

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 石井 雅治

本論分は論文題目「人工衛星搭載用逆スターリング冷却機の研究」と題して、宇宙から地球を観測する IRCCD の S/N 比を高めるため、IRCCD からの発熱を冷却し 70K に維持する機械式冷却機の実用化を図ることを目的とし、フリーピストン形逆スターリング冷却機を対象として、設計手法を提案している。すなわち、宇宙での運用を可能にする高効率、高耐久および小形軽量を満たす機械式冷却機として、ピストンおよびディスプレイサの運動が一方方向であるフリーピストン形逆スターリング冷却機を選択し、これまで公表された例が少なかった冷却機および構成要素の具体的設計手法を提案するとともに、モデル実験によって設計手法を評価することを主たる内容としている。従来、宇宙での適用を対象とする冷却機としては、クランク・コネクティングロッド方式を駆動機構とする逆スターリング冷却機の開発がほとんどであったが、振動の抑制やオイルフリー化が困難であるという問題があり、実用化の可能性は低かった。本論文の研究は、発生する振動が制御しやすい一方方向振動であることや 70K という極低温冷却機をメンテナンスなしで運用するための条件であるオイルフリー化が実現し易いフリーピストン形逆スターリング冷却機に着目し、実用化の可能性について検討を進めたものである。特に、本論文では、フリーピストン形逆スターリング冷却機を構成する要素として選択した可動永久磁石形リニアモータや磁気軸受に関する具体的設計方法を提案する一方、ピストンと圧縮、膨張空間からなり振動系を支配するガスばねの特性解析や熱効率に大きな影響を及ぼす蓄冷器特性の実験的検討により得られた知見を基に組立てたフリーピストン形逆スターリング冷却機に関する設計手法を実験的に評価し、実用に供することができる見通しを得ている。

第 1 章では、本研究を進めるに至った経緯と目的、および論文の構成が述べられている。ここで申請者は、人工衛星用 IRCCD を冷却する機械式冷却機に必要な仕様について概説することにより、逆スターリング冷却機が適することを述べている。

第 2 章では、宇宙での適用を目的とした機械式冷却機の開発状況を考察し開発課題を明確にし、本研究における開発目標を定めている。さらに、開発目標を満たす可能性の高い構造として、可動永久磁石形リニアモータを駆動系、磁気軸受を支持系とするフリーピストン形逆スターリング冷却機を本研究の開発対象に選択する理由およびその経緯について詳細に述べている。

第 3 章では、研究対象とした冷却機が構成する逆スターリングサイクルに関し、動作原理および熱力学的位置付けについて述べた後、サイクルを構成する機械式冷却機を設計する上で基本となる熱力学的特性解析について議論を進めている。続いて、本研究の大きな目的であるフリーピストン形逆スターリング冷却機の設計方法の一プロセスとして、特性解析結果について考察している。

第 4 章では、フリーピストン形逆スターリング冷却機の構成要素およびモデル冷却機的设计詳細が示されている。フリーピストン形逆スターリング冷却機的设计として、冷却仕様を基に熱力学的検討による各部の寸法や駆動周波数、ピストンおよびディスプレイサ振幅等の駆動条件の決定、次いで駆動条件を満たすための振動系の検討によるピストンおよびディスプレイサ駆動力の決定、最後に、決定した駆動力を得るためのリニアモータ仕様およびラジアル負荷を支持する磁気軸受仕様の決定の順で行う手法を提案している。この中で特に重要な箇所は、フリーピストン形特有のガスばねを主ばね要素とするピストン系の振動解析であり、ピストンとシリンダとの隙間や作動空間内の絞りによるダンピング特性への影響把握が重要であることを述べている。

第 5 章では、提案した手法で設計、試作した各要素の特性評価について述べている。要素はリニアモータ、振動系、磁気軸受、蓄冷器であり、各々の特性に関する実験結果と設計仕様とを相対させることにより設計方法を評価するとともに、設計方法の不都合が存在する場合における修正方法についても詳細に議論している。

第 6 章では、第 5 章で評価した要素を用いて構成したモデル冷却機の特性について述べている。まず、モデル冷却機の中で逆スターリングサイクルが構成されていることを確認し、冷却機的设计手法が有効であることを評価している。次いで、冷却能力他の目標設計仕様とモデル冷却機による実験結果とに生じた差異について、採取実験データに基づく冷却機能の分析・評価を行うことでその原因を推定し、改善策を提案している。本改善の効果をモデル冷却機により確認し、得られた知見を基に設計手法の改良を行っており、新たにモデル冷却機を設計・試作し、実験評価を行うことで設計方法の高度化を図っている。

第 7 章では、モデル冷却機による信頼性の評価について述べている。信頼性として、冷却機の運転信頼性、冷却性能の劣化現象を取り上げており、冷却性能や軸芯挙動に関する実験結果、運転後の要素状態の観察により、機器としての耐久性や冷却性能の変動について評価を試みている。また、被冷却体である IRCCD の計測精度に大きく影響を及ぼす冷却機の振動を低減する手法として、アクティブ制振器の有効性を数値解析的に説明している。

第 8 章においては、全体の結論および研究の技術水準について述べている。

以上を要約すると、宇宙用途の機械式冷却機として選定したフリーピストン形逆スターリング冷却機に関し提案された設計手法は、可動永久磁石形リニアモータ、磁気軸受、蓄冷器などの構成要素の設計手法も含め、実用性の高い設計手法である。冷却機性能に対し最も影響の大きいガスばね特性に関し、より実現象に近いモデル化による解析を設計手法の中に組み入れることにより、設計手法としてさらに高度化できることも示唆されており、提案された設計手法は、産業上、重要な技術となることが期待される。よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格であると認められる。