

十分潤滑下の玉軸受のトルク計算方法の実験検証

Experimental Validation of Torque Calculation for Ball Bearings under Fully Flooded Lubrication

NTN (株) (正) \*江川 航平 (正) 坂口 智也

Kouhei Egawa\*, Tomoya Sakaguchi\*\*

\*NTN Corporation, \*\*NTN Next Generation Research Alliance Laboratories, Osaka University

1. はじめに

油潤滑下における玉軸受のトルクの主要因である転がり粘性抵抗の簡易計算式はいくつか提案されているものの、その計算値が相互に異なる。これは各計算式で想定した軌道面幅（ヘルツ接触の平面幅）が異なるためと考えられる、そこで、著者ら<sup>1)</sup>は、任意の軌道面幅に対応できる計算式を考案し従来の計算式と比較し、上記の考えが正しいことを示した。

本研究では、既報<sup>1)</sup>の転がり粘性抵抗式を用いて求めた玉軸受のトルク計算値を実測値と比較し、その妥当性を検証するとともに、トルクの支配要因を考察した。なお、トルク計算ではスターベーションを未考慮なため、トルク測定を十分潤滑下で行った。

2. 玉軸受のトルク計算方法

Jones の方法<sup>2)</sup>を参考に、一定の荷重・速度下の玉軸受における転動体と軌道輪の静的釣合い状態を求める。なお、本方法では、転動体に作用する遠心力も考慮した。次に、転がり粘性抵抗を含む下記①～④の 4 種の力が作用した転動体の公転方向の力および自転モーメント（ラジアル方向とアキシアル方向の 2 軸まわり）が釣合っていると仮定し、これらの釣合い式を解く。これら釣合い式の独立変数である転動体の自転角速度、公転角速度および自転軸角が求まり、その結果として転動体および内外輪に作用する力ならびに軸受トルクを求める。

① 転がり粘性抵抗

接触部近傍で発生した圧力勾配により発生する Poiseuille 流れによるせん断抵抗であり、既報<sup>1)</sup>で報告した任意の軌道面幅を考慮可能な計算式(1)で求める。式(1)に使用する軌道面幅には、軌道面をヘルツ接触計算上の平面に投影した幅を用いた。

② トラクション

転動体-軌道面間の微小すべりにより油膜内に発生するせん断力であり、式(2)の様にトラクション係数  $\mu$  と転動体荷重  $w$  の積で計算することとした。トラクション係数は、混合潤滑下も対応できるよう、村木・木村の式<sup>3)</sup>を Masjedi の式<sup>4)</sup>に導入し計算することとした。

③ 転動体-保持器間で発生するせん断抵抗

転動体-保持器間に存在する潤滑油のせん断抵抗であり、式(3)で計算することとした。転動体は保持器中心に存在し、転動体-保持器間のすきま  $h$  は油で満たされていると仮定した。

④ 潤滑油の掻き分けによる抗力（以下、ドラッグ力）

軸受内に存在する潤滑油が転動体によって掻き分けられる時の抵抗であり、式(4)を用いて計算することとした。式(4)中の抗力係数  $C_d$  は Gupta の計算式<sup>5)</sup>を使用した。 $C_d$  の減少率  $\alpha_d$  は、Marchesse らの報告（0.2～0.3 倍程度）<sup>6)</sup>を参考に 0.25 とした。

$$F_{r,w} = \frac{(f_{r,c} + f_{r,nl} + f_{r,nr})\alpha}{R_x^2} = 3.44U^{0.696}G^{1.07}W^{0.442}k^{0.578} + 2.88U'^{0.892}\left(R_y/R_x\right)^2\left\{2 - \exp\left(-1.01L_{left}^{0.764}\right) - \exp\left(-1.01L_{right}^{0.764}\right)\right\}$$

$$F_T = \mu w$$

$$F_p = \iint \frac{\eta_0 u(x,y)}{h(x,y)} dx dy$$

$$F_d = \frac{1}{2} \alpha_d C_d \rho_L A u_c^2$$

Table 1 Torque test condition

Bearing type	6204, 6208
Rotation Speed, min <sup>-1</sup>	1 000～4 000
Axial load $F_a$ , N	1 000, 3 000
Lubricant	Paraffin mineral oil ISO VG32, ISO VG68
Initial oil temperature, °C	50
Lubrication method	Oil bath (soaked in oil)

3. 実験検証とトルク要因分析

3.1 計算値と実測値の比較

Table 1 にトルク測定条件を示す。また、Fig. 1 に本試験で用いたトルク試験機を示す。既報<sup>1)</sup>で報告した転がり粘性

抵抗式は十分潤滑下を仮定しているため、油浸漬条件で試験した。

Figure 2 に、1000 N の  $F_a$  を負荷した 6208 の計算値と実測値を示す。なお、計算での油の温度には外輪温度の測定値を使用した。実線は式(1)を転がり粘性抵抗に用いた計算値であり、一点鎖線は式(1)中の  $L_{left}, L_{right} = 0$ 、つまり接触部のみを考慮した計算値である。式(1)中の接触部のトルク計算値は実測値に対して 20~30%程度小さい。一方、非接触部の転がり粘性抵抗を考慮した場合の計算値は、実測値と概ね等しい（最大誤差 約 6.7%）。なお、軸受型番 6204 においても、計算値と実測値は概ね一致した。

