界  $dn$  値には影響していないといえる。またオイルミスト潤滑の軸受温度上昇は図 9 に示したようにジェット潤滑よりも一般に低く、条件によっては図 12 に示したように若干高い程度であるが、 $dn$  値  $200 \times 10^4$  付近で急激に焼付きを生じジェット潤滑の  $327 \times 10^4$  以上よりも著しく低い。したがってオイルミスト潤滑の限界  $dn$  値がジェット潤滑よりも著しく低いということは、結局オイルミスト潤滑の油量が非常に少ないということに基因すると考えられる。したがってオイルミスト潤滑でももっと油量を増加させれば限界  $dn$  値も増大しうると考えられるが、この実験に用いた油量  $2 \text{ mL/min}$  あるいは  $4 \text{ mL/min}$  でも一般のオイ

ルミスト潤滑に用いられている油量よりもきわめて大きい。

#### 4. 軸受温度上昇，排油・排気温度上昇，摩擦トルクなどの実験結果

3. でオイルミスト，ジェット潤滑の限界回転数を明らかにしたが、以下許容限界回転数以下の両者の軸受温度上昇，摩擦トルク，冷却効果を比較検討するが、ここではそれに必要な実験結果をあげておく。

##### 4.1 オイルミスト潤滑

表 3 にスラスト荷重  $50 \text{ kg}$ ，空気入口温度  $25^\circ\text{C}$  で油量を  $2 \text{ mL/min}$  一定に保持したときの各種空気量に対する空気入口温度からの軸受外輪温度上昇，貫通側の排気温度上昇および摩擦トルクと回転数との関係を示す。なお軸受外輪温度上昇は図 16 において外輪外周 4 個所で測定した値の最大値をとった。

##### 4.2 ジェット潤滑

表 4 にスラスト荷重  $50 \text{ kg}$ ，油入口温度  $25^\circ\text{C}$  一定に保持したときの各種給油量に対する油入口温度からの軸受外輪温度上昇，ノズル側および貫通側の排油温度上昇，摩擦トルク，貫通率と回転数との関係を示す。軸受外輪温度上昇はオイルミスト潤滑におけると同じく、図 17 の外輪外周 4 個所で測定した値の最大値をとった。

#### 5. 軸受温度上昇

##### 5.1 オイルミスト潤滑

図 18 は表 3 の結果から軸受外輪温度  $T_B$  の空気入口温度  $T_A$  ( $25^\circ\text{C}$ ) からの温度上昇 ( $T_B - T_A$ ) と回転数との関係を図示したものである。回転数の増加とともに軸受温度上昇は増加し、いっぽう空気量が多いほど軸受温度上昇は低下している。この軸受外輪温度上昇 ( $T_B - T_A$ ) と回転数  $N$  および空気量  $Q_A$  との関係を図 19，図 20 に示す。

図 19 から ( $T_B - T_A$ ) と  $N$  との関係は

$$(T_B - T_A) \propto N^{1.17 \sim 1.96} \dots\dots\dots (1)$$

であらわされる。

図 20 から ( $T_B - T_A$ ) と  $Q_A$  との関係は

$$(T_B - T_A) \propto Q_A^{-0.31 \sim -0.49} \dots\dots\dots (2)$$

であらわされる。なお  $N$  および  $Q_A$  の指数の小なるほうの値が ( $T_B - T_A$ ) の大なるほうに対応している。

##### 5.2 ジェット潤滑

図 21 は表 4 の結果から軸受外輪温度  $T_B$  の油入口温度  $T_0$  ( $25^\circ\text{C}$ ) からの温度上昇 ( $T_B - T_0$ ) と回転数との関係を図示したものである。回転数の増加とともに軸受温度



表3 オイルミスト潤滑における軸受温度上昇, 排気温度上昇, 摩擦トルクと回転数(空気入口温度 25℃, スラスト荷重 50 kg)

空気量  $Q_A = 3 \text{ kg/min}$ , 油量  $2 \text{ mL/min}$

回転数 rpm	軸受外輪温度上昇 deg	排気温度上昇(1) <sup>*</sup> (貫通側) deg	排気温度上昇(2) <sup>*</sup> (貫通側) deg	摩擦トルク kg·cm
20,000	5.5	2	0.5	0.44
30,000	11.5	5	1.5	0.52
40,000	20	7	3.5	0.60
50,000	28.5	9.5	5.5	0.65
60,000	39	12	7	0.67
68,000	49	14.5	9	0.73

$Q_A = 2 \text{ kg/min}$ , 油量  $2 \text{ mL/min}$

回転数 rpm	軸受外輪温度上昇 deg	排気温度上昇(1) (貫通側) deg	排気温度上昇(2) (貫通側) deg	摩擦トルク kg·cm
20,000	8.5	4.5	2	0.49
30,000	14.5	8	3	0.56
40,000	23	11.5	4.5	0.60
50,000	33	15	7	0.65
60,000	44	20	10	0.65
68,000	56.5	25.5	12.5	0.71

$Q_A = 1 \text{ kg/min}$ , 油量  $2 \text{ mL/min}$

回転数 rpm	軸受外輪温度上昇 deg	排気温度上昇(1) (貫通側) deg	排気温度上昇(2) (貫通側) deg	摩擦トルク kg·cm
20,000	10.5	5	3.5	0.54
30,000	20.5	10.5	8	0.59
40,000	34	16	13	0.64
50,000	44.5	20.5	17	0.62
60,000	57.5	26.5	21.5	0.64
68,000	67.5	32	25.5	0.64

$Q_A = 0.5 \text{ kg/min}$ , 油量  $2 \text{ mL/min}$

回転数 rpm	軸受外輪温度上昇 deg	排気温度上昇(1) (貫通側) deg	排気温度上昇(2) (貫通側) deg	摩擦トルク kg·cm
20,000	14.5	8	6.5	0.49
30,000	28.5	19.5	13.5	0.54
40,000	42	27	20	0.59
50,000	57	36	28	0.62
60,000	74.5	46.5	36.5	0.68

$Q_A = 0.25 \text{ kg/min}$ , 油量  $2 \text{ mL/min}$

回転数 rpm	軸受外輪温度上昇 deg	排気温度上昇(1) (貫通側) deg	排気温度上昇(2) (貫通側) deg	摩擦トルク kg·cm
20,000	18	8	5	0.48
30,000	33.5	20	10	0.56
40,000	48.5	31	16.5	0.58
50,000	67	42.5	26	0.60

