

宇宙線反粒子探索 GAPS 実験用ヒートパイプシステムの開発

○近藤愛実(東海大学・学),岡崎峻(JAXA),福家英之(JAXA),小川博之(JAXA),高橋克征(長岡技科大・院),
山田昇(長岡技科大),河内明子(東海大),井上拓哉(東海大・院),高橋俊(東海大)

Abstract

GAPS は南極での長期気球飛翔による宇宙線反粒子の高感度観測を通じて未知の宇宙物理過程を探ることを主目的とした日米欧の国際共同計画である。検出器冷却方法として、独自のヒートパイプ技術を用いた冷却システムの開発を行ってきた。作動流体には HFC410A を用いた、従来の試験では低温環境において相変化に大きな過熱を要するため、検出器の冷却要求を上回ることがあり、課題となっていた。本シンポジウムでは過熱の低減・解消に向け、作動流体を HFC23 に変更したヒートパイプの開発状況について報告をする。

1. 目的及び背景

GAPS (General Anti-Particle Spectrometer) とは宇宙線反粒子の高感度探索を通じたダークマター探査を主目的とした日米欧の国際共同計画である¹⁾。2020 年以降に南極にて 3 度の気球飛翔実験を予定している。気球実験において、搭載機器は気球特有の環境である重力下かつ、希薄残留大気に曝される。また、長時間に渡るフライト実験であることから、消費電力に制約が発生する。さらに、主要搭載機器である Si(Li) 検出器群が冷却装置に求める要求として、物理的に検出器の視野を妨げずに、熱ノイズ低減のために、広範囲に広がる熱源を実験環境下において -35°C 以下に冷却することが挙げられる。これらの制約・要求を満たすものとして、独自のヒートパイプを製作した。ヒートパイプは配管に作動流体を飽和状態で封入した熱制御デバイスである。GAPS ヒートパイプは自励振動ヒートパイプ(OHP)とクローズループ型サーモサイフオンの駆動原理を用いている。OHPの駆動原理は加熱部での沸騰による圧力の上昇と冷却部での凝縮による圧力の低下から起こる圧力振動である。クローズループ型サーモサイフオンは加熱部が冷却部の重力加速度方向で下方に位置し、重力を利用した作動流体の自然環流によって熱輸送が行われている。GAPSヒートパイプはウィックを必要とせず、低熱流束に対応可能で抗重力性も高く、原理的には電力が不要である。さらに、体積力による駆動力も融合した独自の設計であることから高効率な熱輸送を可能にしている^{2,3)}。

これまで、封入する作動流体には HFC410A を適用し、立体配管ヒートパイプの動作実証、pGAPS によるフライト実証、ターン長 6m の U 字型やループ長 8m の O 字型という大型ヒートパイプの動作実証、大型ヒートパイプの内部流動の可視化、OHP の主駆動力が重力の場合に

関する定常状態の数値モデル化、GAPS ヒートパイプの内部解析、気液二相流解析の連成コードの構築、毛細管内の気泡の現象解明、高耐久逆止弁の開発等の成果を上げてきた。⁴⁾⁵⁾⁶⁾その一方で、相変化の際に飽和温度を超えても沸騰が起こらず、温度が上昇してしまう過熱現象の影響で加熱部の一部の温度が -35°C を大きく上回ってしまう場合があった⁷⁾。本研究では作動流体を低温環境で熱輸送特性が良いと予想される HFC23 に変更した GAPS ヒートパイプの開発状況について報告をする。

2. 実験装置

供試体には実際の搭載機器を単純化したエンジニアリングモデル(図 1)を用いた。エンジニアリングモデルの諸元を表 1 に、配管の構成と熱電対・模擬熱源の取り付け位置を図 1・2 にそれぞれ示した。図に示したように、加熱部は高さ 1.6m、冷却部・下部断熱部の全長は約 1.8m、断熱部上部の全長は 0.7m で構成され、1 ループあたり約 6m 長で計 36 ループの各ループの終点が次のループの始点に結合されている1つの閉ループとなっている。配管は内径 1.3mm、外径 3.0mm の SUS 管で構成されており、加熱部には 10 層の検出器の発熱を 1 ループあたりに 10 本のヒータラインを用いて模擬した。冷却部では配管溝を有したアルミ板に配管を埋め込み、実機の放熱板を模して 60° に傾けた。さらに、断熱部・加熱部はヒートリークを防ぐため、スタイロフォームを用いた断熱を施した。飽和圧力の制御による加熱部の温度制御のため、端部にはリザーバを取り付けた。メートル級のスケールの大きさと複雑で立体的な配管構成を持つことが GAPS ヒートパイプの大きな特徴である。

