

エアコン用コンプレッサにおける軸受の信頼性評価手法

New Method of Reliability Evaluation for Air-Conditioner Compressor Bearings

服部 仁志

■ HATTORI Hitoshi

伊藤 安孝

■ ITOH Yasutaka

三浦 一彦

■ MIURA Kazuhiko

エアコン用コンプレッサの軸受の信頼性を評価するため、混合潤滑解析技術を適用した。この解析では、表面あらさを考慮した修正レイノルズ方程式と弾性接触式を連成させて解くが、その際、軸受面の弾性変形も考慮している。この解析を用いれば、流体潤滑中の固体接触の発生をとらえることができる。信頼性評価は、解析で得た固体接触力と、実験から得た基準値との比較により行っている。

東芝では、設計段階でコンプレッサの軸受の潤滑状態を混合潤滑解析技術によって予測し、信頼性評価を行い製品開発に取り組んでいる。

Toshiba has applied numerical analysis to mixed lubrication in order to evaluate the reliability of journal bearings for rotary compressors in air conditioners. In this analysis, the modified Reynolds equation and the elastic contact equation, taking the effect of surface roughness into consideration, are solved as a coupled problem, and the effect of elastic deformation of the bearing surface is also considered. The appearance of solid contact in hydrodynamic lubrication can be captured by the analysis. Reliability evaluation is achieved by a comparison between the solid contact force obtained by the analysis and a reference value obtained by an examination.

We are carrying out rotary compressor development using this reliability evaluation method in the design process.

1 まえがき

地球環境保護の観点から塩素系フロンの使用が制限され、空調・冷凍分野においては、1980年代から新冷媒に適した機器の開発⁽¹⁾を進めてきた。東芝は業界に先駆け、1998年には非塩素系フロン(R410a)を冷媒としたエアコン“大清快™”を、更に2002年初頭には自然冷媒(R600a)によるノンフロン冷蔵庫を商品化している。

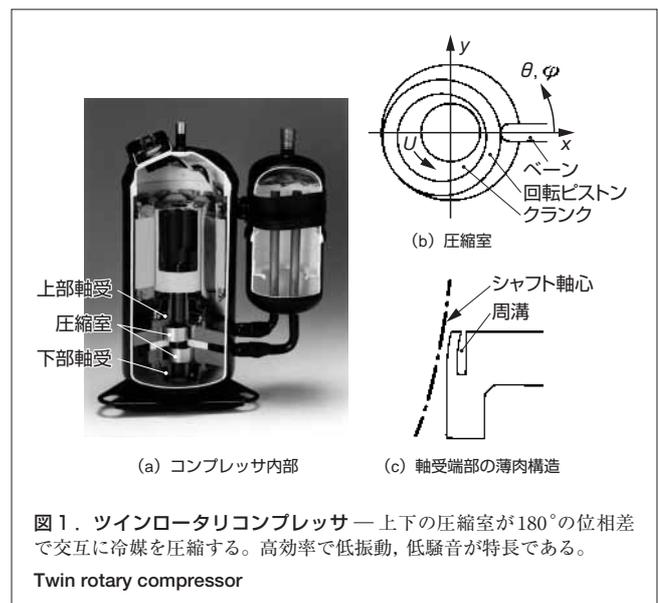
また、改正省エネルギー法の施行により、エアコンや冷蔵庫の消費電力は年々低下しており、現在では、消費電力が10年前の半分以下となっている。しかし、そのような状況においても機器の信頼性確保は必須であり、省エネルギー化を進めていくうえで、信頼性を犠牲にしてはならない。

特に、エアコンや冷蔵庫の心臓部であるコンプレッサの機構潤滑部については、故障要因となる摩耗や焼きつきを防止するため、潤滑状態の良否を設計段階での確に予測する必要がある。東芝では、自社開発の混合潤滑解析コード⁽²⁾を用い、コンプレッサの軸受の潤滑状態を予測し、信頼性評価を行っている。ここでは、その混合潤滑解析と信頼性評価の一例について述べる。

2 エアコン用ロータリコンプレッサ

2.1 ツインロータリコンプレッサ

当社の家庭用エアコンに使用されるツインロータリコンプレッサと主要機構部を図1に示す。ツインロータリは二組の圧縮機構を備え、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。回転ピストンを駆動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、

