

自励振動ヒートパイプを用いた GAPS 測定器冷却機構の開発

○岡崎峻¹, 福家英之¹, 宮崎芳郎², 大久保卓磨², 河合宏紀², 小川博之¹

1 宇宙航空研究開発機構, 2 福井工業大学

1. 目的および背景

GAPS は 2015 年度頃以降に南極での気球実験を計画しており, 宇宙線中の反粒子の高感度探査を通じて未知の宇宙物理過程を探る事を主目的としている [1]. 気球実験にて搭載機器は希薄残存気体のある高度 35[km]の特殊な熱環境に曝される. また, 宇宙機と異なり重力の影響があるため, 気球特有の環境に適した冷却システムの構築が必要である. GAPS の熱設計の挑戦的な課題は, Si(Li)検出器の内部発熱が低密度で広範囲に分布していること, 観測の要求から検出器を-35[°C]以下に保つ必要があること, 使用できる電力や重量が限られていることである. 冷却システムの構成は, 検出器の発熱を低温のラジエーターパネルまで輸送し, 宇宙空間へ輻射放熱することを計画している. 現在, 観測とシステムの要求を満たす熱輸送デバイスとして有力視しているのは自励振動型ヒートパイプ(Oscillating Heat Pipe, OHP)^[2]である. GAPS では熱輸送を U 字型, 2m 級, 低温の条件で熱制御デバイスが要求される性能を満たさなければならない. しかし, これらの条件において OHP の動作を確認した経験は無い^[3]. そこで, 南極でのフライト(bGAPS)に向けた予備実験である, 大樹町での気球実験(pGAPS)で OHP のスケールモデルを搭載して性能を評価する予定である. 本報告では pGAPS-OHP の設計と地上試験結果を報告する.

2. 冷却システムの構成検討

bGAPS の冷却システムとして考えている Si(Li)検出器の構成と全体の概念図を図 1 に示す. 検出器は 3 セルを 1 組として冷却配管に接続される. 冷却配管と検出器の支持構造体とを兼ねて検出器空間内の物質量を抑制するために, 冷却配管は検出器の全 13 層を貫くように鉛直 (即ち重力方向) に設置する. ここで, 冷却配管 1 本は 13 層×3 セル×0.2[W]で 7.8[W]の入熱がある. 各セルの発熱は 0.2[W]と低発熱であるが, 冷却配管は 100 本以上になるため, 全体では 800[W]と大量の発熱がある. 各セルは冷却配管に熱結合され, ラジエーターに検出器の発熱を輸送する事で検出器の冷却を行う. ラジエーターの冷却は輻射によ

って宇宙空間へ排熱することで行う. ここで, 使用する最適な熱輸送デバイスを選択するためにトレードオフを検討した結果を表 1 に示す. GAPS で求められる熱輸送デバイスへの要求は, 検出器空間内の物質量抑制のために, 検出器内とラジエーター内での鉛直配管とそれらを繋ぐ水平配管からなる U 字型の冷却配管構成, 低発熱密度・大量の熱を輸送できること, 配管を細く出来ること, 電力消費量を抑えられることである. また, ラジエーターの冷却能力に限界があるため, 検出器の温度要求を満たすためには冷却配管とラジエーターの温度差を 10[°C]以下にする事が必要である. 表 1 から, OHP は bGAPS の冷却システムを構築するのに有効な熱輸送デバイスであると考えられる.

ここで, OHP とは加熱部と冷却部の間を数十往復する細管で構成され, 細管の中には作動流体が封入された熱制御デバイスである. 作動流体が, 加熱部での蒸発と放熱部での凝縮に伴い自励振動を生じ, この自励振動によって作動流体の移動が起きる. この, 移動する作動流体の潜熱と顕熱により加熱部から放熱部に熱が輸送される. OHP は基本的には細管のみから構成され製作が比較的容易である.