\* 排気温度上昇(1)は貫通側の外輪と保持器の間, 排気温度上昇(2)は貫通側の保持器と内輪との間で測定した空気温度上昇。

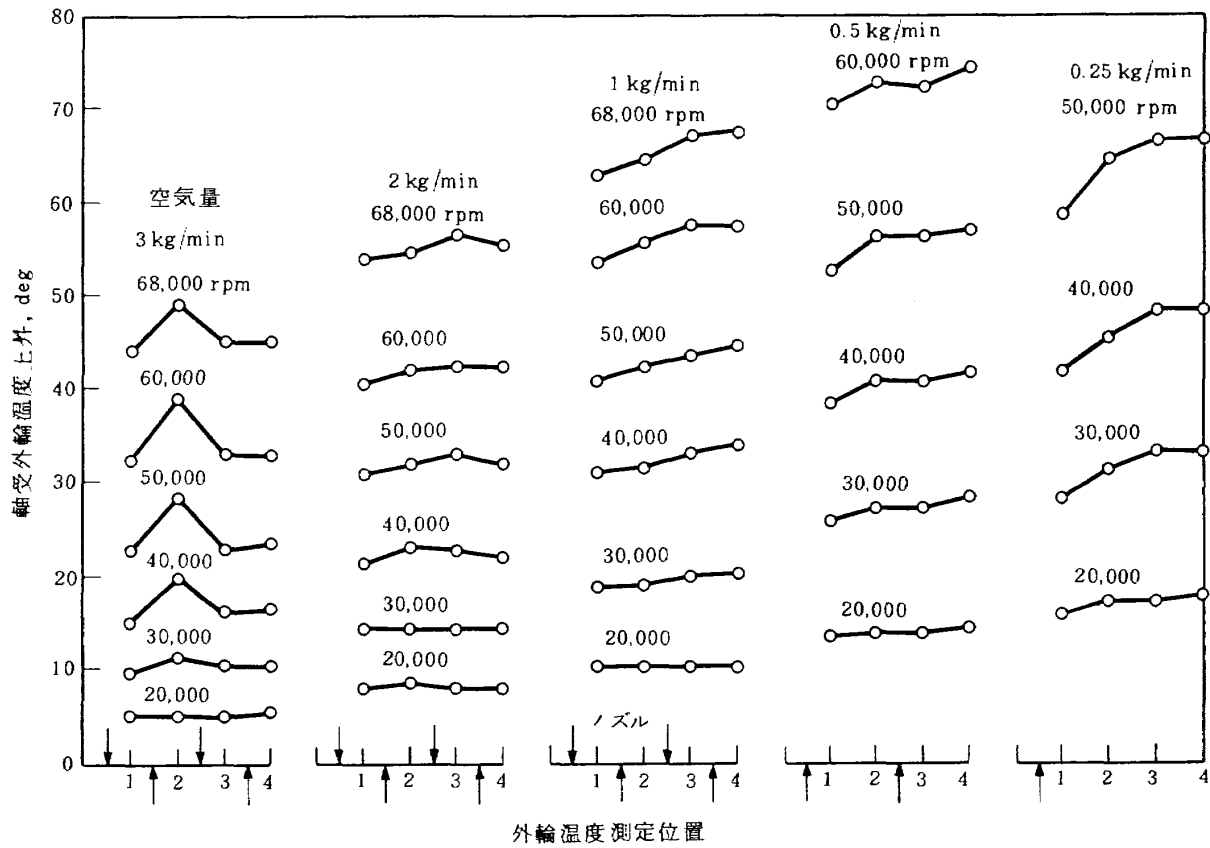


図 16 軸受外輪温度上昇と空気量 (オイルミスト潤滑)

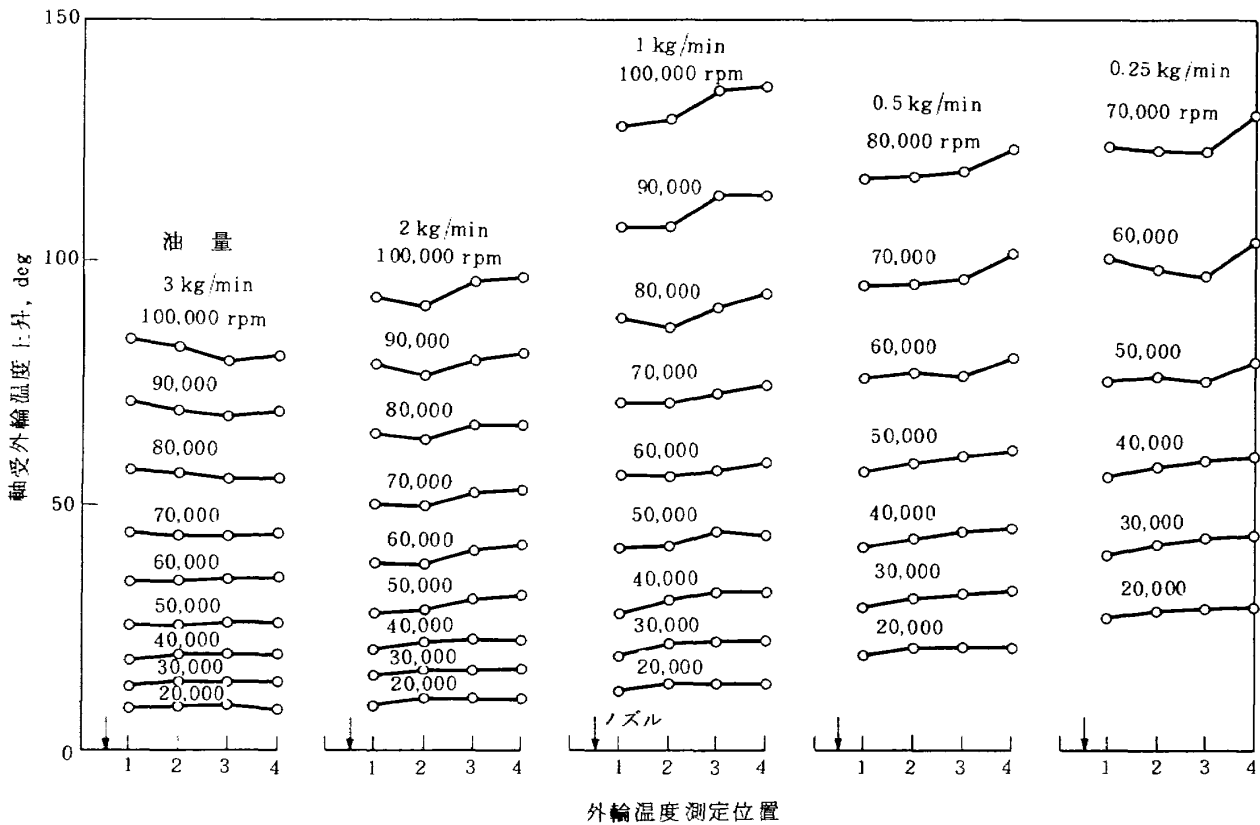


図 17 軸受外輪温度上昇と油量 (ジェット潤滑)

