

氏名（本籍） 佐々木 辰 也（埼玉県）  
学位の種類 博士（工学）  
学位記番号 甲第1081号  
学位授与の日付 2021年3月18日  
学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当  
学位論文題目 低GWP冷媒を適用した圧縮機の軸受潤滑技術に関する研究

論文審査委員 （主査）教授 佐々木信也  
教授 山本 誠 教授 牛島 邦晴  
准教授 宮武 正明 教授 野口 昭治  
国立研究開発法人 産業技術総合研究所  
エレクトロニクス・製造領域 製造技術研究部門  
トライボロジー研究グループ グループ長 主任研究員 是永 敦

## 論文内容の要旨

空調機器の開発に当たっては、地球温暖化防止の観点から地球温暖化係数（GWP）の低い代替冷媒の開発、およびその冷媒を適用した空調機器の開発が急務となっている。現状のハイドロフルオロカーボン（HFC）冷媒は、水素、フッ素、炭素からなり、二酸化炭素の100倍以上の温室効果があるとされている。HFCに代わる低GWP冷媒としては、ハイドロフルオロオレフィン（HFO）が提案されているが、現行の空調機器にHFOをそのまま適用すれば空調性能の悪化を招く。そこで、HFCとHFOを混合して用いることにより、空調性能の向上と低GWP化を両立する方策を検討している。ただし、HFCと同等レベルの空調性能を得るためには、圧縮機を新たに開発する必要がある。圧縮機はモータ、シャフトおよび圧縮機構部を有し、シャフトはすべり軸受で支持された構造からなる。中でもすべり軸受は、冷媒環境において境界潤滑から流体潤滑まで幅広い領域でのしゅう動が余儀なくされるため、HFO冷媒の適用によって生じる潤滑問題への体系的な対策が必須となっている。

そこで本研究では、低GWP冷媒を適用した圧縮機の軸受潤滑技術を確立することを目的として、技術的課題の抽出とその解決に資する学術的知見の体系化を目指した研究を行った。論文の構成は以下の通りである。

第 1 章では、これまでの冷媒と圧縮機の開発の歴史を踏まえ、今後の適用が期待される低 GWP 冷媒の方向性と、その冷媒を採用する圧縮機における問題と解決すべきトライボロジー課題をまとめた。具体的には、境界潤滑領域でしゅう動する軸受表面においては、しゅう動部に介在する冷媒の組成や極圧添加剤との相互作用を詳細に検討する必要があること、流体潤滑領域では、荷重の増大と高速化に伴う潤滑油膜のせん断発熱および、冷凍機油への冷媒溶解による粘度変化などを考慮した潤滑解析技術の構築が必要であることである。

第 2 章では、低 GWP 冷媒の有力候補である HFO の境界潤滑特性を評価し、HFC と比較する。焼付き試験により冷媒の境界潤滑特性を評価し、しゅう動面の分析結果を踏まえて境界潤滑膜形成に及ぼす冷媒の影響を考察した。その結果、高い反応性を有する不飽和冷媒の HFO は、摩擦によって分解することにより、しゅう動面に冷媒由来のフッ素化合物からなる境界潤滑膜を形成し易いことを明らかにした。

第 3 章では、HFO と HFC を混合した冷媒に相溶性の極圧添加剤を加えた冷凍機油を用いた実用的な境界潤滑条件において焼付き試験を実施し、HFO と HFC の混合比、冷媒と冷凍機油との溶解性、および極圧添加剤との相互作用が境界潤滑特性に及ぼす影響を明らかにした。HFO 環境でしゅう動面に形成されるフッ素化合物は、極圧添加剤由来の境界潤滑膜の形成を阻害するために摩擦特性および耐焼付き性が HFC よりも劣ることを明らかにした。

第 4 章では、すべり軸受の流体潤滑状態において油膜厚さを精緻に予測する解析手法を検討し、高負荷、高速時の軸受特性について考察した。具体的には摩擦熱、溶解・分離熱及び冷媒溶解度の変化による粘度変化を考慮した熱流体潤滑解析を構築した。解析の結果、分離熱が大きいほど軸受の偏心率は大きくなることを示し、冷媒溶解度の変化や分離熱が軸受特性を把握するうえで無視できないことを明らかにした。

第 5 章では、第 4 章の解析モデルの妥当性検証を行った。冷媒環境下ですべり軸受特性を評価し、冷媒と冷凍機油の溶解、分離時による溶解粘度の変化、さらには熱変化を考慮した軸受特性について考察した。その結果、油膜圧力、油膜厚さが解析結果に対して定量一致したこと、および分離熱の裏付けとなる逆くさび領域での軸受温度の低下が見られたことから、本研究で提唱する熱流体潤滑解析モデルが妥当であることを確認した。

最後に第 6 章の「総括」では、第 2 章、第 3 章で考察した境界潤滑特性と、第 4 章、第 5 章で考察した流体潤滑特性を総合して、今後、圧縮機へ低 GWP 冷媒を適用する際に必要なすべり軸受の特性について総括した。

## 論文審査の結果の要旨

本論文では、学長からの審査付託を受けて、標記 6 名の審査委員で構成する審査委員会を組織し、提出された学位論文について審査を行った。

審査委員会においては、学位申請者から、学位論文の内容や前回審査における指摘事項の対応結果について説明させ、その後、質疑応答を実施することで、博士論文として満たすべき条件や必要な修正点を確認するという形式で進めた。

第1回審査では、学位申請者から学位論文の概要について説明を受け、主には次の点について審査委員から指摘した。申請者からの質疑応答の結果を踏まえて学位論文の修正を指示した。

- (1)過去の研究事例をもとに本研究の新規性を述べること
- (2)流体潤滑特性を評価するための数値解析手法の詳細を説明するとともに、考案したモデルの妥当性を述べること
- (3)流体潤滑特性については実験で得られた知見をもとに解析モデルを構築し、解析により特性把握を行う内容とすること。また、解析結果との比較から実験結果の解釈を述べること

第2回審査では、第1回審査における指摘事項の対応結果について説明があり、修正および追記内容について全体的な論旨の齟齬がないことを確認し、内容を承認した。

第3回審査では、公聴会を兼ねて実施し、これまでの審査での指摘事項を踏まえて修正した内容の発表を受けた。以下に審査委員会及び公聴会聴衆からの質問をまとめる。なお、これらの質問に対して学位申請者はすべて適切に回答し、質問者からの了解が得られた。なお、質問(2)については適切な表現となるよう学位論文を微修正することとした。

- (1)冷媒と冷凍機油の分離熱と摩擦熱の大小関係について
- (2)偏心率の定義について
- (3)ゾンマーフェルト数が大きい領域での現象の実験による再現性について
- (4)分離及び溶解の瞬時変化の妥当性について

以上により、本論文が博士（工学）の学位論文として、十分に価値あるものと認められる。