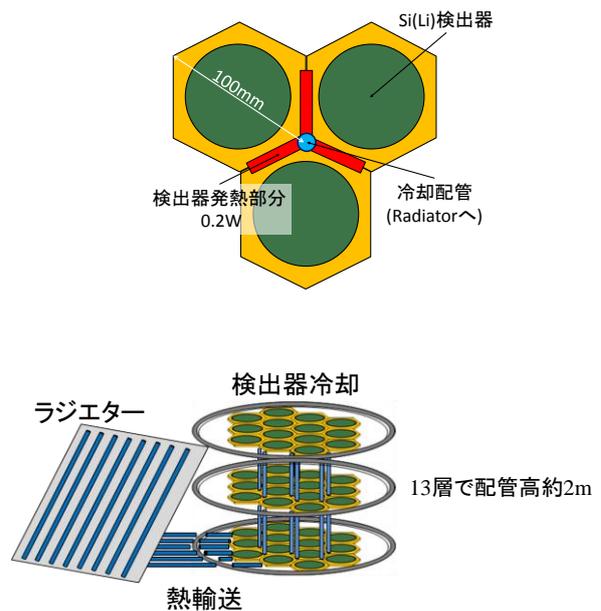


図 1 GAPS 冷却システムの構成概念図

表 1 熱輸送デバイスのトレードオフ

熱輸送方法	重力耐性	低発熱密度・広範囲	細い配管	電力	評価
HP	×	◎	○	◎	×
LHP	○	×	○	◎	×
ポンプ	○	○	△	×	△
OHP	○	○	◎	◎	○

