

# 転がり軸受に封入した液体の蒸発特性 —直鎖炭化水素の鎖長の影響—

## Evaporation Characteristics of Liquids Sealed in Rolling Bearings

### — Effect of Carbon Chain Length of Alkanes —

NSK (正) \*中川 和紀 (正) 丸山 泰右 Science Tokyo (正) 桃園 聡

Kazunori Nakagawa\*, \*\*, Taisuke Maruyama\*, Satoshi Momozono\*\*

\*NSK Ltd., \*\*Institute of Science Tokyo

## 1. 背景と目的

転がり軸受は回転軸を支持し、摩擦を低減することにより機械の高効率化と長寿命化に寄与する重要な機械要素である。近年、SDGs (Sustainable Development Goals) への取り組みやカーボンニュートラルの目標達成に向けて、転がり軸受の低トルク化・長寿命化が重要な課題となっている。低トルク化の対策の一つとして、潤滑油の低粘度化が挙げられる。しかしながら、低粘度化は油膜形成能力の低下だけでなく、潤滑油の分子量低下に伴う蒸発速度増加を促すため、油膜破断による短寿命化につながる恐れがある。したがって、潤滑油の蒸発機構を理論的に予測することは、転がり軸受の低トルク化と長寿命化を両立する上で重要である。本研究では、静止した状態における非接触シール付き深溝玉軸受に低粘度潤滑油と見立てた直鎖炭化水素（ヘキサン、オクタン、ヘキサデカン）を封入し、鎖長の違いが蒸発挙動に与える影響について調査したので報告する。

## 2. 理論

本研究では、軸受からの直鎖炭化水素の蒸発は、蒸気の拡散が支配的であるとする。ここでは、軸受からの蒸発挙動を解明するため、軸受内部における蒸気圧勾配の違いに着目した 2 つの蒸発モデルについて説明する。なお、どちらのモデルも定常状態を対象としている。

### 2.1 軸受内部が飽和蒸気圧に達しているモデル

軸受内部が直鎖炭化水素の飽和蒸気圧に達しており、シールすきま（非接触シールと内輪シール溝間のすきま）だけに蒸気圧勾配が生じている場合、蒸発速度  $\dot{w}_1$  [g/s] は式(1)のように表される<sup>1)</sup>。

$$\dot{w}_1 = \frac{MDP_{\text{vap}}}{k_1 RT} \quad (1)$$

ここで、 $M$  [g/mol] は直鎖炭化水素のモル質量、 $D$  [m<sup>2</sup>/s] は大気圧における蒸気の拡散係数、 $P_{\text{vap}}$  [Pa] は直鎖炭化水素の飽和蒸気圧、 $R$  [J/(mol·K)] は気体定数、 $T$  [K] は絶対温度である。また、 $k_1$  [m<sup>-1</sup>] はシールすきまの形状（拡散経路とその断面積）に関するパラメータであり、実寸法から計算することができる<sup>1)</sup>。

### 2.2 軸受内部が飽和蒸気圧に達していないモデル

軸受内部の直鎖炭化水素表面からシールすきまの出口まで蒸気圧勾配が生じている状態を仮定する。気液界面において液体が蒸気になる物質移動と、蒸気が液体表面からシールすきま出口まで移動する拡散を考慮して導出される蒸発速度  $\dot{w}_2$  [g/s] は、式(2)のように表される<sup>2)</sup>。ただし、蒸気が拡散する距離に対し、液面高さは無視できるものとする。

$$\dot{w}_2 = \frac{MDP_0}{(k_1 + k_2)RT} \cdot \ln \left( \frac{P_0}{P_0 - P_{\text{vap}}} \right) \quad (2)$$

ここで、 $P_0$  [Pa] は大気圧、また  $k_2$  [m<sup>-1</sup>] はシールすきまを除く軸受内部の形状を表すパラメータであり、本研究では実験から決定した値を用いた。

## 3. 実験方法

実験条件を Table 1 に示す。深溝玉軸受 608 の外輪軌道面にシリンジを用いてヘキサン、オクタン、ヘキサデカンをそれぞれ  $1.9 \times 10^{-2}$  ml 注入し、金属製の非接触シールを装着した。注入した直鎖炭化水素が軌道面と転動体に均等に塗布されるように試験軸受を手回した。ヘキサンとオクタンを注入した試験軸受は電子天秤に乗せて蒸発量  $w$  [g] を測定した。一方、ヘキサデカンは室温で蒸発しにくいいため、高温で蒸発試験を実施した。ヘキサデカンを注入した試験軸受を 80°C に設定した恒温槽に入れ、所定時間経過後の蒸発量  $w$  を求めた。

