

塩素系フロンがオゾン層を破壊するということが明らかになって以来、フロンの代替化が進められてきた。しかし、冷凍・空調用コンプレッサの場合、代替冷媒に代えるとコンプレッサが潤滑不良を起こすという問題が生じた。それ以来、代替冷媒環境における機械の潤滑性能の確保が重要な課題となっている。

このようなトライボロジー問題に対処するため、潤滑油、摺(しゅう)動材料の開発だけでなく、同時にコンプレッサ、冷凍システム全体の改良開発も進めてきた。その事例として、潤滑状態をシミュレートする数値解析技術を開発し、ジャーナル軸受の最適設計などに応用した。

Chlorofluorocarbons (CFCs) are known to destroy the ozone layer, so they are being successively replaced with alternative materials. However, poor lubrication occurred in refrigerator compressors due to the use of alternative refrigerant. Subsequently, every effort has been made to solve this problem, including the development of lubricants, sliding materials, compressors, and refrigerant systems.

This paper describes the tribology problem that arises with the use of alternative refrigerant, and presents the design of a journal bearing for rotary compressors as an example of the countermeasures being taken. Employing numerical analysis technology, this journal bearing design provides lubrication by means of elastic deformation on the bearing surface.

## 1 まえがき

塩素系フロン CFC (クロロフロロカーボン) が地球のオゾン層を破壊するという仮説が立てられたのは 1974 年であった。その後、南極上空のオゾンホールが観測されるなどの事実も手伝い、87 年にはモントリオールで CFC 製造規制の合意が成立した。それ以来、エアロゾール用ガス、半導体洗浄剤など、順調に規制フロンの代替化が進んでいった。しかし、冷蔵庫・空調機器の冷媒の場合、CFC から代替冷媒 HFC (ハイドロフロロカーボン) に代えると、コンプレッサが潤滑不良を起こすという問題が生じた。

このことから、代替冷媒環境での機械の潤滑性能の確保が重要な技術課題となり、その対策と開発を進めてきた。オゾン層への影響が大きい CFC を使用していた冷蔵庫やカーエアコンは 95 年中に代替化が完了したが、HCFC (ハイドロクロロフロロカーボン) を使用している空調機器の代替化はこれからである。

ここでは、冷媒の代替化で明らかになったトライボロジーの問題に触れ、その対策事例として、新たに開発した数値解析技術を用いたジャーナル軸受の設計について述べる。

## 2 代替冷媒化で起きたトライボロジー問題

### 2.1 フロン規制とトライボロジー

フロン成分のなかで、オゾン層を破壊する物質は塩素で

ある。廃棄された冷蔵庫などの配管からフロン冷媒が大気に放出されると、フロン中の塩素がオゾンと反応して異なる物質を生成する。よって、地球上のオゾンの量は徐々に減少していく。このことから、塩素を含まない HFC を代替冷媒として用いることになったが、なぜか冷媒を代えただけでコンプレッサが潤滑不良を起こすようになった。

この原因を究明するため、国内外で多くの基礎的な研究が行われた。その結果、オゾン層にとって大敵である塩素が摺(しゅう)動面に塩化膜を形成し、それが混合/境界潤滑領域において絶大な潤滑作用を発揮することが明らかになった。すなわち、フロン自体が潤滑剤の役割を担っていたのである。よって、塩素のない代替冷媒を用いたコンプレッサは、上述の塩化膜の潤滑作用に頼ることができず、その状態でいかに潤滑するかが重要な課題となった。

### 2.2 コンプレッサ開発における問題点

空調用ロータリコンプレッサの機構部を図 1 に示す。これは二組の圧縮機構をもつ機種<sup>(1)</sup>であり、この場合、圧縮冷媒を上下の圧縮室から 180° の位相差で交互に吐出する。回転シャフトは圧縮室上下のジャーナル軸受で支持されている。また、圧縮機構のほとんどの部品は摺動面をもち、接触・運動形態によりさまざまな潤滑状態が存在する。