表4 ジェット潤滑における軸受温度上昇, 排油温度上昇, 摩擦トルク, 貫通率と回転数(油入口温度 25℃, スラスト荷重 50 kg)

油量  $Q_0 = 3 \text{ kg/min}$ 

回転数 rpm	軸受外輪温度上昇 deg	排油温度上昇 (ノズル側) deg	排油温度上昇 (貫通側) deg	摩擦トルク kg·cm	貫通率 %
10,000	4.5	3	3	1.12	79.0
20,000	9	6.5	7.5	1.60	69.5
30,000	14	10.5	12	2.10	63.6
40,000	19.5	14.5	18	2.61	55.7
50,000	26	19	24.5	3.16	50.0
60,000	35	24	35	3.61	44.3
70,000	45	29	46	4.00	38.0
80,000	57	33.5	60.5	4.25	35.6
90,000	71	41.5	77.5	4.55	33.0
100,000	82	46	90.5	4.75	30.6

 $Q_0 = 2 \text{ kg/min}$ 

回転数 rpm	軸受外輪温度上昇 deg	排油温度上昇 (ノズル側) deg	排油温度上昇 (貫通側) deg	摩擦トルク kg·cm	貫通率 %
10,000	5.5	3.5	4.5	1.05	81.5
20,000	10.5	9	9.5	1.50	70.6
30,000	16.5	14.5	15.5	2.00	60.5
40,000	22.5	19	21.5	2.43	54.0
50,000	31	25	30.5	2.86	48.5
60,000	41.5	31.5	43	3.25	43.0
70,000	52.5	38	58	3.57	34.0
80,000	66	44.5	75	3.80	36.0
90,000	81	50.5	93.5	3.95	33.3
100,000	96	59.5	111	4.10	34.7

 $Q_0 = 1 \text{ kg/min}$ 

回転数 rpm	軸受外輪温度上昇 deg	排油温度上昇 (ノズル側) deg	排油温度上昇 (貫通側) deg	摩擦トルク kg·cm	貫通率 %
10,000	7	4	5.5	0.95	76.5
20,000	13.5	12.5	12.5	1.37	57.0
30,000	22	19	21	1.70	48.5
40,000	32	27	32	2.04	42.0
50,000	44	37	45	2.33	39.4
60,000	58.5	46.5	62.5	2.65	35.0
70,000	74.5	56	81.5	2.83	32.0
80,000	93	64.5	102.5	2.95	31.5
90,000	113.5	75	127.5	3.21	26.5
100,000	135	90	151.5	3.35	25.5

 $Q_0 = 0.5 \text{ kg/min}$ 

回転数 rpm	軸受外輪温度上昇 deg	排油温度上昇 (ノズル側) deg	排油温度上昇 (貫通側) deg	摩擦トルク kg·cm	貫通率 %
10,000	10	8.5	9.5	0.80	80.0
20,000	21	20.5	19	1.03	57.0
30,000	32.5	31.5	30.5	1.30	50.0
40,000	45	43.5	44.5	1.55	46.0
50,000	61	57	60.5	1.81	43.1
60,000	80	71	81.5	2.00	38.5
70,000	101.5	85	106.5	2.15	34.6
80,000	123.5	99	132.5	2.20	28.0

表4 ジェット潤滑における軸受温度上昇, 排油温度上昇, 摩擦トルク, 貫通率と回転数 (油入口温度 25℃, スラスト荷重 50 kg) - 続き

油量  $Q_o = 0.25$  kg/min

回転数 rpm	軸受外輪温度上昇 deg	排油温度上昇 (ノズル側) deg	排油温度上昇 (貫通側) deg	摩擦トルク kg·cm	貫通率 %
10,000	16	13.5	15.5	0.72	73.0
20,000	29.5	28.5	27.5	0.90	52.0
30,000	44	43	42	1.09	46.0
40,000	60.5	57.5	58.5	1.32	42.5
50,000	79.5	74	77.5	1.47	34.0
60,000	104.5	94	103	1.57	28.6
70,000	130	114.5	131.5	1.62	26.5

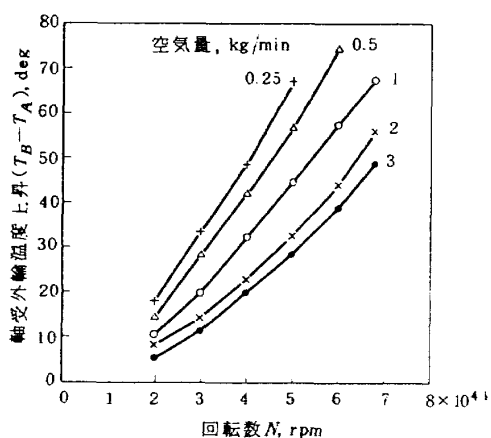


図18 軸受外輪温度上昇と回転数 (オイルミスト潤滑)

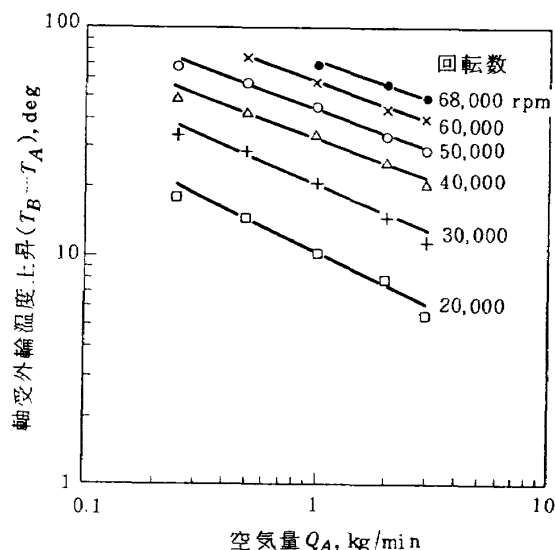


図20 軸受温度上昇と空気量 (オイルミスト潤滑)

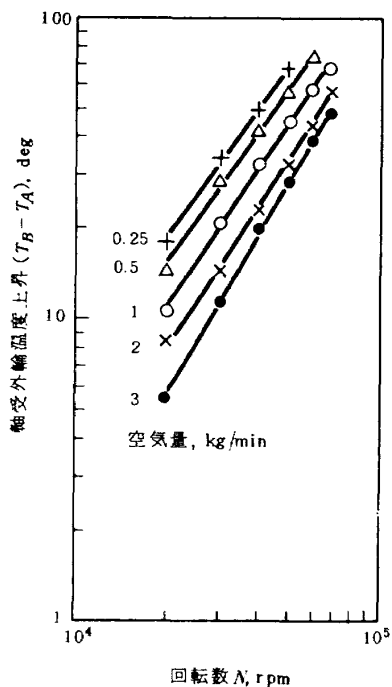


図19 軸受温度上昇と回転数 (オイルミスト潤滑)

