

京都大学	博士 (工学)	氏名	角銅 洋実
論文題目	Modeling of Heat Generation in Cryogenic Turbopump Bearing (極低温ターボポンプ軸受の発熱モデリング)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、極低温ターボポンプ軸受の発熱量を高精度に予測する解析モデルを構築することを目的に、当該軸受発熱の主要な因子である摺動摩擦発熱と流体発熱のメカニズムの解明に取り組んだ内容をまとめたものである。また、それらの特性に基づいて構築された軸受モデルによる計算値は、実験値と良好に一致することを確認している。なお、本学位論文は以下の7章から構成されている。</p> <p>第1章では、研究背景および目的についてまとめている。極低温ターボポンプ軸受が適用される液体ロケット推進システムや極低温ターボポンプに関して、その概要を説明している。また、極低温ターボポンプ軸受に関する過去の研究成果と、現時点における研究課題について述べている。特に、これまでの研究はそのほとんどが実験的なアプローチであるために詳細物理現象の把握に限界がある点を指摘し、本論文で目的とする軸受性能モデルの構築と各種物理現象の理解の必要性について説明している。</p> <p>第2章では、軸受性能モデルの基礎となる軸受運動解析手法と軸受発熱要因について、算出手法の導出を行っている。軸受運動解析では、極低温軸受特有の影響を考慮した高速軸受解析に関して概説し、本研究で対象とした2種類の極低温ターボポンプ軸受を用いた解析結果の例を示している。また、軸受の発熱要因について、定量算出のためにメカニズムの解明が必要な軸受内の摺動摩擦特性と軸受冷却剤の流れ特性を明らかにしている。</p> <p>第3章では、従来の実験的アプローチによって軸受発熱量計測を実施し、種々の軸受作動条件が軸受発熱に与える影響についてパラメトリックに調査した結果について述べている。サイズが異なる2種の軸受を対象に液化水素、液化メタン、液化窒素環境において発熱計測を実施し、全ての環境において発熱量は回転速度の増加に伴って増加すること、また、回転速度に対する発熱量の増加勾配は冷却剤種に依存することを明らかにしている。以上より、冷却剤の密度と粘性係数が流体発熱量に大きな影響を及ぼすことを示している。</p> <p>第4章では、主要な軸受発熱因子の一つである流体発熱について、その発生メカニズムを解明するためにCFD解析を実施し、軸受冷却剤の流れ特性について調査した結果について述べている。流体発熱は軸受形状、回転速度、冷却剤種、冷却剤流れ方向、流量などの影響を受けるため、これらの条件を変化させた解析を実施している。その結果、冷却剤の速度、温度、圧力の分布が解析条件に応じて変化することを示し、それぞれの条件における流体発熱量を定量的に算出している。最終的に、軸受部品の回転に伴う冷却剤速度上昇による運動エネルギー増加と冷却剤温度上昇による内部エネルギー増加が冷却剤のエンタルピー増加、すなわち流体発熱に寄与していることを明らかにしている。</p> <p>第5章では、もう一つの主要な軸受発熱因子である摺動摩擦発熱を算出する上で必要となる軸受材料の極低温環境におけるPTFE潤滑下での摺動特性について調査した結果について述べている。軸受内での摺動条件を模擬した摩擦試験を実施することにより、摩擦係数は接触面圧に依存して変化することを明らかにしている。そのメカニ</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	角銅 洋実
<p>ズムの解明に向けて試験後の供試体について各種分析を実施し、顕微鏡分析により、摺動部には摺動後に潤滑被膜が存在すること、また、表面プロファイル計測により、SUS440CとSi₃N₄の摺動においてはSUS440Cが主に摩耗することを明らかにしている。また、その摩耗量はPTFEの潤滑効果によって軽減されており、XPS分析によって、全ての面圧条件においてSUS440C表面にフッ化金属が形成されていること、および、高い摩擦係数となる面圧条件においてSi₃N₄表面にフッ化ケイ素が形成されていることを明らかにしている。以上より、低い摩擦係数はSUS440C表面に強固に付着するPTFEに起因し、その付着は表面に形成されるフッ化金属の存在と適切な摺動エネルギーによって発現すること、また、摺動エネルギーが過小および過大な摺動条件においては、SUS440C表面にPTFEが強固に付着しなかったために高い摩擦係数を示し、Si₃N₄表面にフッ化ケイ素が形成されることを明らかにしている。</p> <p>第6章では、第2章から第5章までで明らかにしたことを基礎として軸受解析モデルを構築し、それによって得た計算値を第3章で得た実験結果と比較することでその妥当性を評価している。その結果、提案するモデルによる計算値は実験値と良好な一致を示し、回転速度や冷却剤種、軸受形状などの条件による影響を再現しうることを示している。</p> <p>第7章では、本研究により得られた結論がまとめられている。</p>			

氏名	角銅 洋実
----	-------

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、液体ロケットエンジン部品のうち最重要と位置付けられる極低温ターボポンプ軸受に関して、性能予測および設計最適化を目的として、発熱メカニズムの解明と発熱モデルの構築を目指すものである。モデルの構築過程において、軸受冷却流の流れ特性と極低温環境での軸受の摺動メカニズムを明らかにしている。最終的に構築されたモデルの妥当性は、軸受発熱の実験値との比較を行うことで評価されている。得られた主な結果は以下の通りである。

(1) ターボポンプ内の環境を模擬した軸受試験を行うことで軸受発熱量を実測し、種々の軸受作動条件が軸受発熱に与える影響について明らかにした。軸受発熱量は回転速度と共に増加すること、また、その勾配は冷却剤種によって異なり、流体物性に強く影響を受けることを明らかにした。さらに、軸受発熱を高精度に予測するためには主要な発熱因子である摺動摩擦発熱と流体発熱の発生メカニズムを解明する必要があることを示した。

(2) 軸受冷却剤の流れ特性について、種々の作動条件ごとに CFD を実施することでその流れの様子を明らかにした。回転する軸受周辺における複雑な冷却剤流れ特性を評価し、軸受形状、流体種、流体物性等の種々の条件が流体発熱に与える影響を明らかにした。また、各作動条件における流体発熱量を定量化した。

(3) 軸受材料の極低温環境における PTFE 潤滑下での摺動摩擦発熱特性について、極低温ターボポンプ軸受の摺動条件を模擬する摩擦試験を実施することでその摩擦係数を明らかにした。その結果、摩擦係数は面圧に大きく依存することを示した。最終的に、各種表面分析によって摺動部に形成される潤滑被膜が摩擦係数に与える影響を明らかにした。

(4) 摺動摩擦発熱と流体発熱の特性を考慮した軸受性能モデルを構築し、モデルによる算出値と実験結果を比較することでその妥当性を評価した。モデルによる算出値は実験値と良好な一致を示し、当該モデルが極低温ターボポンプ軸受の性能予測・設計最適化に対し有効であることを明らかにした。

以上のように、本論文は極低温ターボポンプ軸受における性能予測および設計最適化を目的として、主要な発熱因子である流体発熱と摺動摩擦発熱の発生メカニズムを明らかにすることで、実験値と良好に一致する高精度な軸受発熱モデルを構築するに至った。これらの発熱メカニズムの解明とモデルの構築は学術的、工学的に有用である。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和5年5月18日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めたことを報告する。