代替冷媒化でもっとも大きな問題は、本質的に混合潤滑状態となるベーン先端の線接触部である。金属表面の塩化膜の潤滑効果が期待できず、先端の摩耗増大が問題となった。次に潤滑状態が厳しいのは、ジャーナル軸受の端部で



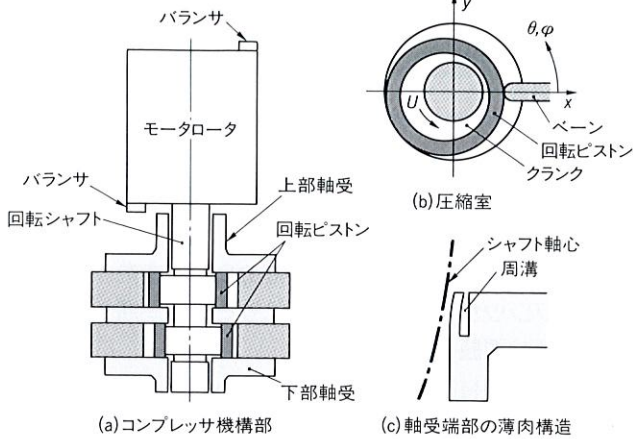


図1. ロータリコンプレッサ機構部  
 (a)コンプレッサ機構部 (b)圧縮室 (c)軸受端部の薄肉構造

ある。圧縮室の吸込み圧と圧縮工程の圧力の差により、回転シャフトには変動荷重が作用する。このとき、シャフトは曲げ変形を起こし、軸受内の傾斜が大きくなる。このため、軸受端部では潤滑油膜が非常に薄くなり、局所的に混合潤滑状態となってベーン先端と同様な問題が生ずる。

一般に、トライボロジーの問題を解決するには、多くの関連分野がかかわってくる。代替冷媒の問題も例外ではなく、専門メーカーの冷凍機油、耐摩耗材料の開発とリンクし、コンプレッサ、冷凍システム全体の開発に力を注いでいる。

### 3 ジャーナル軸受のトライボロジー設計

#### 3.1 対策事例

ロータリコンプレッサのジャーナル軸受の対策について、実機をモデリングした数値解析技術を交えて述べる。上述のように、ジャーナル軸受の端部は混合潤滑状態になりやすく、その固体接触部が表面損傷を引き起こす。このため、コンプレッサ軸受では、従来から図1(c)に示すような周溝を設け、圧縮室側の端部を薄肉として軸受面がシャフトから逃げるような構造を用いている。軸受面が適度に変形することで油膜が確保され、十分な流体潤滑状態になることを期待したものである。

ただし、薄肉部を有効に機能させるには、その剛性をどの程度にするかが重要となる。冷媒代替化においては、より詳細に潤滑特性を把握したうえで、できるだけ流体潤滑状態が支配的になるよう設計する必要がある。この場合の潤滑状態は、油膜圧力が比較的小さくても軸受面が変形するという弾性流体潤滑 (EHL: Elastohydrodynamic Lubrication) 状態である

#### 3.2 EHL 解析

軸受設計に用いた EHL 解析<sup>(2)</sup>の概要を述べる。座標系を図2のようにとると、シャフトと軸受面の間に形成される潤滑油膜の基礎 (レイノルズ) 式は次のようになる。

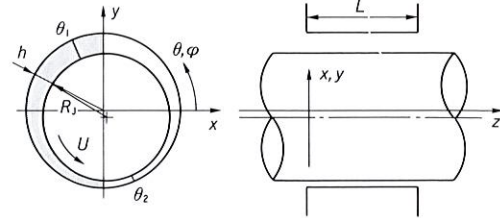


図2. ジャーナル軸受の座標系  
 回転シャフトが回転すると、軸受とのすき間に潤滑油を巻き込み、薄い潤滑油膜を形成する。  
 Coordinate system for journal bearing

$$\frac{1}{R_1^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[ \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right] = 6\omega \frac{\partial h}{\partial \theta} + 12 \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