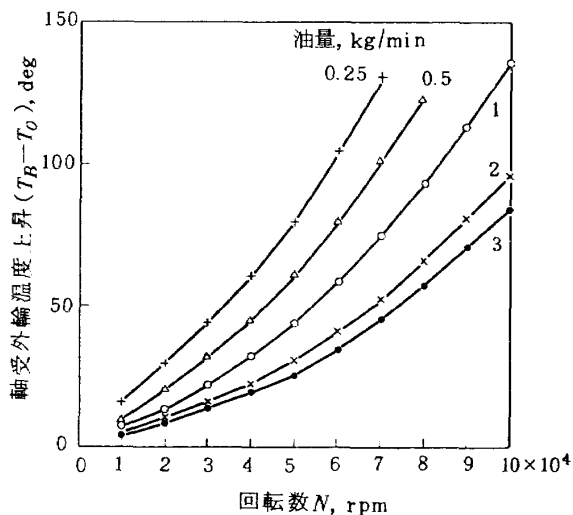


図21 軸受温度上昇と回転数 (ジェット潤滑)

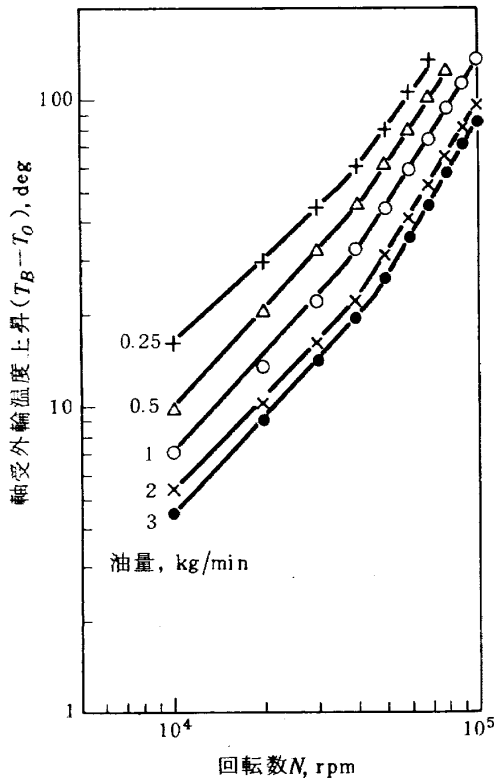


図 22 軸受温度上昇と回転数 (ジェット潤滑)

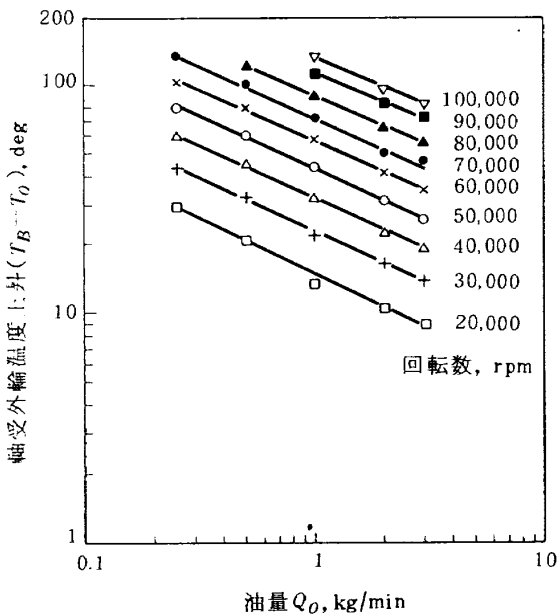


図 23 軸受温度上昇と油量 (ジェット潤滑)

は上昇し、いっぽう油量が多いほど軸受温度上昇は低下している。この軸受外輪温度上昇 ( $T_B - T_0$ ) と回転数  $N$  および油量  $Q_0$  との関係を図 22, 図 23 に示す。

図 22 から ( $T_B - T_0$ ) と  $N$  との関係は 40,000 rpm を境

いとして異なっているが、40,000 rpm 以上の高速領域では

$$(T_B - T_0) \propto N^{1.33 \sim 1.90} \dots\dots\dots (3)$$

であらわされる。

図 23 から ( $T_B - T_0$ ) と  $Q_0$  との関係は

$$(T_B - T_0) \propto Q_0^{-0.31 \sim -0.48} \dots\dots\dots (4)$$

であらわされる。なお  $N$  および  $Q_0$  の指数の小なるほうの値が ( $T_B - T_0$ ) の大なるほうに対応していることはオイルミスト潤滑におけると同じである。

式(1), (2)と式(3), (4)からオイルミスト潤滑とジェット潤滑における回転数, 空気量と油量の指数はほぼ同じである。これはオイルミスト潤滑では空気がジェット潤滑では油が冷却剤として作用していることから考えて当然の結果といえる。

## 6. 軸受摩擦

### 6.1 オイルミスト潤滑

図 24 は表 3 の結果から軸受の摩擦トルクと回転数との関係を図示したものである。摩擦トルクは回転数の増加とともに増大しているがその増加率はきわめて小さい。このことはオイルミスト潤滑では油量がきわめて少ないため摩擦の荷重項が大部分を占め速度項はきわめて小さいことを示している。また空気量を変化しても摩擦トルクはほとんど変わらない。図 18 に示したように空気量の多いほど軸受温度は低いことから軸受温度における油の粘度は大となり、この結果摩擦トルクは空気量の多いほど大きくなるべきである。しかしこの関係が成立していないことは油量がきわめて少ないためと考えられる。

### 6.2 ジェット潤滑

図 25 は表 4 から軸受の摩擦トルクと回転数との関係を図示したものである。なお比較のためオイルミスト潤滑

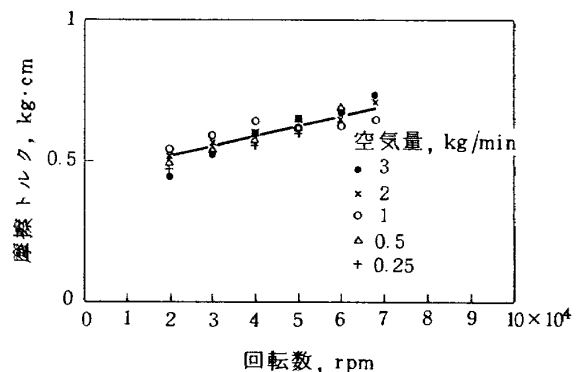


図 24 摩擦トルクと回転数 (オイルミスト潤滑)

