C05 宇宙機搭載をめざした小型パルス管冷凍機の評価

－ 低温端の振動測定 －

Characterization of miniature pulse tube coolers for space applications

－ vibration measurements of cold head －

○ 久志野彰寛、杉田寛之 (宇宙航空研究開発機構)、松原洋一

Akihiro Kushino, Hiroyuki Sugita, JAXA, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki, Japan
Youichi Matsubara

We report results from three pulse tube coolers used at around 60 K. All of them were successfully driven in vacuum conditions and showed similar cooling capabilities with *flight* Stirling and pulse tube coolers. Vibrations at cold heads and linear compressors have been measured and their displacements were revealed to be less than 10 μm in x, y and z directions. They imply that vibration from the compressor must be dominant in 'integrated' pulse tube coolers.

Key Words: mechanical cryocooler, pulse tube cooler, satellite, sensor, vibration

1. はじめに

地球大気観測衛星や気象衛星では60–80 Kで動作する高感度の観測センサが用いられる。この温度での機械式冷凍機として従来からスターリング冷凍機が用いられてきたが(例えば [1])、低温部に可動ピストンが存在するため、摩耗や振動といった点で信頼性に課題が残されている。一方で低温部に可動機構を持たないパルス管冷凍機はスターリング冷凍機に比べ低振動・長寿命が期待されており、2002年5月に打ち上げられたEOS-Aqua搭載のAIRSにもあるように[2]、軌道上でも実証がされてきている。近年、国産の民生用パルス管冷凍機は、移動体通信における超電導フィルタの冷却等を目的として研究が進められ[3]、60–80 Kレベルの冷却能力ではスターリング冷凍機と比べても遜色ないものが開発されてきている。

今後特に、環境保護、資源探査、気象観測、情報収集等を目的とした地球観測衛星の必要性は、今よりも増すものと考えられ、わが国でも技術蓄積や製造コストの削減を考えて、宇宙機搭載型のパルス管冷凍機を自前で開発していかなければならない。我々は平成14年度より衛星搭載用小型冷凍機の開発をスタートさせ、第一段階として60–80Kレベルの民生用パルス管冷凍機3種の評価を行ってきた[4]。今回、搭載センサの冷却に際して極めて重要な、冷凍機駆動時の低温端の振動を測定したので報告を行う。

2. パルス管冷凍機および測定装置

試験用としてアイシン精機、ダイキン工業、富士電機の三種の60 Kレベルの冷凍機を用い、宇宙開発事業団の真空チャンパ内にて運転を行うため、空冷から伝導冷却方式に改造した。基本的な仕様と我々が測定した諸性能をTable.1に示す。冷凍能力に関してはEOS-AM1[1]やMTSAT-1R[5]搭載のスターリング冷凍機、パルス管冷凍機と比較しても問題となる値ではないと考えている(ただし100W程度の入力が軌道上で確保できた場合)。

Table.1: Specification of three coolers.

冷凍機 メーカー	SPR-02A アイシン	SP2000 ダイキン	CXZ1A0Z1 富士電機
冷凍機重量 (kg)	8.7	16.4	10.2
高さ (mm)	300	300	340
幅 (mm)	250	250	190
コンプレッサ径 (mm)	90	110	90
形式	インライン	U字	インライン
[†] 最低到達温度 (K)	[†] 47.7	[‡] 56.1	^b 47.5
[†] 77Kでの冷凍能力 (W)	[†] 3.2	[‡] 2.0	^b 3.4
[†] 77Kに要する時間 (min)	[†] 25	[‡] 37	^b 26

[‡]: 事業団の真空チャンパ内にて50Hz/100Wで運転し、低温端にMLIを巻いた状態で測定した値。

[†]: 放熱部温度19°C。[‡]: 同14°C。^b: 同17°C。

試験用の冷凍機は全て民生用がベースであり、コンプレッサとパルス管が一体となったintegrate型である。振動測定には3次元加速度センサを用い、リニアコンプレッサのストローク方向をx、鉛直方向をz、それらに垂直な方向をyとし、計6箇所の加速度と変位を測定した(Fig.1)。振動測定中は振動源となりうる真空ポンプおよび放熱板冷却用のチラーは停止し、冷凍機には入力50Hz/100Wのサイン波を入力した。センサからの出力は必要に応じてデジタルオシロスコープまたはFFTアナライザに取りこんだ。

Fig.1 Positions and directions of the vibration sensors on a pulse tube cooler (shown by arrows).

3. 結果

3.1 周波数分布

100W での運転開始直後における、低温端の変位の周波数分布の例を Fig.2 に示す。駆動周波数である 50Hz がもっとも強く、その高調波が 100Hz に見えているが、これ以上高い周波数成分は殆ど確認されなかった。

Fig.2 Displacements of a cold head. Top, middle and bottom panels correspond to results obtained from x, y and z directions, respectively.

3.2 変位測定

Figure.2 に対応する低温端の変位を Fig.3 に示す。ただしフィルタにより 400Hz 以上の高周波成分は除いてある。ここから求めた変位の絶対値は x 方向 $4.4 \mu\text{m}$ 、y 方向 $4.2 \mu\text{m}$ 、z 方向 $6.8 \mu\text{m}$ であり、際立った異方性や短時間で大きさの変化は観測されなかった。加速度センサの systematic error は 5% 程度である。

4 考察および今後の予定

低温端とは別に測定したコンプレッサ部分の変位は $5 \mu\text{m}$ 程度であり、低温端と同等であった。これは integrate 型の場合の低温端の振動はコンプレッサ起源のものが支配的であることを明らかに示している。被冷却物にもよるが、 $5 \mu\text{m}$ という値は無視できるものではなく、例えば撮像を目的とした CCD カメラの冷却を考えた場合、その画素サイズ $\sim 30 \mu\text{m}$ の 10 % にもなる。一方で赤外線検出器冷却用の split 型スターリング冷凍機の低温部の変位でも $1 \mu\text{m}$ を切る値が得られており (例えば [1])、低温部がセンサを直接的に冷却する構造をとるのであれば、衛星搭載用のパルス管冷凍機は split 型にすることが望ましいと言える。また、振動を作り出していると考えられるコンプレッサのピストンのストロークは入力大きさに伴って変化することから、振動を抑えるためにもコンプレッサの入力は抑える設計とすべきと考えられる。

Fig.3. Displacements of the cold head and background obtained when the cooler is off. Top, middle and bottom panels correspond to results from x, y and z directions, respectively.

また今回の報告は主に運転直後の振動測定に基づいたものであるが、より現実的な低温状態での振動および加速度の評価と、U 字型/インライン型についての系統的な振動評価を続け、開発の第二段階としての搭載モデルに近づけていきたいと考えている。

謝辞

本冷凍機の試験を進めるにあたり、メーカーの方々から有益なコメント、アドバイスを頂きました。この場をお借りして心より感謝いたします。

参考文献

- [1] Kawada, M., Akao, H., Kobayashi, M., Maekawa, T., & Fujisada, H. 2001, Proc. SPIE, 4169, 88.
- [2] Ross, Jr. R. G., Proc. 12th International Cryocooler Conference, MIT, U.S.A. 2002.
- [3] 平塚善勝, 村山恭平, 前田義文, 康倫明, 森下弘之, 低温工学, Vol.38, 2003, 1.
- [4] 久志野彰寛, 杉田寛之, 松原洋一, 第 68 回 低温工学・超電導学会 講演概要集, p185.
- [5] Raab, J., Colbert, R., Godden, J., Harvey, D., Orsini, R. & Toma, G., Proc. 12th International Cryocooler Conference, MIT, U.S.A. 2002.