B03 次期ミッションに向けた2段スターリング冷凍機の性能向上

Improvement of Two-stage Stirling Cooler Performance for Next Space Missions

○佐藤洋一(JAXA)、杉田寛之(JAXA)、中川貴雄(JAXA)、村上浩(JAXA)、満田和久(JAXA)、平林久(JAXA)
 村上正秀(筑波大学)、恒松正二(住友重機械)、榎崎勝弘(住友重機械)
 平林誠之(住友重機械)、吉田誠至(住友重機械)、大塚清見(住友重機械)

Yoichi Sato, Hiroyuki Sugita, Institute of Aerospace Technology, Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki
 Takao Nakagawa, Hiroshi Murakami, Kazuhisa Mitsuda, Hisashi Hirabayashi, Institute of Space and Astronautical Science,
 Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1 Yoshinodai, Sagami, Kanagawa
 Masahide Murakami, Institute of Engineering Mechanics and Systems, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki
 Shoji Tsunematsu, Katsuhiko Narasaki, Masayuki Hirabayashi, Seiji Yoshida, Kiyomi Ootsuka, Sumitomo Heavy Industries, Ltd., Niihama
 Works, 5-2 Soubiraki-cho, Niihama, Ehime

The advanced two-stage stirling cooler has been developed for the cryogenic system of next space missions, SPICA, NeXT, ASTRO-G promoted by JAXA. In order to meet the cooling requirements of these missions, improvement of cooling performance and mechanical reliability is required based on the existing two-stage stirling cooler with cooling capacity 0.2 W at 20 K by power input 90 W, which is operated on the infrared astronomical satellite AKARI(ASTRO-F) launched in 2006/2/22. This paper describes the cooling capacity evaluation test by simulating contamination of the working gas and mechanical attrition reduction by flat-spring-supported displacer for development of the advanced two-stage stirling cooler.

Key Words: Two-stage stirling cooler, Simulated working gas contamination, Flat spring

1. はじめに

現在、JAXA（宇宙航空研究開発機構）が中心となり検討を進めている次期天文衛星 SPICA⁽¹⁾、NeXT、ASTRO-G の望遠鏡・検出器の冷却系として、新型2段スターリング冷凍機の開発が行われている。その開発ベースとなる現状の2段スターリング冷凍機は、2006年2月22日に打ち上げられた赤外線天文衛星「あかり(ASTRO-F)」の冷却系使用を目的として開発されたもので、90 W の電力入力に対して1段冷却ステージで1 W @ 70 K、2段冷却ステージで0.2 W @ 20 K の冷却能力を発生し、ミッション要求である1.5年の連続運用を地上試験において実現している⁽²⁾。本冷凍機は、国際宇宙ステーション/日本実験棟 JEM で運用予定の地球大気観測機器 SMILES の4 K 級冷凍機⁽³⁾の一部として利用されるだけでなく、1段目だけを利用した1段スターリング冷凍機として、2005年に打ち上げられたX線天文衛星「すざく(ASTRO-EII)」で運用され、月周回衛星 SELENE(2007年打ち上げ)、金星探査衛星 Planet-C(2010年打ち上げ)に搭載される予定である⁽⁴⁾。また、次期地球観測衛星等への搭載も検討されている。このように本冷凍機はJAXAにおいて宇宙用共通基盤技術として位置づけられおり、その発展型である新型2段スターリング冷凍機に関しては、1 K 級、2 K 級および4 K 級 JT（ジュール・トムソン）冷凍機の高効率化のための低温化(20 K 以下)、長期観測ミッションに対応した長寿命化(5年以上)に加えて、高空間分解能の観測ミッションに求められる振動擾乱の低減といった技術課題を解決していくことが求められている。

本稿では、現状の冷凍機の軌道上性能評価、長寿命化を目的とした、作動流体汚染の模擬による冷却性能確認試験結果、機械的な磨耗・疲労対策について報告する。

2. 20K 級2段スターリング冷凍機の概要

Fig.1 は赤外線天文衛星あかり(ASTRO-F)に搭載されている20K 級2段スターリング冷凍機の断面概略図である。冷凍機は圧縮機、2段ディスペンサを有するコールドヘッドおよび連結パイプから構成される。圧縮機は振動低減のためツインド向型リニア駆動ピストンを採用している。ピストン支持機構としてリニアボールベアリング支持方式を採用する