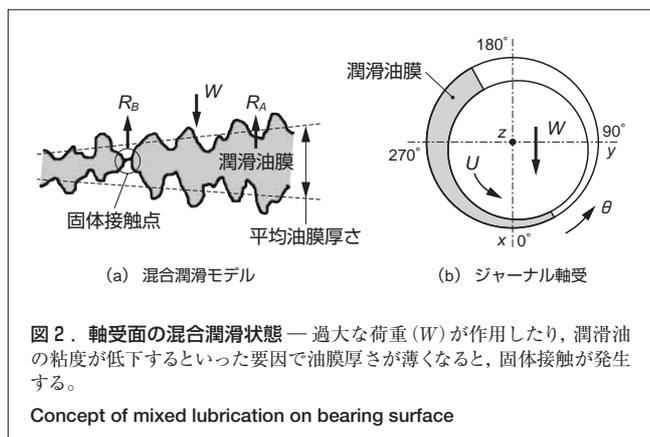


回転ピストンをはじめとする圧縮機構のほとんどの部品はしゅう動面を持ち、接触・運動形態により様々な潤滑状態が存在する。このようなしゅう動面の摩擦を低減することが省エネに寄与し、潤滑を良好に維持することが圧縮機構の信頼性確保に重要な設計課題となる。

2.2 ジャーナル軸受の潤滑状態

ロータリコンプレッサの回転シャフトには、圧縮工程で生ずるガス荷重や偏心要素による不つり合い荷重など、様々な変動荷重が作用し、回転シャフトは曲げ変形を起こす。このため、シャフトは軸受内で傾斜し、その端部で片当りの傾向にある。ロータリコンプレッサの軸受では、この辺りが摩擦耗などの表面損傷を起こしやすく、信頼性評価のポイントとなっている。

良好な潤滑状態であれば、ジャーナル軸受は軸受面とシャフトとの間に薄い潤滑油膜を形成し、シャフトを非接触で支持する。しかし、シャフトが傾斜すると、軸受端部の潤滑油膜が薄くなり、図2に示すように、表面あらしの突起部分で固体接触が生じる場合がある。この状態を混合潤滑と呼ぶが、固体接触の比率が大きくなり、その限界を超えた場合に表面損傷が発生する。したがって、固体接触が発生するかどうか、又は、どの程度の接触かをシミュレートできれば、軸受の潤滑状態の良否、すなわち信頼性を評価することが可能となる。



3 混合潤滑解析の概要

3.1 理論と基礎方程式

信頼性評価に用いる混合潤滑解析の概要を述べる。固体接触が混在する混合潤滑の力学モデルの基本は、外部から作用する荷重(W)を固体接触部と潤滑油膜とが受け持つことにある。これを数式で表すと次のようになる。

$$W - \iint p ds - \iint p_c ds = 0 \quad (1)$$

ここで、 p :油膜圧力、 p_c :接触圧力、 s :軸受面積である。すなわち、左辺第二項が潤滑油膜による反力(R_A)、第三項が固体接触部の反力(R_B)である。

油膜圧力(p)は、表面あらしの影響を考慮したPatir-Chengの修正レイノルズ方程式^{(3),(4)}から求める。

$$\frac{\partial}{R\partial\theta} \left(\Phi_\theta \frac{\bar{h}^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial\theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Phi_z \frac{\bar{h}^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6 \frac{U}{R_j} \frac{\partial h_T}{\partial\theta} + 12 \frac{\partial h_T}{\partial t} \quad (2)$$

ここで、 Φ_θ, Φ_z : θ, z 方向の圧力流れの修正係数、 \bar{h} :平均油膜厚さ、 h_T :局所油膜厚さ、 μ :潤滑油の粘性係数、 R_j, U :回転シャフトの半径、周速である。なお、局所油膜厚さ(h_T)は式(3)及び誤差関数論を導入して計算する。

また、コンプレッサの軸受では、軸受表面の弾性変形を考慮する。変形量を δ 、軸受と回転シャフトとの間の半径すきまを c とすると、平均油膜厚さ(\bar{h})は次式のように表される。

$$\bar{h} = c - x \cos\theta - y \sin\theta + \delta \quad (3)$$

弾性変形量(δ)は次節で示すように、軸受全体を三次元メッシュで分割⁽⁵⁾し、有限要素法により求める。

一方、接触面圧(p_c)の計算にはGreenwoodとTrippによる表面あらし突起の弾性接触論⁽⁶⁾に基づく近似式を用いる。

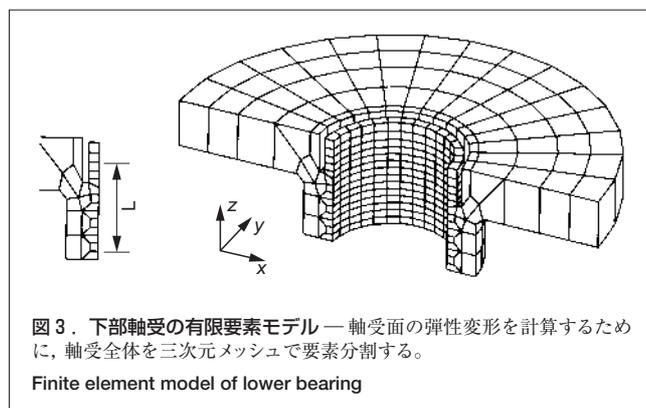
$$p_c = 4.4086 \times 10^{-5} k_c E' \left(4 - \frac{\bar{h}}{\sigma} \right)^{6.804} \quad (4)$$

