

論文の内容の要旨

論文題目 : 人工衛星搭載用逆スターリング冷却機の研究

氏名 : 石井雅治

1. 研究の経緯

地球観測や大気汚染のモニタリングに使用される高分解能、広波長域の赤外線検出機器用として、IRCCD (Infra-Red Charged-Coupled Device、赤外線電荷結合素子) の開発が進められてきた。宇宙空間で IRCCD を用いた精度の高い観測 (例えば S/N 比を高めること等) を実現するためには、次の条件を満たす機械式冷却機の実用化が要望されていた。

- 1) 数Wの熱負荷に対して 70K 程度に IRCCD を冷却できること。
…地球及び大気圏の赤外線観測のため、センサ側の温度を地球及び大気圏温度より低下させ、S/N 比等を向上させる。
- 2) 軌道上で 3 年以上稼働できること。
…宇宙空間でのミッションのため、ミッション期間が観測機器の必要寿命となる。
- 3) 振動を極力小さくできること。
…観測基点となる宇宙空間での観測機器の振動は、地球および大気圏の観測部の座標位置を増幅して振れさせることになり、観測精度を著しく低下させる。

上記 3 項目に加え、小型軽量が機械式冷却機の要求仕様になることは言うまでもない。本論文は、1986 年より上記要望に応えるべく進めたフリーピストン形逆スターリング冷却機の研究を纏めたものである。

2. 研究の流れ（本論文の纏めの範囲）

当初、10年間の研究開発を経てフライトモデルまで試作する研究開発計画であったが、搭載する人工衛星打ち上げ計画が解消されたため、その時点で本プロジェクトは終了した。よって本研究開発も以上の経緯で終了したが、無重力空間での振動特性他を除き、基本的な特性を確認するための研究は完成しており、機械式冷却機を開発するという当面の目的を果たすことができた。本論文は、開発技術を具体的な設計方法として纏めたものである。

3. 逆スターリングサイクルの動作原理（本論文の対象とした冷却機の基本原理解）

冷却機本体は蓄冷器（Regenerator）、ピストン（Piston）およびディスプレーサ（Displacer）より構成されている。ピストンとディスプレーサは、ある位相差をもって同期運動される。圧縮行程では、作動気体は圧縮空間（Compression Space）内でピストンにより圧縮される。圧縮された圧縮空間内の高圧気体は、ディスプレーサの動きにより、高圧のまま膨張空間（Expansion Space）へ移動する。膨張行程では、気体は膨張空間内でピストンの動きにより膨張する。膨張した膨張空間内の低圧気体は、ディスプレーサの動きにより、等容状態で圧縮空間に移動し、1サイクルが完了する。冷却機動作は、膨張空間で作動気体が膨張する際に行われる。本動作における熱のやり取りを効率的に行うための役割を負っているのが蓄冷器である。

4. 論文の概要

本研究開発の目標仕様を表 1 に示す。

冷却温度 70K の下で、被冷却体他からの熱量 5W を冷却できることを開発仕様とした。本仕様は、被冷却体である IRCCD のジュール発熱、信号線からの侵入熱および輻射熱の合計として定義した。本冷却仕様の下で、寿命の指標となる MTTF が 8,000hr 以上、小形軽量化の指標となる比重量が 4 kg/W 以下を満たす冷却機を開発することを目標とした。

本論文は、以下に示す検討結果の詳細を設計知見として纏めた。フリーピストン形逆スターリング冷却機の設計方法の提案も本論文の大きな目的である。

熱力学冷凍サイクルにはスターリングサイクル(Stirling Cycle)を選定、効率は理想的にはカルノーサイクル(Carnot Cycle)のものと同しく、種々の極低温サイクルの中でも最も効率が高いことは良く知られている。また、本サイクルを構成する冷却機は圧縮要素を内蔵することから、小形軽量化を図りやすい一方、駆動系機構の選択によっては軸受の負荷荷重を小さく抑えることができる。すなわち、磁気軸受のような軽

表 1
本研究開発の目標仕様

Items	Specifications
Refrigerating Cycle	Stirling Cycle
Cooling Power	5 W at 70 K
MTTF ¹	8,000 h
COP ²	0.025
Specific Weight	4 kg/W
Cool-Down Time	≤ 10 min
Configuration	Integral

MTTF¹: Mean Time Till Failure
COP²: Coefficient Of Performance

表 2
冷却機に対する要求項目と最適構造

Items	Requirement	Optimum Structure
Driving Mechanism	Low Vibration Oil Free	Free Piston Type
Motor	Controlability of Frequency, Force, etc.	Linear Motor
Bearing	Non-Contacting High Stiffness High Centering Accuracy	Magnetic Bearing
Control	Piston/Displacer Phase Cooling Power Vibration	Phase Control Active Damper