HP : Heat pipe, LHP : Loop Heat Pipe

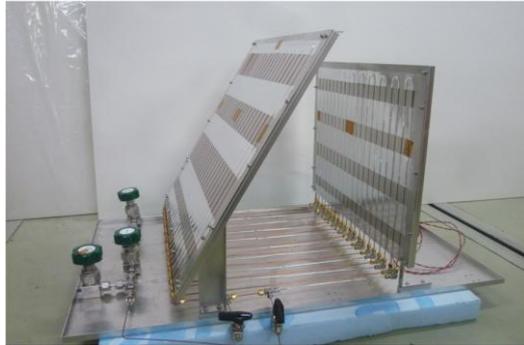


図 2 pGAPS-OHP 単体での写真。塗料は塗布していない。

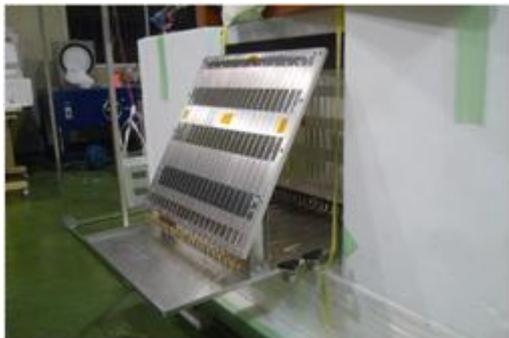


図 3 pGAPS-OHP をゴンドラに仮搭載した時の写真。塗装はまだ塗布していない。

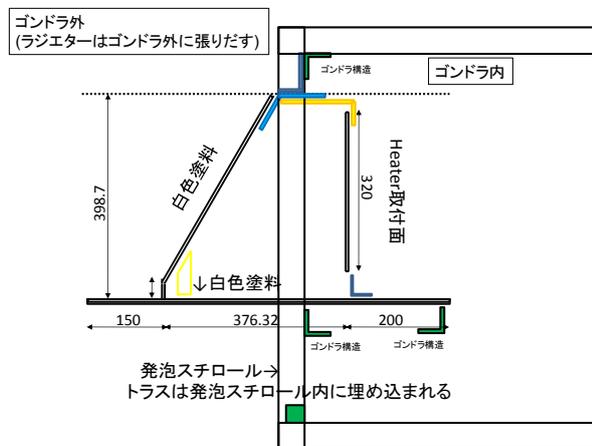


図 4 pGAPS-OHP の構成

3. pGAPS に搭載する OHP の構成

pGAPS に搭載する OHP(pGAPS-OHP)の外観写真を図 2, ゴンドラに仮搭載した写真を図 3 に示す. pGAPS では bGAPS で使用する OHP のスケールモデルとして U 字型の pGAPS-OHP を搭載する. pGAPS-OHP は pGAPS の他の機器とは熱的に独立とし, OHP 単体で動作させる. 作動流体は低温での特性評価を試作モデルで行った結果と, 取り扱い性を考慮し R-410A を使用する事とした. 垂直に立っている面には機器発熱を模擬する為のヒーターを取り付けた. ヒーター発熱量は電源 (電池) の重量の制約から, bGAPS の発熱密度を模擬する事とし, 約 10[W], 20[W]の発熱を模擬できるようにしている. 側面からのラジエーター外観図と熱制御材の構成を図 4 に示す. 斜めに傾いている面はラジエーターで, 宇宙空間との輻射熱結合を高めるために高 ϵ を有する塗料の塗布を行う. また, 姿勢喪失時にラジエーターに太陽光が入射し, ラジエーターの急激な温度上昇による検出器や OHP の破損を極力防ぐために, 放熱面には白色塗料を用いる事を検討している. ラジエーターは 20[W]の発熱に対して 230[K]まで冷却できるように設計している. 地球の影響のみを考慮した場合には, ラジエーターを 45[deg]に傾けるのが最適とのシミュレーション結果を得た. しかし, この計算は気球による宇宙空間への放熱視野の妨害を考慮していない. ラジエーターの宇宙空間への視野が気球によって減少することを避けるのと機器配置の制約から, ラジエーター角度はラジエーターの性能が著しく変化しない 60[deg]とした.

OHP の配管構成を図 5 に示す. OHP はターン数が少ないと動作しにくい為, OHP の動作に十分と考えられる 10 ターンで構成し, 各ターンに 1 か所ずつ受熱面側に逆止弁を設けている. また, リザーバーは電力, コマンドの制約から pGAPS のフライトでは搭載をしない. しかし, bGAPS では搭載する可能性がある為, 地上試験用にリザーバーも接続できるようにしている. pGAPS-OHP は, 10 ターンを有している為, bGAPS の冷却システム成立の要求を満たすには 78[W]以上の熱輸送が可能で, 受熱部とラジエーターの温度差が 10[°C]以下である必要がある.

4. OHP 地上実験

大気圧下の恒温槽中にて pGAPS-OHP の動作試験を行った. OHP 表面に取り付けた熱電対により, OHP 配管外表面の温度を計測する事で, OHP の性能を評価した. 熱電対の取り付け位置を図 5 に赤丸で示す.

受熱面はスタイロフォームを用いて板を挟み込むことで断熱を行った。①実験は最大熱輸送量を評価する実験と、②フライトを模擬した低温での実験の2パターンを行った。

4.1. 最大熱輸送量実験結果

最大熱輸送量の実験では、OHP にリザーバーを接続して行った。リザーバーには温調用のヒーターを取付け、リザーバー温度を約 50[°C]に制御した。恒温槽は 20[°C]で一定とした。熱負荷は 20[W], 50[W], 70[W], 80[W], 100[W], 110[W]と変化させた。

最大熱輸送量の実験を行った各、受熱部、ラジエターの平均温度、受熱部とラジエターの温度差、受熱部とラジエターのコンダクタンスを求めた結果を図 6 に示す。熱負荷を与えない状態から 10[W]の熱負荷を与えると、受熱部の温度は 40[°C]程度まで上昇した後に、35[°C]に収束した。熱負荷を増加させると、ラジエター部の温度は徐々に上昇し、30[°C]に近づいている。また、受熱部の温度は約 35[°C]で一定である。110[W]の熱負荷において受熱部の温度が急激に上昇している。図 6 より、熱負荷を増加させると、コンダクタンスが増加しているのがわかる。これはリザーバーを一定温度に保った事で、内部の圧力がほぼ一定に制御され、可変コンダクタンス OHP として動作したためと考えられる^[4]。110[W]の熱負荷を受熱部に加えるとコンダクタンスが急激に落ち、受熱部の温度も急上昇していることから OHP がドライアウトを起こしていると考えられる。よって、pGAPS-OHP の最大熱輸送量は約 100[W]であると考えられる。また、受熱部とラジエターの温度差も 70[W]以上の熱負荷では 10[°C]以下であった。これらの結果から、pGAPS-OHP は bGAPS で OHP を使用する際の性能を、恒温槽が 20[°C]の環境で満足をしている。低温環境での OHP 性能の劣化も考えられるため、今後低温での試験を行い、さらに実験的な検証を進めていく。