ここで、 k_c :表面あらしの形状による定数、 E' :回転軸と軸受の合成ヤング率、 σ :二面の自乗平方根平均あらしである。

以上のような基礎方程式を用い、最終的に式(1)が釣り合うよう数値的に解く。コンプレッサの場合、回転シャフトに作用するガス荷重、不つり合い荷重などが変動するため、それに応じて前記の数値計算を非定期的に繰り返す。

3.2 コンプレッサ軸受の解析モデル

図3は下部軸受の有限要素モデルである。このモデルから軸受面に対応する節点のコンプライアンスマトリックスを



求め、これを式(3)に導入する。この図に示すように、コンプレッサの軸受では圧縮室側の端部を薄肉構造とし、回転シャフトの傾斜に対して軸受面が容易に弾性変形できるようになっている。この軸受モデルを用いて信頼性評価の一例を述べるが、この場合の代表的な寸法は、軸受内径： $\phi 16\text{ mm}$ 、軸受長（油膜存在領域 L ）： 11 mm 、半径すきま c ： $8\text{ }\mu\text{m}$ 、潤滑油の粘性係数は $2.0 \times 10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ である。

4 混合潤滑解析によるシミュレーション結果

4.1 軸受面における油膜圧力分布と接触面圧分布

はじめに、混合潤滑解析から得た結果について述べる。図4は、運転周波数15 Hzという低速域において、冷媒の吐出時、すなわち回転シャフトに大きな荷重が作用しているとき、軸受に発生した油膜圧力分布と接触面圧分布を示している。これはコンプレッサの運転初期、すなわち軸受面の表面あらさ(R_{rms})が粗い場合を解析した例である。コンプレッサを低速で運転すると、潤滑油膜の形成能力が低下するため、油膜が薄くなって軸受面に固体接触が生じやすくなる。表面あらさが粗い(表面に研削痕(こん)が残っている)と、図4のように固体接触が発生し、油膜圧力よりも接触面圧のほうが高くなっているようすがわかる。なお、慣らし運転によって軸受の表面あらさが適度に滑らかになると、油膜形成能力も向上し、固体接触が発生する機会は減る。よって、良好な潤滑状態が実現し、軸受面の摩耗、損傷などの危険性がなくなる。