ことにより、ロングストローク運転と低周波数運転を可能にしている。圧縮機的设计ストロークは30 mm、圧縮容積は9.5 cm³である。コールドヘッドの2段ディスペンサの寸法はφ15 mm × 50 mm、φ6.5 mm × 60 mm、設計ストロークは6 mm である。また、ステンレスメッシュを蓄冷材（再生器）に使用している。ディスペンサ駆動部には圧縮機と同様、リニア駆動方式を採用している。駆動ドライバを除く冷凍機全体の重量は9.5 kg であり（圧縮機:7 kg、コールドヘッド:2 kg、アクセサリ:0.5 kg）、作動流体であるヘリウムガスの封入圧力は1 MPa である。この冷凍機の開発要求仕様を Table 1 に示す。冷却能力は室温環境下において0.2 W @ 20 K(90 W 入力)、継続運転期間は1.5年以上が求められる。

Fig.1 Schematic drawing of 20 K-class two-stage stirling cooler

Table 1 Specifications of 20 K-class two-stage stirling cooler for AKARI (ASTRO-F)

Cooling capacity	> 0.2 W @ 20 K
Driving power	< 90 W
Service life	> 1.5 year
Mass	< 10 kg
Environmental temperature	> 200 K

Table 2 は本冷凍機の地上性能試験の結果であり、入力電力 50, 90 W による冷凍機駆動時の熱負荷に対する各冷却ステージ温度を示している。90 W 入力時に仕様要求の冷却性能を十分に発揮していることが確認された。

Table 2 Evaluation test result of cooling capacity

Power input (W)	Temperature / Heat load	
	1st-stage	2nd-stage
50 W	90.3 K @ 1 W	21.8 K @ 0.2 W
90 W	71.5 K @ 1 W	18.4 K @ 0.2 W

3. 20 K 級 2 段スターリング冷凍機の軌道上運用

2006 年 2 月 22 日に、赤外線天文衛星あかり (ASTRO-F) が M-V ロケットにより打ち上げられ、軌道上での天体観測が行われている。衛星ミッション部には 3 台の近中間赤外カメラ (IRC: Infrared Camera) と 1 台の遠赤外サーベイヤー (FIS: Far-infrared Surveyor) が搭載され、波長 2-200 μm の赤外線サーベイ観測を行う。望遠鏡システムは有効径 67 cm の主鏡と焦点距離が調整可能な副鏡から構成される。これらの検出器、望遠鏡システムは望遠鏡自身の赤外放射および検出器の暗電流低減のために 6 K 以下に冷却される。あかり (ASTRO-F) には 170 l の超流動ヘリウムと 20 K 級 2 段スターリング冷凍機を併用した冷却系が搭載されている。

Fig.2 にあかり (ASTRO-F) の冷却系概略図を示す。冷却系はヘリウムタンク、観測装置を支持する SIA サポート (SIA:

Scientific Instrument Assembly)、蒸発ヘリウムガスで冷却される 2 層のシールド板 (IVCS: Inner Vapor Cooled Shield および OVCS: Outer Vapor Cooled Shield)、真空容器であるアウターシェル、コンポーネントを支持するサポートストラップ、配管系、望遠鏡への迷光入射を防ぐためのバッフルから構成される。冷凍機はアウターシェル上に 2 台取り付けられ、各 50 W 入力で運用される。冷凍機の 2 段冷却ステージは IVCS と接続されており、IVCS 先端からの熱放射と相まってヘリウムタンクへの熱侵入を低減し、寒剤である超流動ヘリウムの蒸発を抑制している。冷凍機の搭載により、ヘリウムが枯渇するまでの期間が約 2 倍になると推定されている。

Fig.3 はあかり (ASTRO-F) に搭載されている冷凍機のテレメトリデータである。あかり (ASTRO-F) は打ち上げ後、高度 700 km の太陽同期軌道に投入され、軌道上での姿勢が確立した後、2006 年 4 月 13 日にクライオスタット開口部の望遠鏡蓋 (アパチャーリッド) が分離され基本観測モードに移行した。2 台の冷凍機は、打ち上げ後に起動動作確認を終え、計 100 W の入力電力で定常運用されている (Fig.3 (a))。アパチャーリッド分離とともに、クライオスタット開口部からの放射冷却が促進され、冷凍機 2 段冷却ステージと冷却対象である IVCS の温度は低下しそれぞれ設計温度である 20, 30 K に安定していることが確認できる (Fig.3 (b))。あかり (ASTRO-F) では、超流動ヘリウムによる観測寿命は 1.5 年と予測されており、ヘリウムが消費された後は冷凍機のみによる観測も計画されている。

Fig.2 Cross-sectional view of AKARI (ASTRO-F) cryostat and photograph of installed two-stage Stirling cryocooler