表 1. ヒートパイプのエンジニアリングモデルの基本仕様

加熱部		1.6m
冷却部		1.8m
断熱部	上部	0.7m
	下部	1.8m
ループ長		約 5.7m~7.8m
ループ数		36 ループ
Type		Closed loop
ステンレス管	内径	1.3mm
	外径	3.0mm

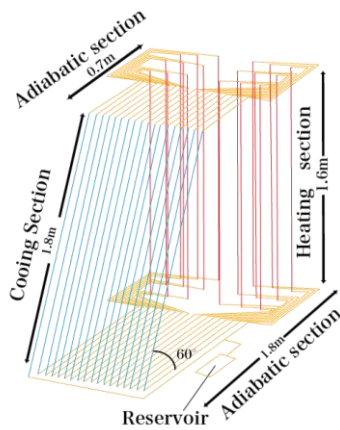


図 1. ヒートパイプのエンジニアリングモデルの配管構成

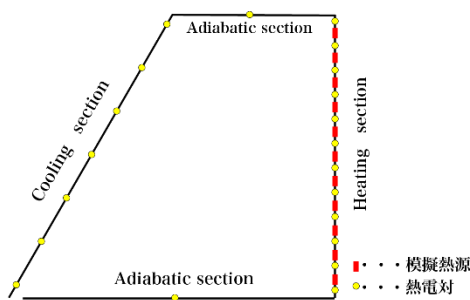


図 2. 模擬熱源、熱電対位置(1 ループ抽出)

2.1. 作動流体の選定

GAPS ヒートパイプでは OHP の駆動原理を用いていることから、作動流体の飽和蒸気圧には、自励振動の誘起に足る高圧と大きな温度依存性が求められる。地上でのリークの有無のチェックを行ったり、周囲の空気の吸い込みを防いだりする観点からも、ヒートパイプ内部が負圧にならないだけの高圧であることが望ましい。また、

ヒートパイプの周囲には検出器や気球バスシステムが搭載されており、作業員のアクセス性を確保するため、万が一密閉できておらず、作動流体がリークしてしまった場合に人体に影響がないよう、無毒かつ非燃性であることが求められる。さらに、作動流体が周囲に流出してしまった際に環境破壊を起こさないよう配慮が必要である。フライトは南極で実施されるため、稀少性が高く、入手が困難な作動流体は適さない。これらの条件を満たしている作動流体として二酸化炭素、HFC134a、HFC410A、HFC23 が挙げられる。これらの作動流体で優位性を評価するために、作動流体の特性を示す因子であるメリット数による評価を用いた。結果を図 3 に示す⁸⁾。

二酸化炭素では蒸気圧が高く、低温ではメリット数が高いため、GAPS の作動流体としては適していると考えられるが、凝固点が -55.55°C と比較的高温であるため、気液相変化を利用したヒートパイプとしての動作範囲が狭い。HFC134a では常温環境ではメリット数が高いが、低温環境でのメリット数が低いため、適していないと考えた。HFC23 は低温環境のメリット数が高く、低温環境での使用に適していると考えられる。しかし、臨界温度が 26.15°C であるため、室温での動作条件で臨界点を迎えてしまい、熱輸送が行えなくなる可能性がある。HFC410A は 20°C から低温環境でのメリット数が高く、蒸発潜熱や飽和蒸気圧も高い。HFC410A は 50°C まで 100kPa 以上の飽和圧力を有しており、低温時に高圧力の維持が可能である。これらから先行研究では HFC410A を作動流体に用いてきた。しかし、低温環境での過熱の解消、または低減に限界がある状況であったため、作動流体を低温環境でメリット数の高い HFC23 に変更した。