の摩擦トルクも合わせて図示した。摩擦トルクは回転数の増加とともに急激に増大し、油量の減少とともに低下している。この摩擦トルク  $M$  (kg·cm) は回転数を  $N$  (rpm), 軸受外輪温度における油の粘度を  $Z_B$  (CP), 油量を  $Q_0$  (kg/min) とすると

$$M = 0.5 + 8.5 \times 10^{-7} Z_B^{0.4} N^{1.3} Q_0^{0.25} \quad (5)$$

であらわされることはすでに報告<sup>1)</sup>した。これから明らかのようにジェット潤滑では摩擦の速度項が大部分を占めている。

### 7. オイルミスト潤滑とジェット潤滑の軸受温度上昇ならびに摩擦トルクの比較

図 26～30 は回転数 60,000, 50,000, 40,000, 30,000, 20,000 rpm におけるオイルミスト潤滑とジェット潤滑における空気入口温度あるいは油入口温度からの軸受外輪温度上昇および摩擦トルクをそれぞれ空気量, 油量に対して図示したものである。

図 26 の回転数 60,000 rpm において, オイルミスト潤滑の摩擦トルクは空気量にかかわらずほぼ一定であるが, ジェット潤滑の摩擦トルクは油量の増加とともに増大している。オイルミスト潤滑の摩擦トルクはジェット潤滑に比較して非常に小さく, 軸受摩擦からみる限りオイルミスト潤滑はジェット潤滑に比較して非常に有利である。しかしこのように摩擦トルクに大きな相違があっても軸受温度上昇には摩擦トルクにおけるほどの大差は認められない。むしろオイルミスト潤滑の空気量 2, 3 kg/min

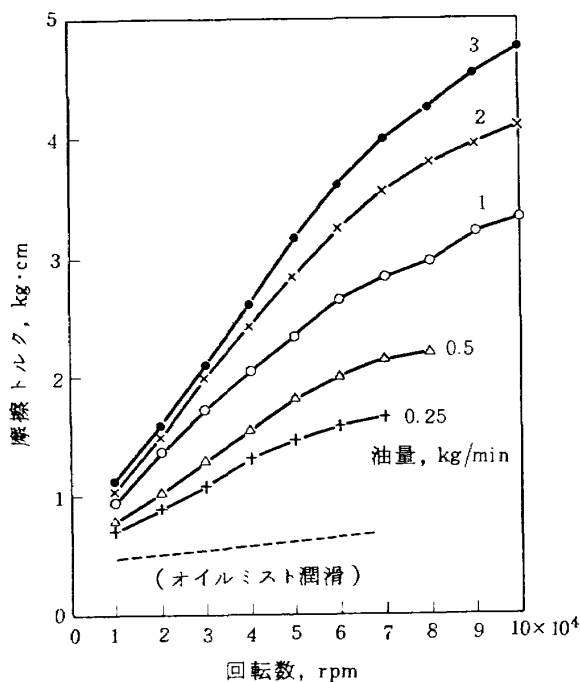


図 25 摩擦トルクと回転数 (ジェット潤滑)

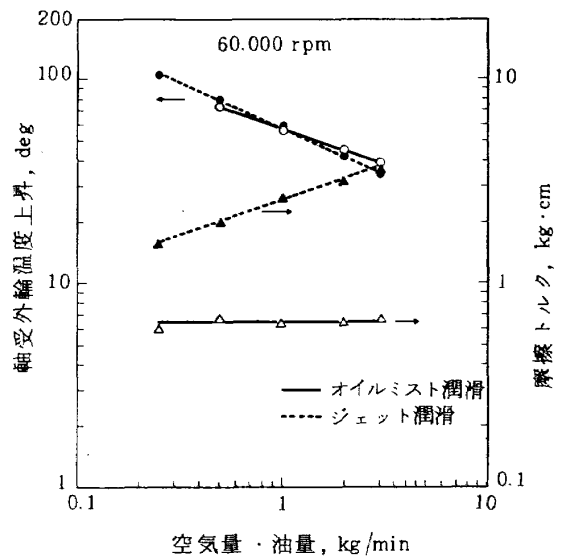


図 26 オイルミスト潤滑, ジェット潤滑の軸受温度上昇と摩擦トルク (60,000 rpm)

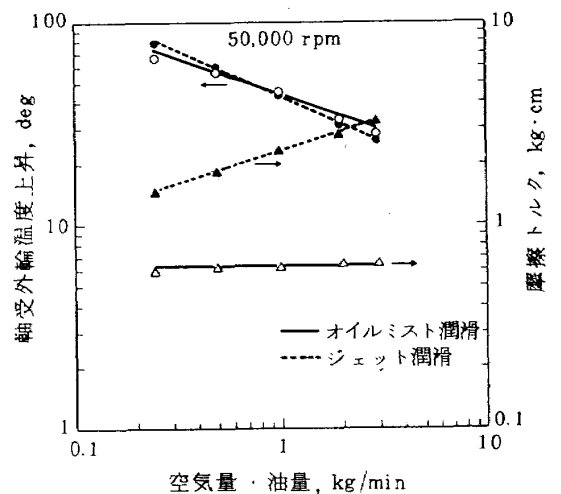


図 27 オイルミスト潤滑, ジェット潤滑の軸受温度上昇と摩擦トルク (50,000 rpm)

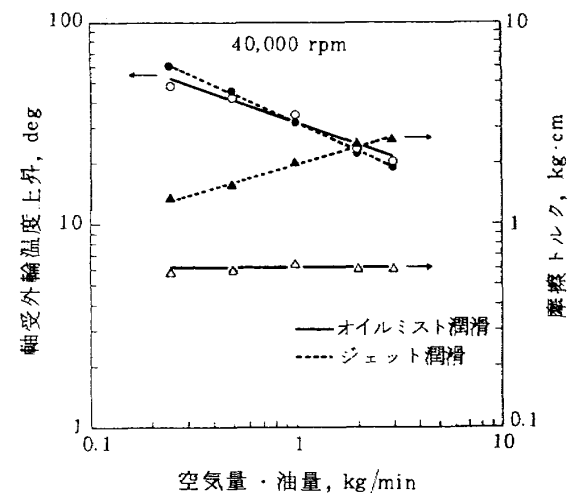


図 28 オイルミスト潤滑, ジェット潤滑の軸受温度上昇と摩擦トルク (40,000 rpm)