### 3.2 トルク要因分析

Figure 3 に本試験条件下のトルクの内訳を示す。計算条件は、軸受型番 6208,  $F_a = 1000$  N, 潤滑油種 VG68 である。本条件において、軸受トルクの 90%程度が転がり粘性抵抗であり、転動体-保持器間で発生するせん断抵抗とドラッグ力は小さい。なお、転動体-軌道面間の微小すべりによるトラクションの影響は荷重の増加に従って変化し、 $F_a = 1000$  N で  $1000 \text{ min}^{-1}$  の場合は全体の 13%,  $4000 \text{ min}^{-1}$  の場合は全体の 6%を占めるのに対し、 $F_a = 3000$  N で  $1000 \text{ min}^{-1}$  の場合は全体の 43%,  $4000 \text{ min}^{-1}$  の場合は全体の 24%を占める。

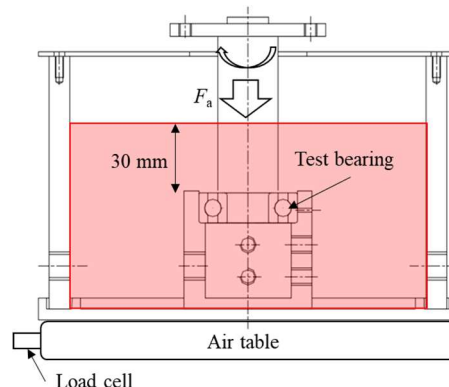


Fig. 1 Testing apparatus

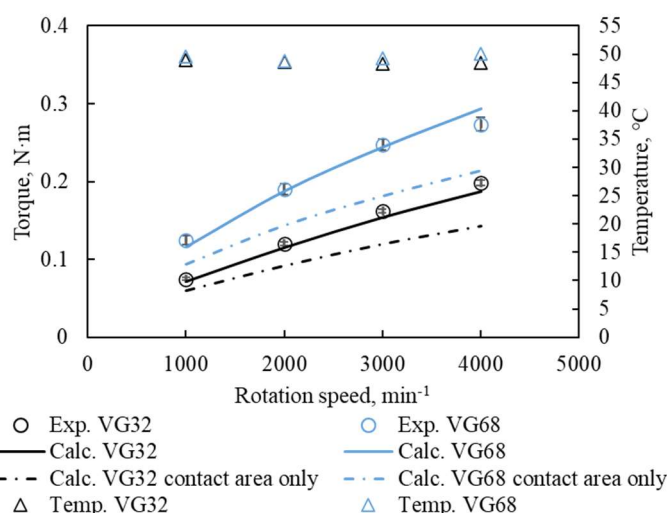


Fig. 2 Calculated and measured torques of 6208 under  $F_a$  1000 N

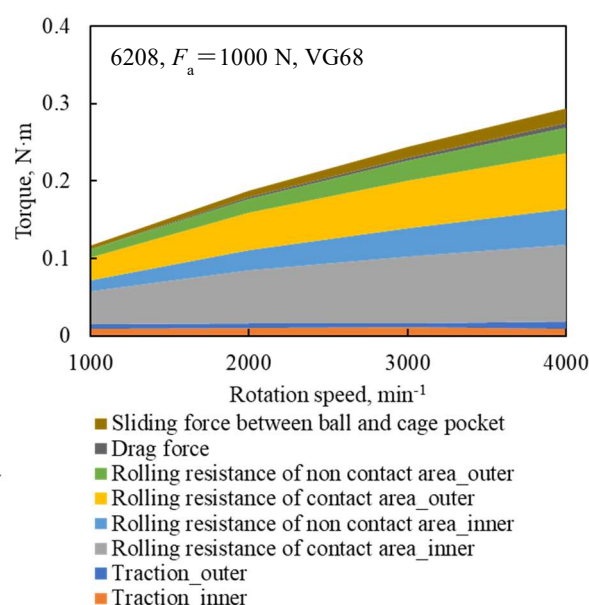


Fig. 3 Obtained torque factors of 6208 under  $F_a$  1000 N, VG68

## 4. まとめ

既報<sup>1)</sup>で構築した転がり粘性抵抗式(1)を用いて求めた深溝玉軸受のトルク計算値は、十分潤滑下での実測値とよく一致した。また、本計算条件下において、軸受トルクの主要因は転がり粘性抵抗と転動体-軌道面間の微小すべりによるトラクションであり、転動体-保持器間で発生するせん断抵抗とドラッグ力の影響は小さいと言える。

一方、e-Axle 等に使用される玉軸受は、回転速度が高いため、スターベーションが生じると予想する。引き続きこれに対応するための検討を行う。

## 参考文献

- 1) 江川, 坂口, 十分潤滑下の玉軸受の転がり粘性抵抗式. トライボロジー会議予稿集 東京 2024-5, 5.
- 2) A. B. Jones, Analysis of Stresses and Deflections, NEW DEPARTURE, 1946.
- 3) 村木正芳, 木村好次, 潤滑油のトラクション特性に関する研究 (第2報) —非線形粘弾性モデルによるトラクションの熱的解析—, 潤滑, 28-10(1983), 753-760.
- 4) M. Masjedi and M. M. Khomsari, Theoretical and experimental investigation of traction coefficient in line-contact EHL of rough surfaces, Tribol. Int., Vol. 70 No. 11(2014), pp. 179-189.
- 5) P. K. Gupta, Advanced Dynamics of Rolling Elements, (1984), 39, Springer-Verlag New York Inc.
- 6) Y. Marchesse, C. Changenet, F. Ville, Numerical Investigations on Drag Coefficient of Balls in Rolling Element Bearing, Tribology Transactions, Volume 57, Issue 5, (2014), pp. 778-785.