(a) Transition of input power to two set of compressor and cold head

(b) Transition of measured temperature on IVCS and 2nd stage of two-stage Stirling cryocooler

Fig.3 AKARI (ASTRO-F) telemetry data

4. 新型2段スターリング冷凍機の開発

機械式冷凍機は、赤外線、X線或いは電波等の観測に必須となるセンサ冷却用極低温熱制御デバイスであり、観測センサへの飛躍的な高感度化要求に伴い冷凍機の高性能化が必要となる。Table 3に示すように、特にスターリング冷凍機は軌道上運用実績があるとともに、今後多くのミッションへの搭載が予定もしくは検討されている。これらを確実に実現するため、現行の20 K級2段スターリング冷凍機をベースとした新型2段スターリング冷凍機の開発が求められている。ここでは、現行冷凍機の長寿命化を目的に、不純ガス発生源の特定と冷却性能劣化の確認試験、フラットスプリングを用いたディスプレイサ支持による機械的磨耗・疲労の軽減対策の実施結果について述べる。

Table 3 Stirling cooler application

Mission	Cooling object	Cooling capacity (Configuration)
SUZAKU(X-ray Astronomy Satellite)	X-ray spectrometer	2.5W @ 100K (1 stage)
AKARI(Infrared Astronomy Satellite)	Telescope and detector	0.2W @ 20K (2 stage)
SELENE(Lunar Exploration Satellite)	Gamma ray spectrometer	1.5W @ 80K (1 stage)
ISS/JEM/SMILES(Earth Atmosphere Observation)	Superconductive submillimeter mixer	0.2 W @ 20K (2 stage)
Planet-C(Venus Climate Satellite)	Near-infrared camera	1 W @ 65K (1 stage)
ASTRO-G(Radio Astronomy Satellite)	Low noise amplifier	0.2W @ 30K (2 stage)
Earth Observation Satellite(TBD)	TBD	1.2W @ 70K (1 stage)
NeXT(Next X-ray Astronomy Satellite)*	Soft X-ray spectrometer	0.2W @ 20K (2 stage)
SPICA(Next Infrared Astronomy Satellite)*	Telescope and detector	0.2W @ 20K (2 stage)

*International collaborated mission

4. 1. 不純ガス冷却性能確認試験

新型2段スターリング冷凍機の開発にあたり、軌道上長期運用の冷凍機性能の変化を調査するため、不純ガスによる作動流体の汚染を模擬した評価試験を実施した。不純ガスとしてCO₂、N₂を用い、それぞれの体積濃度範囲を0-5000 ppmv、0-3000 ppmvに設定した。結果をFig.4に示す。Fig.4(a)はCO₂の場合であるが、濃度が500 ppmvを超えると1段ステージの温度は急激な上昇を示した。これは、濃度500 ppmvの分圧に対するCO₂凝固温度(146K)が冷凍機1段ステージ温度よりも高いため、CO₂が1段ディスプレイサ内の蓄冷材部で固化したことによるものと考えられる。また、不純ガスの固化が原因で、コールドヘッドの動きが不安定になることが確認された。一方、不純ガスがN₂の場合、濃度の増加に伴い1段および2段ステージの温度が徐々に増加していく(Fig.4(b))。これらの結果から、冷凍機2段ステージ温度は、不純ガスCO₂、N₂濃度がそれぞれ500、1000 ppmv以下であれば、安定した冷却性能を発揮することができ、また、1段ステージ冷却性能に関しては作動流体の汚染に対して比較的影響を受けやすいと言える。

4. 2. 構成部品ベーキングによるアウトガス確認試験

冷凍機の運用中に、構成部品からのアウトガスにより作動流体が汚染され冷却性能の劣化をもたらすことが懸念される。冷凍機組み立て前に行うベーキング作業に際して、主な不純アウトガス発生源を特定するため、コールドヘッド及び圧縮機の構成部品の材料についてアウトガス成分、ベーキング効果に関するデータを調査した。また、文献ではデータが

得られない部位として、磁気回路および駆動コイルを抽出し、これらのテストピースによるアウトガス成分およびその変化量の測定を実施した。測定には恒温槽内に設置された真空容器を用い、その内部にテストピースを入れベーキングを行いアウトガス量の時間変化を測定することによりその総量を推定する。これらの文献および過去に実施した試験より得られたアウトガス成分、ベーキング効果のデータからは、冷凍機内部で発生する不純ガスはコイル、マグネット、接着剤からのものが大部分を占め、その総量は3.5 g程度になることが推定される(Table 4)。このアウトガスを低減する対策として、構成部品の面接触部位を減らし接着剤の使用量を減らすことも今後検討する。