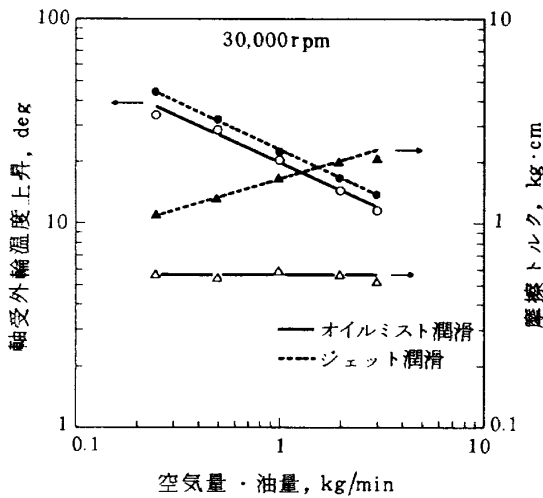


図 29 オイルミスト潤滑, ジェット潤滑の軸受温度上昇と摩擦トルク ( 30,000 rpm )

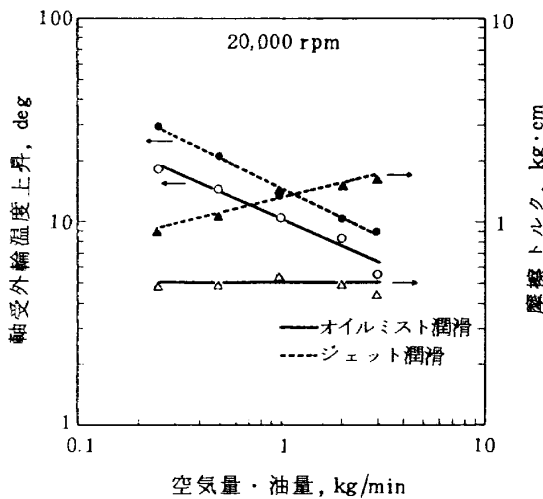


図 30 オイルミスト潤滑, ジェット潤滑の軸受温度上昇と摩擦トルク ( 20,000 rpm )

の軸受温度上昇はジェット潤滑の油量 2, 3 kg/min よりも大きくなっている。軸受温度上昇は軸受摩擦と空気あるいは油が持去る熱量との平衡から決定されるものである。油量の多いジェット潤滑の摩擦トルクはオイルミスト潤滑よりも非常に大きいにもかかわらず軸受温度上昇はオイルミスト潤滑よりも低いということは、油による冷却作用が空気よりも非常に大きいことを意味している。この点については 8. で詳しく検討する。

以上の関係は図 27, 図 28 の 50,000, 40,000 rpm においても成立しており、いずれもオイルミスト潤滑の空気量, ジェット潤滑の油量 1 kg/min 付近を境としてこれ以下の空気量, 油量ではジェット潤滑よりもオイルミスト潤滑の軸受温度上昇は小さいが、これ以上の空気量, 油量ではジェット潤滑よりもオイルミスト潤滑の軸受温

度上昇が大きい。しかし 30,000 rpm の比較的低速になると図 29 に示したように同一空気量, 油量においてジェット潤滑よりもオイルミスト潤滑の軸受温度上昇は小さい。さらに図 30 の 20,000 rpm においてはこのジェット潤滑とオイルミスト潤滑の軸受温度上昇の差は増加している。

以上の結果から回転数 30,000 rpm,  $dn$  値で  $90 \times 10^4$  以下ではジェット潤滑よりもオイルミスト潤滑のほうが軸受温度上昇は小さい。しかし回転数 40,000 rpm,  $dn$  値  $120 \times 10^4$  以上でジェット潤滑の油量の多い場合には、オイルミスト潤滑よりもジェット潤滑の軸受温度上昇は小さい。比較的低速ではオイルミスト潤滑の摩擦トルクがジェット潤滑よりも非常に小さいということが優先してあられ、前者の軸受温度上昇は後者よりも小さい。しかし高速になるとオイルミスト潤滑の摩擦トルクがジェット潤滑よりも非常に小さいことには変りはないが、オイルミスト潤滑の冷却作用がジェット潤滑よりも著しく劣るということが優先し、前者の軸受温度上昇は後者よりも大きくなるといえる。

### 8. オイルミスト潤滑とジェット潤滑の冷却効果の比較

軸受が定常状態に達したとき、軸受摩擦発生熱量と軸受から放散される熱量とは等しくなる。軸受から放散される熱量には、軸受箱および軸の熱伝導、輻射、対流によって周囲空气中に放散される熱量と、油あるいは空気が軸受内を通過するために持去る熱量の 2 つがある。多量の油や空気で冷却を行うジェット、オイルミスト潤滑においては前者は無視して差支えないと考えられる。したがっていま軸受の単位時間の摩擦発生熱量を  $H$  とすると、つぎの関係が成立する。

$$H = C_p Q (T_L - T_I) \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $C_p$  は油あるいは空気の比熱、 $Q$  は油あるいは空気の単位時間流量、 $T_L$  は油あるいは空気の排出温度、 $T_I$  は油あるいは空気の入口温度である。

いま油あるいは空気による熱交換の効率を  $\eta_e$  とすると  $H$  は式(6)から次式であらわされる。

$$\left. \begin{aligned} H &= C_p Q \eta_e (T_B - T_I) \\ \eta_e &= \frac{(T_L - T_I)}{(T_B - T_I)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

ここに  $T_B$  は軸受外輪温度である。

式(7)から

$$(T_B - T_I) = \frac{H}{C_p Q \eta_e} \dots\dots\dots (8)$$

となる。

オイルミスト、ジェット潤滑で  $H$ ,  $C_p$ ,  $Q$  はわかっているから軸受温度上昇を決定するのは  $\eta_e$  の大小である。この  $\eta_e$  について検討すると、油あるいは空気は軸受の両端面から排出されるので軸受内の貫通と逆流を考慮して  $\eta_e$  は次式であらわすことができる。

$$\left. \begin{aligned} \eta_e &= K \left( \frac{T_P - T_I}{T_B - T_I} - \frac{T_R - T_I}{T_B - T_I} \right) + \frac{T_R - T_I}{T_B - T_I} \\ &= K(\eta_p - \eta_r) + \eta_r \\ \eta_p &= \frac{T_P - T_I}{T_B - T_I} \\ \eta_r &= \frac{T_R - T_I}{T_B - T_I} \end{aligned} \right\} \dots (9)$$

ここに、 $T_P$  は油あるいは空気の貫通側排油・排気温度、 $T_R$  は油あるいは空気の逆流側排油・排気温度、 $K$  は貫通率、 $\eta_p$  は貫通油あるいは空気による熱交換の効率、 $\eta_r$  は逆流油あるいは空気による熱交換の効率である。

この熱交換効率を求めるにあたって、ジェット潤滑ではノズルは1本で貫通油、逆流油とも大部分は外輪と保持器の間から流出するので排油温度は図31に示す位置で測定すればよく、また貫通率も測定可能であるから容易に  $\eta_p$  および  $\eta_r$  および  $\eta_e$  を算出することができる。しかしオイルミスト潤滑では4本の対向ノズルを用いているので逆流側の排気温度の測定は困難であり、また貫通率の測定もできない。このためオイルミスト潤滑では図31に示すようにノズルに相対する貫通側の(1)外輪と保持器の間、(2)保持器と内輪の間で排気温度を測定し、これから貫通側の熱交換の効率  $\eta_{p1}$ ,  $\eta_{p2}$  のみを求めた。