軸受面の弾性変形量を  $\delta$  とすると油膜厚さ  $h$  は、

$$h = c \{ 1 + \epsilon \cos(\theta - \phi) \} + \delta \quad (2)$$

ここで、 $R_1$ : シャフト半径、 $\mu$ : 油粘性係数、 $p$ : 圧力、 $\omega$ : 回転角速度、 $c$ : 半径すき間、 $\epsilon, \phi$ : シャフトの偏心率と偏心角である。変形した軸受面の座標を  $x_B, y_B$  とすると、

$$\delta = \sqrt{x_B^2 + y_B^2} - (R_1 + c) \quad (3)$$

また、軸受負荷  $f_{B,x}, f_{B,y}$  は油膜圧力  $p$  の積分値とつり合う。

$$\left. \begin{matrix} f_{B,x} \\ f_{B,y} \end{matrix} \right\} = -R_1 \int_0^L \int_{\theta_1}^{\theta_2} p \begin{Bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{Bmatrix} d\theta dz \quad (4)$$

$L$  は軸受長さである。式(1)~式(4)を連成させて圧力  $p$ 、変形量  $\delta$ 、軸受負荷  $f_{B,x}, f_{B,y}$  をつり合せて解く。

#### 3.3 薄肉部の効果と軸受設計

解析結果の一例として、メッシュ分割した下部軸受の有限要素モデルを図3に示す。図中の  $L$  の範囲に潤滑油膜が存在する。この解析から得た油膜圧力分布と軸受面変形を図4に示す。解析条件は  $f_0 = 120 \text{ Hz}$ 、 $\mu = 2 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$  である。この図から、軸受端  $L = 11 \text{ mm}$  付近の変位が大きくなっているのがわかる。よって、薄肉部を設けた軸受は、傾斜する回転シャフトに対し、軸受面が逃げて表面の損傷防止に有効に働く機能のあることがわかる。

図5、図6は、シャフト回転角  $\phi$  を横軸にとり、1 サイクル当たりの油膜圧力ピークと最小油膜厚さ  $h_{\min}$  の変化を示す<sup>(3)</sup>。これらは薄肉部の肉厚を固定し、溝深さ  $d$  を変えて解析した結果である。また、同様な EHL モデルを用いて解析した周溝のない軸受の結果も併せて示す。