## 4. 結果と考察

蒸発試験の結果を Fig. 1 に示す。(a), (b), (c) はそれぞれヘキサン、オクタン、ヘキサデカンの蒸発率  $w/w_0$  [-] の時間変化を示す。ここで、 $w_0$  [g] は初期封入量である。式(1)の理論値が  $w/w_0 = 1$  となるときの時間  $t_1$  [h] を基準として横軸を無次元化した。図中のプロットは実験値、赤と青の実線はそれぞれ式(1)、(2)の理論値を表している。式(2)の  $k_2$  の値は、ヘキサンの実験結果にフィッティングすることで決定した。この  $k_2$  の値を用いて、ヘキサンとオクタンの式(2)の理論値を計算した。鎖長の短いヘキサンとオクタンは  $w/w_0 = 0.2$  付近から式(1)との乖離がみられたことから早期

に軸受内部に蒸気圧勾配が生じたことが分かる．また、オクタンの蒸発率変化は、ヘキサンの蒸発結果に基づいて計算された式(2)とほぼ一致していることから、オクトンはヘキサンと同様の蒸発機構であると考えられる．一方で、鎖長の長いヘキサデカンは $w/w_0 = 0.8$ あたりまで式(1)とほぼ一致した後に乖離したことから、ヘキサンやオクタンよりも長い時間、軸受内部を飽和蒸気圧で維持できたことがわかる．このような蒸発挙動の違いが生じた要因として、液体表面積の観点から考察する．ヘキサンやオクタンは蒸発速度が高いため軌道面や転動体表面を覆っていた液体が局所的になくなり表面積が低下したことで蒸発速度の低下が早期に生じた．一方、ヘキサデカンはヘキサンやオクタンと比べて蒸発速度が低いため (Fig.1 記載の $t_1$ を参照)、局所的な表面積低下が抑制したと考えられる．表面積以外にも蒸発速度低下の要因として、転動体と内外輪の間にみられる狭いすきまで生じる表面張力（ラプラス圧）も挙げられるが、その影響についての検証は今後の課題である．

## 5. 結論

本研究では、鎖長の異なる直鎖炭化水素を用いて非接触シール付き深溝玉軸受 608 からの蒸発挙動を調査した．鎖長が短いヘキサンとオクタンは鎖長が長いヘキサデカンと異なる蒸発挙動を示した．ヘキサデカンは、蒸発に伴う局所的な表面積低下が抑制されたため、早期の蒸発速度の低下が生じなかったと考えられる．

## 文献

- 1) 中川ほか：軸受形状が潤滑剤の蒸発損失に与える影響，トライボロジー会議 2025 春東京予稿，C26.
- 2) 浅野：エンジニアリング・サイエンス講座 16 物質移動論，共立出版（1976）11.

Table 1 Evaporation test conditions

	Test 1	Test 2	Test 3
Bearing number	608		
Cage material	Steel		
Seal material	Steel		
$k_1, \text{m}^{-1}$	73.4		
Lubricant	Hexane	Octane	Hexadecane
$w_0, \text{g}$	$1.28 \times 10^{-2}$	$1.36 \times 10^{-2}$	$1.50 \times 10^{-2}$
$V_0, \text{ml}$	$1.94 \times 10^{-2}$		
Temperature, °C	25	25	80

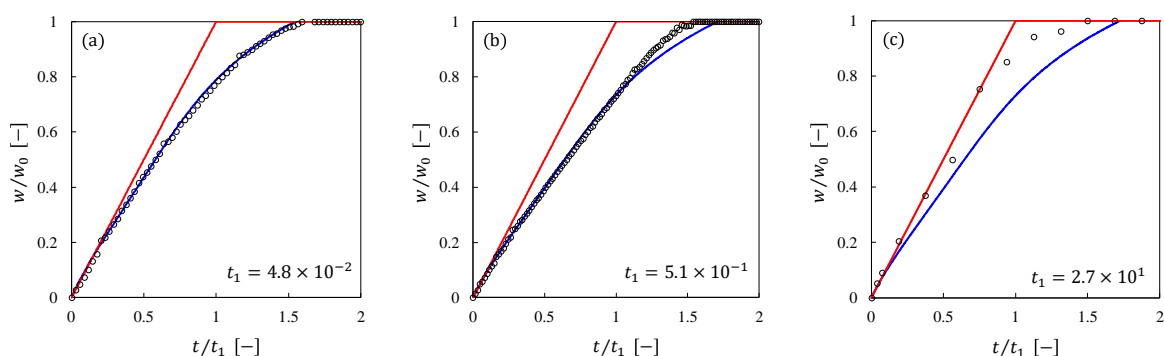


Fig. 1 Time evolution of the evaporation ratio; black open circles: measured value, red and blue lines: simulated result based on equations (1) and (2); (a) Hexane, (b) Octane and (c) Hexadecane