表3、表4の結果からオイルミスト潤滑、ジェット潤滑の熱交換の効率を算出し、各種一定空気量ならびに油量において回転数に対して図示すると図32～36のようになる。ジェット潤滑においては、逆流油の熱交換率  $\eta_r$  は回転数の増加とともに減少するが、これに対し貫通油の熱交換率  $\eta_p$  は回転数の増加とともに急激に増大し、高速では各油量において100%あるいはそれ以上に達している。 $\eta_p$  が100%以上ということはいま軸受温度として軸受外輪温度を用いているが、高速では軸受外輪温度よりも保持器や転動体の温度が高く、その結果貫通油温度が軸受外輪温度よりも高くなったためである。このように高速では  $\eta_r$  に比較して  $\eta_p$  は非常に大きく貫通油の冷却効果はきわめて大きいのであるが、ただ高速では貫通率が30%前後に低下し貫通油量が減少するため潤滑油全体の熱交換の効率である  $\eta_e$  は  $\eta_r$  よりも10～30%程度増加しているにすぎない。

オイルミスト潤滑においては貫通側の空気の熱交換効

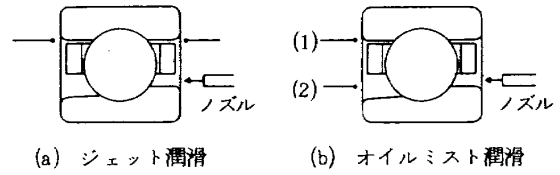


図31 オイルミスト潤滑、ジェット潤滑の貫通、逆流側の温度測定位置

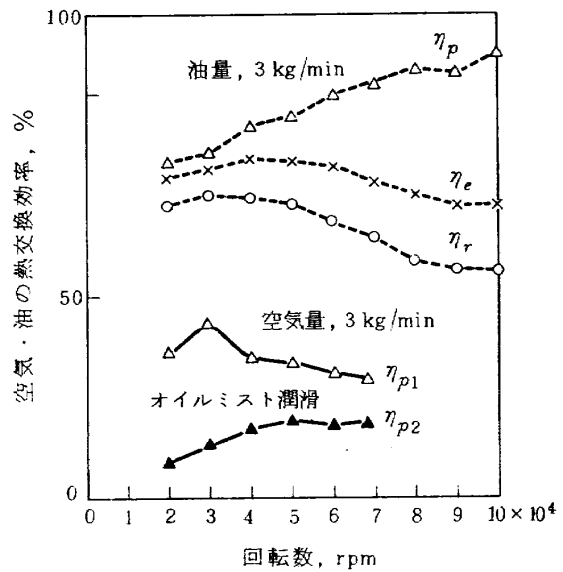


図32 オイルミスト潤滑、ジェット潤滑の空気、油の熱交換効率と回転数 (3 kg/min)

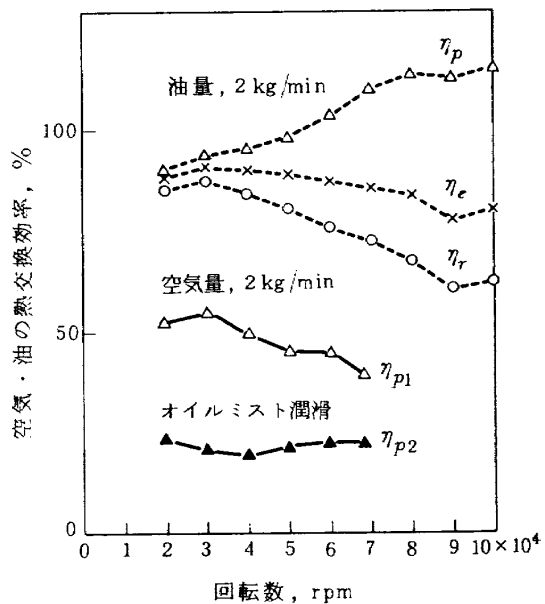


図33 オイルミスト、ジェット潤滑の空気、油の熱交換効率と回転数 (2 kg/min)



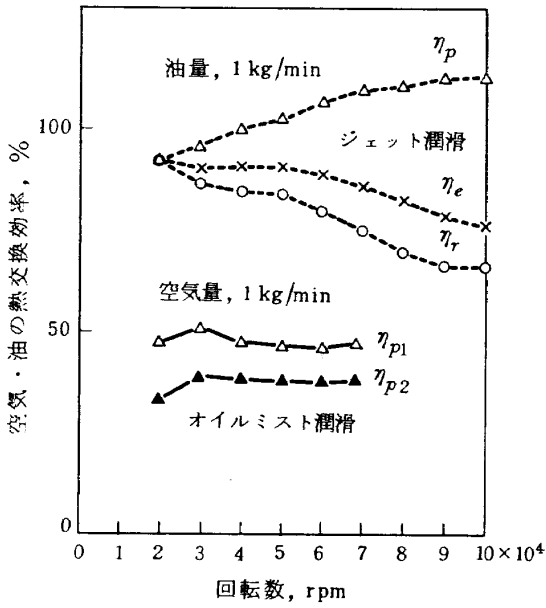


図 34 オイルミスト、ジェット潤滑の空気、油の熱交換効率と回転数 ( 1 kg/min )

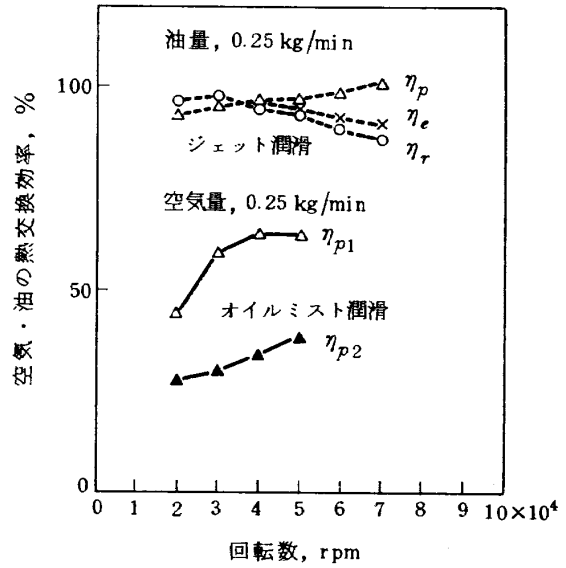


図 36 オイルミスト潤滑、ジェット潤滑の空気、油の熱交換効率と回転数 ( 0.25 kg/min )