4.2. pGAPS フライトを模擬した実験結果

pGAPS-OHP のフライトではリザーバーを搭載しない。そこで、フライトを模擬した実験では OHP にリザーバーを接続した状態で、受熱部に 20[W]の熱負荷を加えて OHP を動作させた後に、バルブを用いてリザーバーを切り離した。熱負荷を 20[W]としたのはフライトでの最大熱負荷であるためと、恒温層中の対流で放熱を行うラジエターを約-40[°C]に保つためである。冷却する際にリザーバーを切り離した後は、熱負荷を 20[W]で一定とし、恒温層の温度を 20[°C]から-40[°C]まで 10[°C]ずつ段階的に下げた。バ

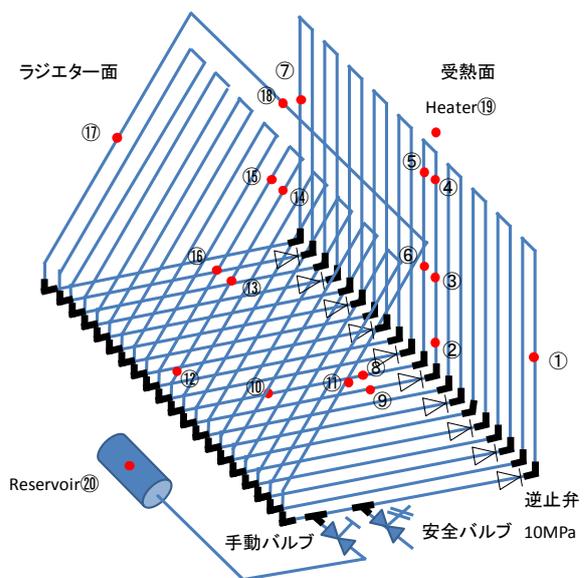


図 5 pGAPS に搭載する OHP 配管図

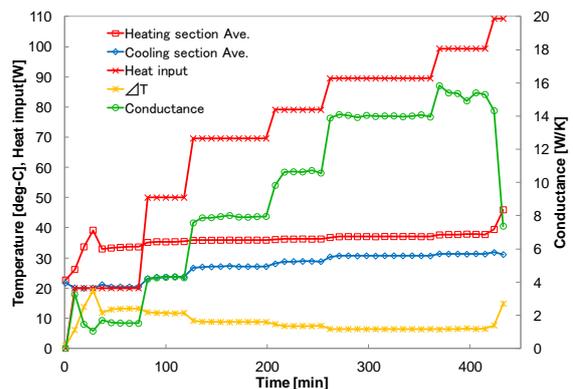


図 6 リザーバー付き pGAPS-OHP コンダクタンス

ルブを閉じてリザーバーを分離した前後の結果を図 7 に示す。図 7 より、OHP とリザーバーを実験開始から 65[min]で切り離しが、受熱部、ラジエター部の温度に大きな差は見られなかった。よって、OHP は定常状態の動作中にリザーバーを切り離しても性能に大きな変化はないと考えられる。

pGAPS でのフライトを模擬した実験を行った結果を図 8 に示す。図 8 は、受熱部、ラジエターの平均温度、受熱部とラジエターの温度差、受熱部とラジエターのコンダクタンスを求めた結果である。恒温槽の温度を 10[°C]ずつ徐々に下げていくと、高温槽が-40[°C]になるまでの各恒温槽内温度で受熱面と放熱面の温度差は 5[°C]以下である。また、低温になると受熱面とラジエターの温度差は大きくなっている。コンダクタンスは 0[°C]付近では 14[W/K]であったが、