Table 4 Presumption value of outgas

Test piece	Amount of outgas (g)
Magnet	1.26
Coil	1.98
Adhesion bond and otherwise	0.25
Total	3.49

4. 3. 機械的磨耗・疲労対策

現行の2段スターリング冷凍機の1段および2段ディスプレイサ両端のシール部は、組立精度によりシリンダと接触するため、長時間運転の際の磨耗によるクリアランス拡大や不純ガス発生は避けられない。このような冷凍機の信頼性低下や発生擾乱の要因の一つと考えられる機械的磨耗・疲労の対策として、シリンダとの「非接触」構造を可能とするフラットスプリング支持方式の1段ディスプレイサを試作し、2段スターリング冷凍機コールドヘッドに組み込み、冷却性能を測定した。その結果、両冷却ステージ熱負荷時において、従来支持方式のディスプレイサよりも、1段および2段の冷却ステージはそれぞれ冷却能力が向上することが確認された(Fig.5)。ディスプレイサ/コンプレッサの駆動位相差やストローク調整により、さらに性能が向上することが期待される。1段ディスプレイサをフラットスプリング支持にしたものの、2段ディスプレイサは構造上、先端部の接触を回避できない。そこで2段ディスプレイサ先端部のシール・クリアランスを従来のものより拡大した場合の冷却性能を評価した。その結果、クリアランスが従来の2.5倍程度までは冷却性能への影響が少ないことが確認され、クリアランスの拡大により磨耗を一層低減し、長寿命化できることが明らかになった。

5. まとめ

現在、軌道上で観測が行われている赤外線天文衛星あかり(ASTRO-F)の冷却系として搭載されている現行の20 K級の2段スターリング冷凍機が、設計要求の温度環境を維持していることが確認できた。また、次期ミッション要求への対応として、現行冷凍機の冷却能力および信頼性向上を目的に、作動流体汚染による冷却性能劣化の確認試験と機械的な磨耗・疲労対策を実施した。

- (1) 不純ガスCO₂、N₂混入による作動流体の汚染を模擬した冷凍機性能評価試験を実施した。CO₂、N₂濃度がそれぞれ500 ppmv、1000 ppmv以下であれば、安定した冷却性能を維持できることを確認した。
- (2) 冷凍機構成部品のベーキング時に発生するアウトガス発生部位の特定とその総量を推定した結果、3.5 g相当のアウトガス低減が必要である。
- (3) 冷凍機コールドヘッドの1段ディスプレイサ部をフラットスプリング支持にすることで、シリンダとの非接触を実現し冷却性能を向上させることができた。

- (4) シリンダとの磨耗を低減するため、2 段ディスプレイサ先端部のクリアランスを従来の 2.5 倍程度まで拡大したが、冷却性能への影響はほとんど無いことが確認できた。

参考文献

- (1) H. Sugita, T. Nakagawa, H. Murakami, A. Okamoto, H. Nagai, M. Murakami, K. Narasaki, M. Hirabayashi, "Cryogenic infrared mission "JAXA/SPICA" with advanced cryocoolers," *Cryogenics* 2006;46:(149-157)
- (2) K. Narasaki, S. Tsunematsu, K. Ootsuka, M. Kyoya, T. Matsumoto, H. Murakami, T. Nakagawa, "DEVELOPMENT OF TWO-STAGE STIRLING COOLER FOR ASTRO-F," *Advances in Cryogenic Engineering: Transactions of the Cryogenic Engineering Conference – CEC, Vol.49*, pp.1428-1435, 2004.
- (3) K. Narasaki, S. Tsunematsu, S. Yajima, A. Okabayashi, J. Inatani, K. Kikuchi, R. Satoh, T. Manabe, M. Seta, "DEVELOPMENT OF CRYOGENIC SYSTEM FOR SMILES," *Advances in Cryogenic Engineering: Transactions of the Cryogenic Engineering Conference – CEC, Vol.49*, pp.1785-1794, 2006.
- (4) K. Narasaki, S. Tsunematsu, K. Kanao, K. Otsuka, S. Hoshika, K. Fujioka, K. Tsurumi, M. Hirabayashi, "DEVELOPMENT OF SINGLE STIRLING COOLER FOR SPACE USE," *Advances in Cryogenic Engineering: Transactions of the Cryogenic Engineering Conference – CEC, Vol.51*, pp.1505-1512, 2006.

(a) Contaminated case with CO₂ gas

(b) Contaminated case with N₂ gas

Fig.4 Cooling performance of two-stage stirling cryocooler with contaminated working gas

Fig.5 Improved cooling capacity due to displacer supported by flat springs