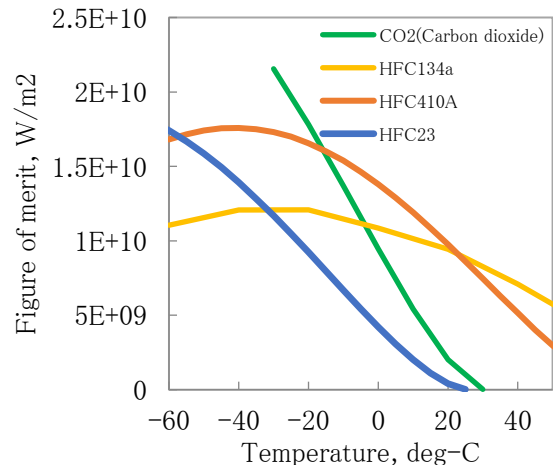


図 3. 各作動流体の温度に対するメリット数

3. 実験概要

GAPS ヒートパイプのエンジニアリングモデルを JAXA 相模原キャンパスの大型恒温槽に設置し、実験を行なった。恒温槽は南極大陸の地上から高度 35km での環境温度を想定し、0℃、-20℃、-40℃、-50℃、-60℃に冷却した。リザーバは恒温槽の温度+10℃となるよう、リザーバ用ヒータ出力を PID 制御した。冷却部では対流熱伝達を用いて輻射放熱を模擬した冷却を行なった。各環境下で模擬熱源へ初めに 50W (1 ループあたり 1.4W)を加え、1 時間から 45 分おきに総熱負荷を 50W ずつ上昇させて、加熱部上部の管壁が気体となり熱輸送特性が悪くなるドライアウト状態まで行なった。

4. 実験結果

4.1. 過熱度の低減

本章で図示する結果のグラフは各環境温度下での熱負荷 100W の場合の温度分布である。全ループが同様の温度分布だったため、代表的なループとして第 18 ループのデータを示す。温度は、各温度が安定していた 10 分間の平均値で示した。横軸の距離は冷却部と断熱部下部の接続点からの距離である。各環境下でのリザーバ制御温度を点線で示した。

1. 恒温槽 0℃環境下

図 4 は 0℃環境下での温度分布である。この温度では HFC23 の際に過熱はほとんど観測されなかったのに対し、HFC410A の過熱は顕在化しており、過熱度がリザーバ制御温度に対して最大で 3℃ほどであることが確認できた。また、過熱現象を観測した位置は HFC23 の方が加熱部の低い位置で観測していることがわかる。ここからも HFC23 の方が過熱を解消しやすいことが確認できた。

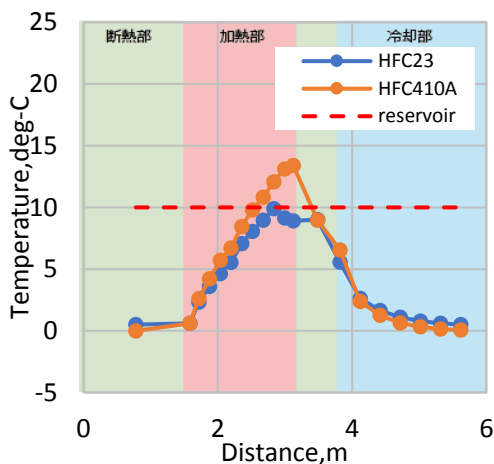


図 4. 恒温槽 0deg-C 環境下での第 18 ループの温度分布

2. 恒温槽-50℃環境下

図 5 は GAPS の実フライト試験で想定される-50℃環境下での温度分布を示した。HFC410A の場合はリザーバ制御温度より 2℃ほど高い過熱度を確認した。HFC23 では過熱は限定的で、ほとんど観測することはできなかった。また、低温環境でも 0℃環境下と同様に過熱現象を確認した位置は、HFC23 の方が加熱部の低い位置で観測されている。ここから、低温環境においても HFC23 の方が過熱の解消がされやすいことが実験からも確認できた。時間平均の温度ではどちらも過熱の影響で検出器の冷却要求を超えて温度上昇をしてしまうことはなかった。

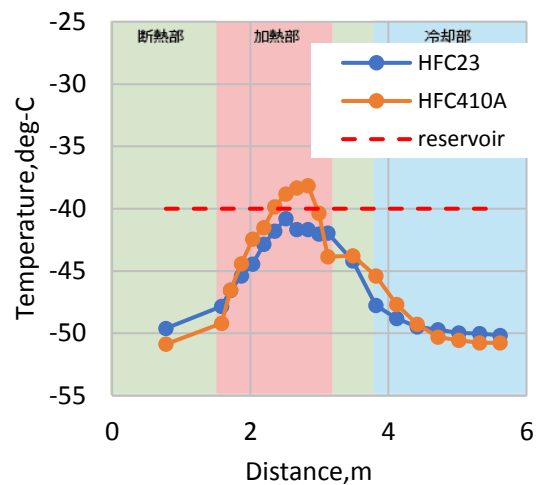


図 5. 恒温槽-50deg-C 環境下での第 18 ループの温度分布

4.2. 瞬間最大過熱度

実際の実験データは 1s ごとにデータを測定しており、瞬間的に検出器の要求を超えてしまうことも熱ノイズの原因となってしまうため、問題となる。そのため、図に各温度環境下でのリザーバ制御飽和温度と最大過熱部温度との関係を示した。