4.2 圧縮工程1サイクル中の潤滑状況

図4の各圧力を積分すれば、油膜反力(R_A)と固体接触力(R_B)が求まる。図5は横軸にシャフトの回転角をとって、

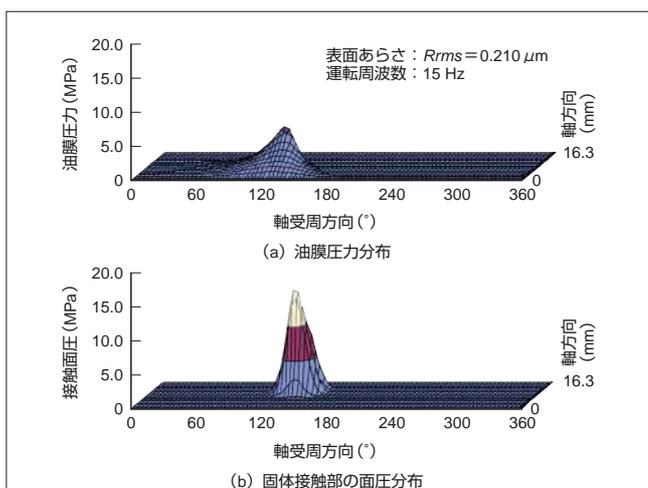


図4 運転初期の下部軸受の面圧分布 — 軸受面が粗いため、固体接触が顕著に現れ、接触面圧が大きくなっている。

Pressure distributions on lower bearing with high roughness

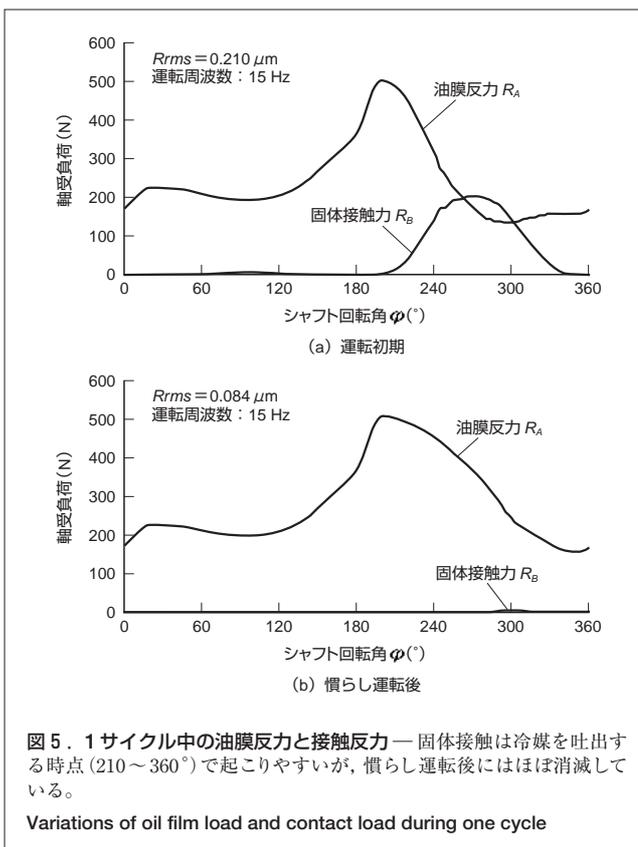


図5 1サイクル中の油膜反力と接触反力 — 固体接触は冷媒を吐出する時点(210~360°)で起こりやすいが、慣らし運転後にはほぼ消滅している。

Variations of oil film load and contact load during one cycle

圧縮工程の1サイクル中における油膜反力と固体接触力の変化を示している。図中の(a)が運転初期、(b)が慣らし運転後の結果である。図5(a)を見ると、冷媒の吐出時(約210°)以降で固体接触が発生しているのがわかる。また、慣らし運転が完了した図5(b)では、全工程中で固体接触はほとんどなく、常に良好な潤滑状態だと判断できる。

混合潤滑解析では、固体接触の存在しない完全な流体潤滑から、固体接触が始まって混合潤滑状態に移移する過程をとらえることができる。最適な慣らしを実現する軸受面の研削方法を見いだすといった場合も、この解析結果は貴重な参考データになっている。

5 ジャーナル軸受の信頼性評価

5.1 低速域における潤滑状態の改善

コンプレッサがどこまで低速運転できるかを判断するため、運転周波数をパラメータにとって解析し、そこで得た固体接触力を図6のように整理する。横軸が運転周波数、縦軸が固体接触力である。図中には、前章で示した運転初期の場合と、慣らし運転が完了して軸受面の表面あらさが適度に滑らかになった場合の結果を示している。高速域では完全な流体潤滑を維持しているが、運転周波数が下がっていくと固体接触が発生し、更に低速になると固体接触力が増加し

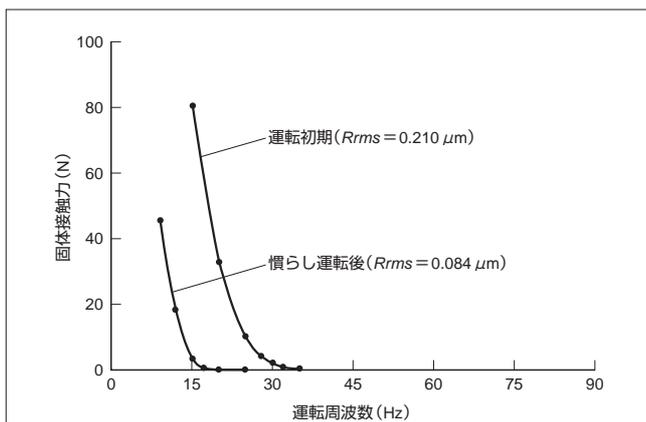


図6. 低速運転域での潤滑状態の改善 — 慣らし運転が完了すると、より低速域まで良好な潤滑状態が実現する。

Improvement of bearing lubrication at low operating speed

ていく。この結果では、運転初期だと30 Hz、慣らし運転後では15 Hz 辺りから固体接触が発生している。このように、慣らし運転が完了すると、軸受の潤滑性能が向上し、より低速域まで安全に運転できることがわかる。

なお、このような固体接触力が限界を超えると、摩耗や焼きつきなどの不具合が発生する。このときの限界値については、これまでの経験、あるいは基礎的な実験から得たデータを基に決定している。