荷重向きの非接触形軸受の適用が可能となる。これらを考慮し、冷却機に要求される項目と、要求項目を満たすと思われる冷却機構造を纏め、表 2 に示す。

駆動系構造は、発生する振動が抑制し易い一方向振動であること、極低温冷却機の重要な運用条件となるオイルフリーを実現し易いこと、冷却能力を制御する上で、駆動周波数や冷却機の圧縮要素を構成するピストン振幅を任意に変えられること、作動ガス密封するために冷却機内部に駆動機構を設けられること、等が望ましい。軸受は、オイルフリー化を実現するため、非接触であるとともに可動部となるピストンやディスプレイサとシリンダとの隙間を均一に保たせる制芯性が良好であることが必要である。また、可能な限り剛性が高いことが望ましい。制御性は、冷却性能に大きな影響を及ぼすピストンとディスプレイサとの振動位相差や冷却機本体の振動を制御できることが必要不可欠となる。

要求条件を満たす構造として、本開発では、駆動系をリニアモータ、支持系を磁気軸受で達成するフリーピストン形逆スターリング冷却機に研究開発ターゲットを絞った。また、振動位相差の制御等に有効なように、ピストン、ディスプレイサ各々を独立にリニアモータで駆動できる構造とした。リニアモータの形式として、コイル給電線を静止側に取り付けることができる可動磁石形とした。以上示した構成要素および冷却機に対し、下記手順に示す設計方法を提案し、実設計を進めた。i) 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、ii) 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、iii) ラジアル力を支持するための磁気軸受仕様の決定、の順で設計検討を行い、これら決定した仕様を基に逆スターリングサイクルを構成する冷却機を設計した。

上記設計方法を基に設計、試作した研究モデル機により、各種因子の影響を明らかにした。この中で、特に重要な箇所はフリーピストン形特有の研究開発項目である ii) の振動系の検討であり、特にガスばねを主ばね要素とするピストン系の振動解析を進めた結果、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影響を受ける粘性減衰特性が、冷却機特性の影響因子として最も重要であることを明らかにした。

5. 結 論

フリーピストン構造の逆スターリング冷却機は、宇宙用途としての優れた特徴が着目され、各所で開発が進められるようになってきたが、クランク-コネクティングロッド方式を駆動系とする従来の冷却機に比べ、開発や設計を進める上での詳細な知見が公表された例は少なかった。

本研究は、宇宙用途の機械式冷却機としてフリーピストン形逆スターリング冷却機を対象に開発を進め、設計方法の構築ならびに設計上必要な知見を得ることを目的に行った。本論文にて提案した設計方法は、フリーピストン形構造の駆動系や支持系要素、さらには冷却機として構成する上で重要なピストン、ディスプレイサおよび蓄冷器等の冷凍サイクル要素の最適設計を行う上で、実用に供するレベルに達することができた。また、人工衛星への搭載という形で研究成果を成就させることはできなかったが、所期目標である冷却温度 70K で実冷却能力 5W を実現する冷却機を開発することができた。

本論文の主要な知見を纏めると次の通りである。

構想設計段階において、高性能のみならず長寿命や高振動制御性が特に重要な条件となる宇宙用途の冷却機構造として、逆スターリングをサイクルに選定し、構成要素として可動永久磁石形リニアモータ、磁気軸受およびアクティブダンパを仕様とするフリーピストン構造が適することを明らかにした。本構造において、特に、冷却機の動作を支配する重要な因子は、ピストンと冷

却機の作動空間で構成されるガスばねであることを明らかにした。

要素設計段階において、冷却機の駆動源となるリニアモータの設計は、パーミアンスモデルを基本として、空隙、材料、コイル等の因子の最適組み合わせを求める設計方法が適することを示した。本方法を基に設計、試作したリニアモータの特性実験の結果から、提案したリニアモータ設計方法は、実用に供することができることを実証した。

リニアモータによる磁気吸引力から必要軸受仕様を解析的に求め方法を提案し、これを基にした磁気軸受の設計方法を示した。本方法を基に設計、試作した磁気軸受は PID 方式により制御を行うが、新たに駆動周波数成分強調制御という考え方を加えることにより、制芯精度の向上が図れることを実証した。

これまで、蓄冷器の設計はスターリングエンジン用再生器の特性結果を適用してきたが、論文にて示した蓄冷器要素の実験検討により、低温適用される蓄冷器はこれまでの高温適用される再生器とは異なる特性を有することなどの知見が明らかになり、今後の逆スターリング冷却機の開発、設計に有効に活用できることを示した。

以上示した構成要素の設計および実証実験の結果を基に設計、試作したモデル冷却機による設計方法の検証および信頼性評価としては、開発目標である冷却温度 70K のもとで実冷却能力 5W を満たすモデル冷却機を開発できたことで、提案した冷却機設計方法が実用できることを明らかにした。冷却性能は、ガスばねの粘性減衰特性が大きな影響因子であり、ピストン周囲隙間の漏洩を低減することで性能向上が可能であることを示した。また、約 2,000hr の運転結果の分析結果により、冷却信頼性の問題が起こり得る所としてデスプレーサとシリンダとの接触を挙げることができる。

振動抑制として、アクティブダンパの適用は有効であることが明らかになった。なお、信頼性に関する評価期間を通し、磁気軸受の制芯特性は良好であった。

以上示した通り、本研究にて提案したフリーピストン形逆スターリング冷却機の設計方法は、実設計に有効であることを確認した。