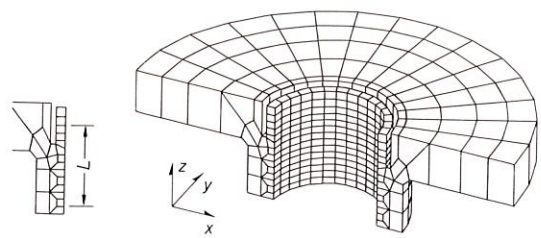


図3. 下部軸受の有限要素モデル 軸受面の弾性変形を計算するために、軸受全体を三次元メッシュで要素分割する。

Finite element model of lower bearing

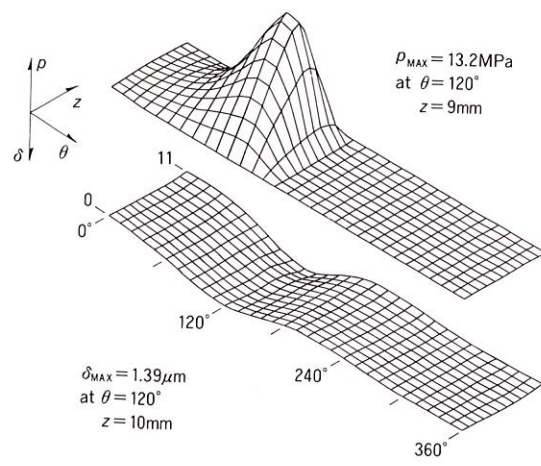


図4. 油膜圧力分布と軸受面変形 冷媒ガスを吐出する負荷がもっとも大きいときの状態を示す。

Distribution of oil film pressure and elastic deformation of bearing surface

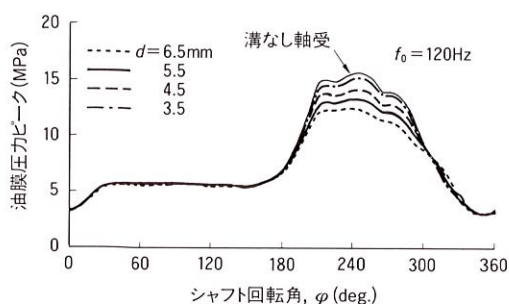


図5. 油膜圧力ピークの変化 (厚さ 1.25 mm) 1 サイクル当たりの潤滑油膜の圧力ピークの変化を示す。溝の深さ  $d$  をパラメータとした解析結果。

Variations in peak pressure of oil film

図5の圧力ピークは軸受負荷が大きい領域  $\varphi = 200^\circ \sim 280^\circ$  で緩和されているが、 $d = 3.5 \text{ mm}$  の場合は溝なし軸受と同等であり、薄肉化の効果はないと推測できる。次に図6を見ると、溝を深くするにしたがって  $h_{\min}$  は厚くなり、それだけ潤滑状態が良好になっていくのがわかる。例えば、 $d = 5.5$

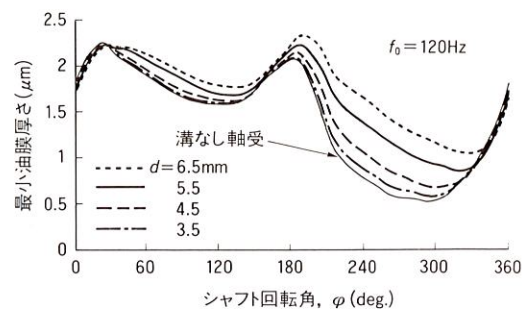


図6. 最小油膜厚さの変化 (厚さ 1.25 mm) 油膜厚さの最小値が1 サイクル中でどのように変化するかを示した。図5と同様、溝深さ  $d$  をパラメータに取っている。

Variations in minimum film thickness

mm の場合を周溝のない軸受の結果と比較すると、潤滑状態が過酷になる  $\varphi = 220^\circ \sim 330^\circ$  のとき、 $h_{\min}$  は2 倍程度の厚さが増加している。また、なるべく油膜厚さを稼ぎ、シャフトと軸受面とを離すという観点から見れば、 $d \leq 4.5 \text{ mm}$  では効果の小さいことがわかる。このような解析結果から、良好な潤滑状態を実現するジャーナル軸受の最適な設計が可能となる。

#### 4 あとがき

空調・冷凍機器の冷媒代替化のトライボロジー問題に対し、潤滑油メーカーなどと協力しながら対策と開発を進めてきた。ここでは、新たに開発した EHL 解析技術を設計ツールとして使い、ジャーナル軸受の構造を改善した対策について述べた。また、ベーン先端部の問題も、これまでの努力により解決されつつあるが、このような点の早期解決を目指し、クリーンな機器を実現し、地球環境の保護に全力を尽くす所存である。

#### 文献

- (1) 尾駒 薫, 他, ツインロータリコンプレッサ, 東芝レビュー, 44, 8, 1989, p.681.
- (2) 服部仁志, 日本機械学会講演論文集, 940-30, IV, 1994, p.398.
- (3) 服部仁志, 日本機械学会講演論文集, 96-1, IV, 1996, p.528.



服部 仁志 HATTORI Hitoshi, D.Eng.

研究開発センター 機械システム研究所主任研究員, 工博。機器の潤滑 (トライボロジー), 回転機械などの研究・開発に従事。

Mechanical Systems Research Labs.



小峰 健治 KOMINE Kenji

富士工場 コンプレッサ部主査。冷凍・空調機用のコンプレッサの開発・設計に従事。Fuji works