徐々に低下し-40[°C]では6[W/K]であった。この結果より、各恒温槽内の温度で受熱部とラジエターの温度差が約5[°C]で定常状態に達していることから、pGAPS-OHPは正常に動作していると考えられる。また、R410Aは低温においてOHPに使用できる作動流体であることがわかった。低温になるにつれてコンダクタンスが低下したのは、OHPの作動流体の量と蒸気圧の影響と考えられる。リザーバーを切り離れた温度は20[°C]であったため、作動流体の量は20[°C]で動作するOHPに最適な量となっている可能性がある。よって、低温での動作中にOHPとリザーバーを切り離すことで、低温でもOHPを実現できると考えられる。また、低温では作動流体の蒸気圧が低いためコンダクタンスが減少したと考えられる。

上記の実験結果より、R410Aを作動流体に用いたpGAPS-OHPが20[°C]から-40[°C]の周囲温度で動作可能であることを確かめ、地上と-35[km]の温度環境でpGAPS-OHPが動作することを確認した。また、受熱面とラジエターは-40[°C]から-35[°C]であり、R410Aは低温で動作するOHPに使用できる冷媒である事も確かめられた。

5. 結論

pGAPSに搭載するための、逆止弁を有したU字型のpGAPS-OHPを設計・製作した。今まで経験の無い特殊な形状であるU字型OHPに低温で動作させるための作動流体としてR410Aを初めて使用し、低温でのOHPの動作を確認する事ができた。また、常温において最大熱輸送量の実験を行い、リザーバー付きU字型OHPがbGAPS冷却システムを満たす性能を有している事がわかった。さらに、リザーバーを切り離してもOHPはその性能を維持できる事を確認した。pGAPSで計画される20[W]の熱負荷に対して、常温から約-40[°C]の温度領域でリザーバー無しのOHPの動作を確認した。よってpGAPS-OHPフライト実験において、OHPを地上で動作確認し、さらに上空35[km]でも動作可能であることを確認した。

今後は、低温での封入量の最適化、実際のフライトを模擬して-60[°C]～-70[°C]まで周囲温度を冷却した際の動作確認、真空恒温槽を用いてpGAPS-OHPが真空中でも正常に動作する事を確認していく。

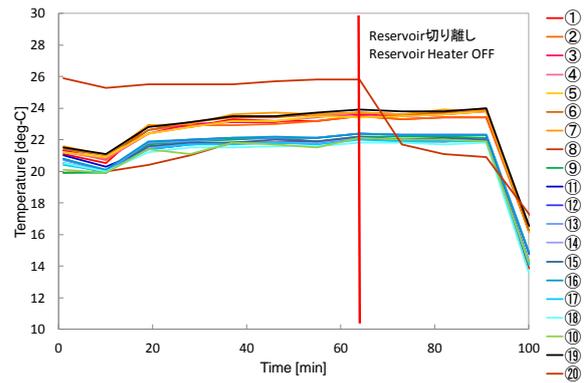


図7 リザーバー分離時のOHP挙動

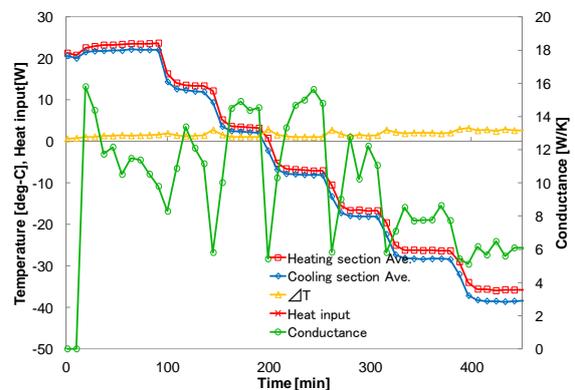


図8 pGAPSでのフライトを模擬した実験結果

参考文献

- 1) 福家英之 他, "GAPS プロトタイプ気球実験計画の全体報告", 本シンポジウム抄録.
- 2) H.Akachi, F.Polasek, and P.Stulc, "Pulsating Heat Pipes", Proc. 5th IHPS, pp.208-217, Nov. 1996
- 3) Yuwen Zhang, Amir Faghri, "Advances and Unsolved Issues in Pulsating Heat Pipes" ,Heat Transfer Engineering, 29(1):20-44, 2008
- 4) 岩田直子, 小川博之, 宮崎芳郎, "温度制御可能な自励振動ヒートパイプの実験的研究" ,Thermal Science & Engineering, Vol. 18 No.4, 2010