

気球搭載型GAPS測定器の冷却機構の開発

○岡崎峻 (JAXA/ISAS), 宮崎芳郎 (福井工大), 小川博之 (JAXA/ISAS), 福家英之 (JAXA/ISAS)

概要

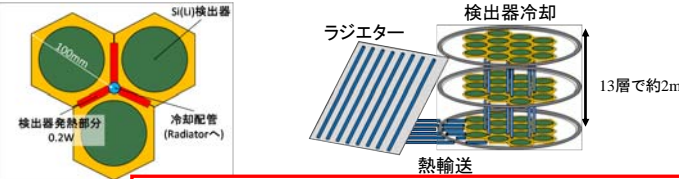
GAPSは2014年度以降に南極での気球実験を計画しており、宇宙線中の反粒子の高感度探索を通じて未知の宇宙物理過程を探る事を主目的としている。GAPSの熱設計で問題になるのは、Si(Li)検出器の内部発熱が低密度で広範囲に分布し、観測の要求から約-35℃以下に保つ必要がある点である。気球実験にて搭載機器は希薄気体のある高度35kmの特殊な熱環境に曝される。また、軌道上と異なり重力の影響があるため、気球特有の環境に適した冷却システムの構築が必要である。冷却システムの構成は、検出器の発熱を低温放熱パネルまで輸送し、輻射放熱することを計画している。現在、観測とシステムの要求を満たす熱輸送デバイスとして有力視しているのは自動振動型ヒートパイプ(OHP)である。並行して、動作の確実性から小型ポンプを使用した熱輸送についても検討し、2案同時に検討を行っている。さらに、熱輸送配管と検出器の結合方法や低温放熱パネルについても検討を進めている。

GAPS冷却システム構成と気球フライト環境

システムの構成案

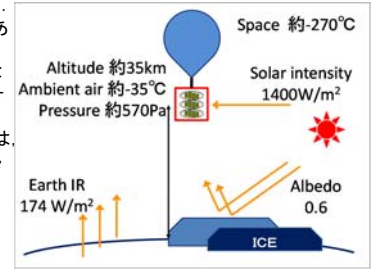
GAPSで使用される検出器の発熱は低密度で、広範囲にわたっているため、検出器冷却の方法に工夫が必要である。検出器1個当たり0.2Wの内部発熱がある。検出器はAlフレームとSiウエハにより構成され、厚さは2mm。検出器を400個敷き詰めたものを1層とし、15cm間隔で13層重ねたものである。よって、検出器全体の高さは約2m。検出器冷却に必要な配管全長は約600mになる。また、観測の要求からラジエーターは検出器の上方(宇宙線飛来方向)には配置できない。放熱・検出器の冷却に使用できる電力は100W~200Wであり、限られたリソース内でシステムを成立させる必要がある。

現在は、下図に示すような、検出器3個を1セット(0.2W×3=0.6W)として冷却配管に繋ぎ、検出器の側面に施したラジエーターで検出器発熱800Wを放熱し検出器を冷却をする構成を考えている。



検出器が曝される環境

気球は高度35km付近まで上昇し、搭載される機器は希薄気体の存在する特殊な環境に曝される。気球実験においては重力や希薄気体の影響があるため気球実験に特化した設計が必要になる。例えば、ヒートパイプ(HP)や多層断熱材(MLI)などは重力や希薄気体の影響により宇宙機の設計時と同様に扱う事は出来ない。しかし、希薄気体の対流や輻射の影響に関しては、詳細に知られていない。そこで、現在は詳細な熱設計のために過去のフライトデータ等の整理によって理解を深めている。また、GAPSは南極にて気球実験を行うためアルベドの値が約0.6と高くなる。観測が行われる環境を右図に示す。



検出器冷却の検討において問題となる事項

GAPS特有 : ラジエーターの位置 熱輸送に細い配管 発熱密度が低く、広範囲
南極気球実験特有 : 希薄気体の対流 低真空 重力の影響 常時日照 高アルベド

熱輸送方法の検討

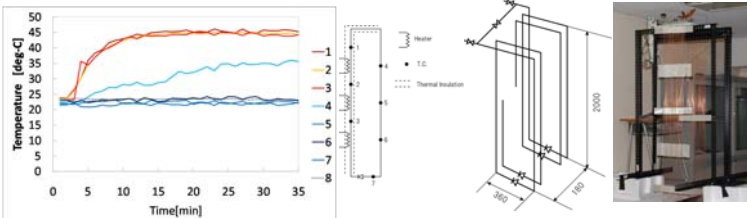
観測機器の要求から、検出器を冷却するための配管はなるべく細くしなければならない。さらに、重力のある条件下で、低発熱で広範囲に渡る機器発熱を検出器部から下方に配置された放熱面に熱を輸送する必要がある。トレードオフの結果を右の表に示す。

現在は、OHPとポンプを用いて流体を循環させる二つの案について並行して検討を行っている。

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

OHP(Oscillating Heat Pipe)

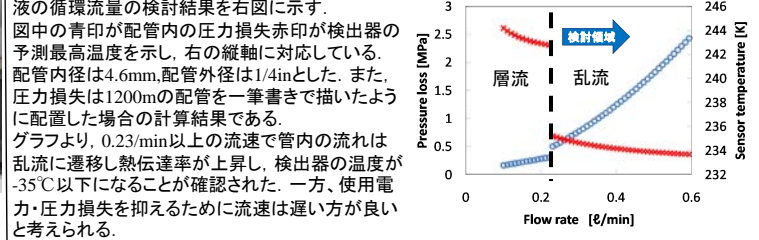
放熱面が受熱部より下方に配置されるため、通常のヒートパイプは使用できない。そこで、前述のシステム上の制約でも熱輸送が可能と考えられるOHPの使用を検討している。OHPの利点は①重力耐性がある②低熱負荷でも熱輸送可能③細い配管が可能④動作に電力を必要としないことでありGAPSに最適であると考えられる。しかし、2mの高さを有した長いループのOHPの動作は今までに経験がない。そこで、実験による検証を行った。以下に、実験結果を示す。