5.2 信頼性に対する潤滑油粘度の影響

次に、潤滑油の粘度が低下した場合の評価結果の一例について示す。温度上昇や冷媒の混入具合によって潤滑油の粘度が低下すると、流体潤滑油膜の形成能力は低下する。したがって、潤滑油粘度の低下が信頼性に及ぼす影響を把握しておくことは重要である。図7は横軸に潤滑油の動粘度、縦軸に固体接触力をとり、運転条件をA、Bと変えた解析結果を示したものである。この図から、潤滑油粘度が低下する

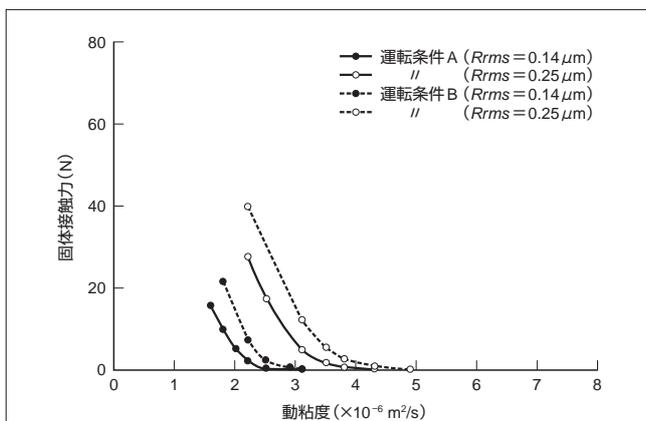


図7. 潤滑油の粘度低下に対する潤滑性評価 — 潤滑油粘度が低下していくと、潤滑油膜は薄くなって固体接触が発生する。

Evaluation of bearing lubrication with decrease in oil viscosity

とともに固体接触が発生し、その後、固体接触力が増加していくようすがわかる。また、運転条件によって固体接触の発生点が異なっている。このように、あらゆる運転条件で混合潤滑解析によりシミュレーションを行い、それぞれの限界を決定するといった、きめ細かな信頼性評価を実施している。

6 あとがき

エアコンや冷蔵庫などの空調・冷凍機器は、商品として既に成熟の域に達している。しかし、地球環境保護や省エネルギー化といった21世紀のニーズに対応すべく、研究開発は絶えず継続している。その過程で信頼性をクリアしつつ限界設計を極めていくには、最先端の数値解析技術を導入することが有益である。今後も、高度な基礎技術を設計・評価ツールとして随所に用い、時代のニーズにマッチした商品の開発に取り組んでいく。

文献

- (1) 服部仁志, ほか. 代替冷媒コンプレッサにおけるトライボロジーと軸受設計. 東芝レビュー. **53**, 9, 1998, p.45 - 47.
- (2) 伊藤安孝, ほか. “ロータリコンプレッサ用軸受の混合潤滑解析”. トライボロジー会議仙台. 日本トライボロジー学会. 2002-10, p.171 - 172.
- (3) Patir, N., et al. An average flow model for determining roughness on partial hydrodynamic lubrication. Trans. ASME, Journal of Lubrication Technology. **100**, 1, 1978, p.12 - 17.
- (4) Patir, N., et al. Application of average flow model to lubrication between rough sliding surface. Trans. ASME, Journal of Lubrication Technology. **101**, 4, 1979, p.220 - 230.
- (5) 服部仁志. ロータリコンプレッサ用軸受の弾性流体潤滑解析 (軸受端部における薄肉構造の効果). 日本機械学会論文集C編. **64**, 624, 1998, p.3171 - 3178.
- (6) Greenwood, J., et al. “The contact of two nominally flat rough surfaces”. Proceedings of Institute of Mechanical Engineers. 185, 48/71, 1970-1971, p.625 - 631.



服部 仁志 HATTORI Hitoshi, D.Eng.

研究開発センター 機械・システムラボラトリー主任研究員、工博。機器の潤滑 (トライボロジー)、回転機械の研究・開発に従事。日本トライボロジー学会、日本機械学会会員。Mechanical Systems Lab.



伊藤 安孝 ITOH Yasutaka

研究開発センター 機械・システムラボラトリー。潤滑 (トライボロジー)、冷凍・空調用圧縮機の研究・開発に従事。日本トライボロジー学会会員。Mechanical Systems Lab.



三浦 一彦 MIURA Kazuhiko

東芝キャリア (株) 富士事業所 コンプレッサ技術部。空調用コンプレッサの開発・設計に従事。Toshiba Carrier Corp.