図 6 より、環境温度-50℃以下にて HFC410A は瞬間的に検出器の要求を超えてしまう温度上昇を起こすことがある。しかし、HFC23 では瞬間的にも検出器の要求温度を上回る温度上昇は観測されなかった。さらに、低温環境になるにつれ、HFC410A では過熱度が大きくなってしまふこと、HFC410A よりも HFC23 の方が、過熱度が小さいことが見て取れる。

作動流体による過熱度の違いは物性値によるものだと考えられる。特に、表面張力係数が大きくなることで過

熱度が大きくなると考えられる⁹⁾。HFC410Aの方がHFC23よりも表面張力係数が高く、さらにどちらの作動流体でも低温になる程高くなるため、低温ほど過熱度が大きくなると考えられる。

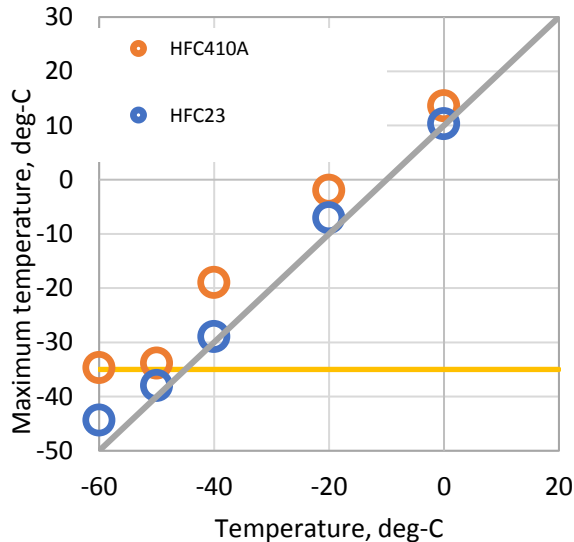


図 6. 各温度環境下での最高温度

5. 結論・展望

検出器の冷却要求を満たすため、独自のヒートパイプを構成し、作動流体にはHFC410Aを用いて実験を行ってきた。しかし、相変化の際の過熱の影響で検出器の要求を満たすことができない場合があり、昨年までの課題となっていた。そのため、低温環境においてHFC410Aより過熱度が低いと予想されるHFC23に変更したところ、低温環境下における過熱の低減から検出器の要求を満たすことができた。これは、表面張力係数がHFC410AよりもHFC23の方が低いことが要因だと考えられる。これより、検出器の基本的な冷却要求を満たすことができた。現在、その確実性を高めるため、配管流路内部に細いピンなどの構造物を配置することで過熱度に与える効果の実験や、数値流体力学(CFD)による過熱発生メカニズム解明など、実験と数値計算の両面から開発を進めている。¹⁰⁾¹¹⁾今後さらに実用化に向けたシステム設計も進めていく。

謝辞

本研究の一部は科研費(JP22340073、JP26707015、JP17H01136)、ISAS 理学委員会経費、JAXA 小規模計画経費を受けて実施しました。

参考文献

- 1) H. Fuke et al.: The Physical Society of Japan (JPS) Conference Proceedings of 12th International Conference on Low Energy Antiproton Physics (LEAP2016) (in press).
- 2) H. Fuke et al.: Transactions of JSASS (The Japan Society for Aeronautical and Space Sciences), Aerospace Technology Japan 14 (2016) No. ists30 Pi17-Pi26.
- 3) 岡崎峻 他:宇宙科学シンポジウム(第17回) P-032.
- 4) 福家英之 他:大気球シンポジウム(平成27年度) isas15-sbs-045.
- 5) 岡崎峻 他:大気球シンポジウム(平成25年度) isas-13-sbs-003.
- 6) 岡崎峻 他:大気球シンポジウム(平成24年度) isas-12-sbs-019.
- 7) 岡崎峻 他:第60回宇宙科学技術連合講演会(2016年) 2K03.
- 8) 日本熱物性学会編, 新編 熱物性ハンドブック,
- 9) NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP): Version9.1, <http://www.nist.gov/srd/nist23.cfm>
- 10) 高橋克征 他:日本太陽エネルギー学会,(平成29年度)P8.
- 11) 高橋俊 他:第49回流体力学講演会/第35回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2B08.