本実験のOHPに使用されている作動流体はR134-a。機器の発熱はヒーターにより模擬をした。実験結果より、GAPSで計画している2mのOHPが動作し、熱輸送が可能であることが示された。今後は、作動流体の選定、低温での動作について検討・実験を行っていきたく考えている。

単相流体ループ

OHPと比べ技術的に容易な、ポンプを用いて冷却水を循環させる方法を並行して検討している。しかし、ポンプを循環させる電力が必要になるデメリットがある。また、ポンプも低温・低圧の環境に耐える物でないといけない。配管の構成については、①一筆書きのように配管を構成する②検出器の上部にpoolを設けて重力によって落とす方法の2案の検討を行っている。①案②案共に、エアロックに対する対策や流体を均一に流す方法など、それぞれ解決しなければならない個別の問題がある。今後それらの検討を進めていく。

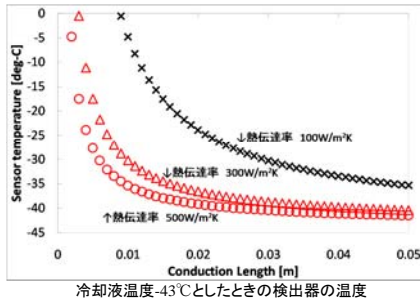


液の循環流量の検討結果を右図に示す。図中の青印が配管内の圧力損失赤印が検出器の予測最高温度を示し、右の縦軸に対応している。配管内径は4.6mm、配管外径は1/4inとした。また、圧力損失は1200mの配管を一筆書きで描いたように配置した場合の計算結果である。グラフより、0.23/min以上の流速で管内の流れは乱流に遷移し熱伝達率が上昇し、検出器の温度が-35℃以下になることが確認された。一方、使用電力・圧力損失を抑えるために流速は遅い方が良く考えられる。現在は流量0.23/min以上の領域で、吐出圧力が高く、低温・低圧下でも動作可能なポンプを選定中である。

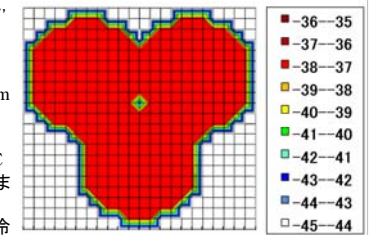
最適な流速の検討(管内径4.6mm,管外径1/4in) 循環流体はR134aの使用を考えている

検出器冷却

検出器からの0.6W(0.2W×3)の熱を伝導する際に冷却配管と検出器の間に温度差が生じる。この温度差は主に①接触熱伝達率と②冷却配管と検出器発熱部分の接触面積の2点によって決まる。接触熱伝達率はファイラ等を用いる事で改善できる可能性がある。検出器冷却配管の内径3mm、管外径5mmのときの配管に接触している部分の検出器の温度を右のグラフに示す。検討結果より、接触熱伝達率は300W/m²K以上、接触長さとは0.03m以上にする必要がある事がわかった。今後は、接触熱伝達率、接触長さの改善について実験的に検証を行っていく。

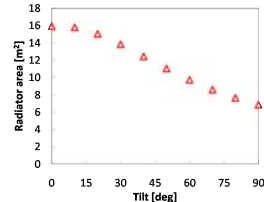


3個の検出器を冷却配管に結合し、検出器温度を約-35℃以下にするのと同時に、内部の温度分布を1~2℃以内に抑える必要がある。左の検討結果より冷却配管と検出器の接触熱伝達率300W/m²K、接触長さ0.03mの場合に検出器の温度分布の計算を行った。計算結果より、検出器の温度分布は1℃以内であり、観測要求に収まっている。また、冷却液をラジエーターで十分に冷却出来れば観測要求の-35℃まで検出器の冷却が可能であるとの見込みを得ている。



ラジエーター

右図にラジエーターの角度依存性について検討を行った結果を示す。上方に気球がある事、地球からのアルベドの影響を考慮すると、ラジエーターが水平に配置される事は望ましくない。そこで、ラジエーターを220Kに冷却するためのラジエーター面積と角度の関係について検討した結果を右に示す。結果から、90deg(地表面に対して垂直)が最小面積になる事がわかる。しかし、この検討はラジエーター上面(宇宙側)への地球からの赤外放射やアルベドの影響を考慮していない。ラジエーターの水平面からの角度が大きくなると、ラジエーター上面(宇宙側)の影響を受けると考えられる。今後は、ラジエーター角の最適化するための検討を進めていく。



ラジエーターは反太陽方向に施され直接太陽光が直接入射する事はない。ラジエーターは水平面から60度傾け220Kまで冷却する事を考えて面積の計算を行った。結果より②案の構成が最適である事がわかる。

	宇宙側表面		地球側表面		放熱面の面積
	α	ε	α	ε	m²
① 白色塗料	0.19	0.89	アルミ	0.16 0.03	16.9
② 白色塗料	0.19	0.89	アルミ蒸着	0.08 0.02	9.74
③ Agテフロン	0.08	0.75	アルミ蒸着	0.08 0.02	12.6