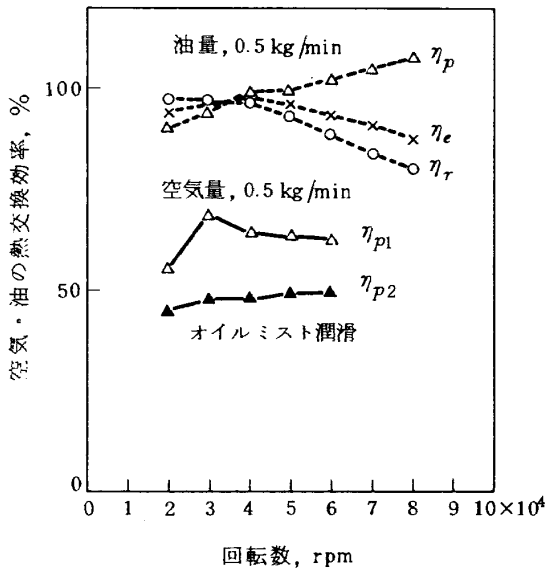


図 35 オイルミスト潤滑、ジェット潤滑の空気、油の熱交換効率と回転数 ( 0.5 kg/min )

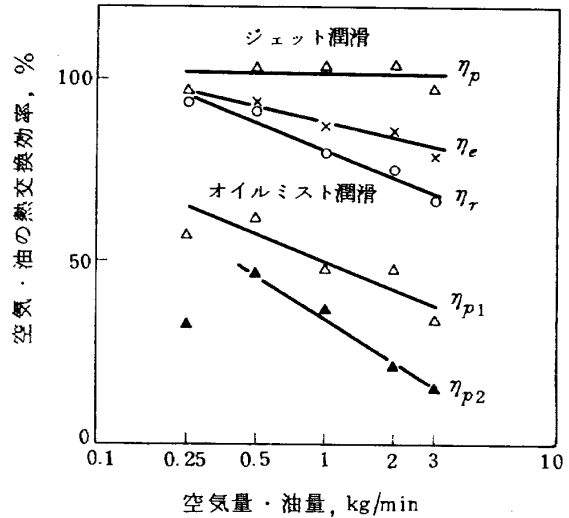


図 37 オイルミスト潤滑、ジェット潤滑の空気、油の熱交換効率と空気量、油量

率  $\eta_{p1}$ 、 $\eta_{p2}$  しか求めることができなかったが、ジェット潤滑の例からいって  $\eta_{p1}$  が最も大きく  $\eta_r$  および  $\eta_e$  はこれよりも小さいと考えてよい。この  $\eta_{p1}$  でジェット潤滑の熱交換効率と比較してもオイルミスト潤滑の空気の熱交換効率はジェット潤滑における油の熱交換効率よりも非常に小さい。とくにオイルミスト潤滑において  $\eta_{p2}$  が  $\eta_{p1}$  よりも小さいことは軸受から熱を十分奪わないうちに中を素通りする空気の割合が多いことを示している。このように同一空気量、油量においてオイルミスト潤滑の冷却効果はジェット潤滑よりも著しく劣る。

図 32～36 において空気量、油量が減少するにしたがって  $\eta_{p1}$ 、 $\eta_{p2}$ 、 $\eta_r$ 、 $\eta_e$  は増大している。これは空気量、油量が多いと実際の軸受面に触れて有効な熱交換を行う割合が少なく、空気量、油量の減少とともにこの割合が大きく増加することを示している。空気、油の熱交換効率は回転数によって変化しているがその平均をとって空気量、油量に対して示すと図 37 のようになる。オイルミスト潤滑の全体の熱交換効率  $\eta_e$  は  $\eta_{p1}$  と  $\eta_{p2}$  の中間にあると考えられるがジェット潤滑の  $\eta_e$  に比較して空気量の増加による減少が大きい。オイルミスト潤滑とジ

ジェット潤滑の軸受温度上昇に摩擦トルクにおけるほどの大きな差がみられるということは、式(8)においてジェット潤滑よりもオイルミスト潤滑の  $H$  は小さいが、いっぽう  $C_p$ ,  $\eta_e$  が小さいためである。とくに高  $dn$  値領域でジェット潤滑の摩擦トルクはオイルミスト潤滑よりも非常に大きいにもかかわらず油量が多い場合には軸受温度上昇はかえってオイルミスト潤滑よりも低いということは、潤滑油による熱交換効率が空気の熱交換効率よりも非常に大きいためである。

## 9. 結 論

アンギュラ玉軸受(#30 BNT)についてオイルミスト, ジェット潤滑における限界  $dn$  値, 軸受温度上昇, 摩擦, 冷却特性などの比較を行ったが主な結果はつぎのとおりである。

1) オイルミスト潤滑の限界  $dn$  値は空気量, 油量を非常に多くしても  $200 \times 10^4$  付近である。これに対しジェット潤滑の油量の多いときの限界  $dn$  値は  $327 \times 10^4$  以上である。したがって超高速にはオイルミスト潤滑よりもジェット潤滑が適している。

2)  $dn$  値で約  $100 \times 10^4$  以下では軸受外輪温度上昇はジェット潤滑よりもオイルミスト潤滑のほうが小さい。しかし高  $dn$  値領域では両者の間にあまり差はなくなり、

むしろジェット潤滑の油量の多い場合はオイルミスト潤滑よりも軸受温度上昇は小さい。

3) オイルミスト潤滑の軸受摩擦は速度項がきわめて小さくほとんど荷重項から成り立っている。これに対しジェット潤滑の軸受摩擦はオイルミスト潤滑よりも非常に大きく、また摩擦の大部分は速度項から成り立っている。

4) オイルミスト潤滑における空気の熱交換効率はジェット潤滑の油の熱交換効率よりも非常に小さい。オイルミスト潤滑の軸受摩擦が非常に小さいにもかかわらず高  $dn$  値領域ではジェット潤滑よりも軸受温度上昇が大きいということは、油に比較して空気の比熱と熱交換効率が小さく冷却作用に劣るためである。

## 文 献

- 1) 宮川行雄, 関勝美, 横山正幸: 高  $dn$  値における玉軸受の性能に関する研究, 航技研報告, TR-284 (1972)  
宮川行雄, 関勝美, 横山正幸: 高  $dn$  値における玉軸受の性能に関する研究 (第1報~第5報), 潤滑, Vol. 17, No. 10 (1972) pp.622-653 ; Vol. 17, No. 12 (1972) pp. 820-839

---

## 航空宇宙技術研究所報告514号

昭和52年10月発行

発行所 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺町1880  
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182  
印刷所 株式会社 共 進  
東京都杉並区久我山4-1-7(羽田ビル)

---

