

基盤 S 近赤外カメラ試験

クライオスタット冷却試験 (1)

本原顕太郎、三谷夏子

平成 18 年 6 月 9 日

1 冷却試験の概要

基盤 S カメラ用デュワーにダイキンのコールドヘッドが取り付けられたので、冷却試験を行った。

1.1 セットアップ

1.1.1 温度計

100Ω の白金抵抗を銅の薄板で挟み込み、コールドヘッド及びにワークサーフェスにネジ止することによって取りつけた。

1.1.2 冷凍機コールドヘッド

冷凍機はダイキンのシングルステージの V102C5L。(5W?)

コールドヘッドとワークサーフェス間の熱接続は、銅の編線を治具で圧着することによって行った。

1.1.3 真空度測定

真空ゲージは、ターボポンプの出口、及びにクライオスタットのバルブ付近の 2 個所に取りつけた。

1.1.4 Radiation Shield

コールドヘッドが入っている側の Radiation Shield は取り付けずに冷却を行っている。

1.2 サイクル 1

コールドヘッドとワークサーフェスを結ぶ編線の長さは約 50cm で冷却した。

圧力温度変化は図 1 のようになった。35 時間 (冷却開始後 20 時間) ほど経過してもワークサーフェスは 200K 程で、コールドヘッドとの間に 150K 近い温度勾配がついてしまっているのがわかる。おそらくは編線が長すぎ、熱抵抗が大きすぎるために冷えていないものと思われ、この時点で冷却を停止して暖めることにした。

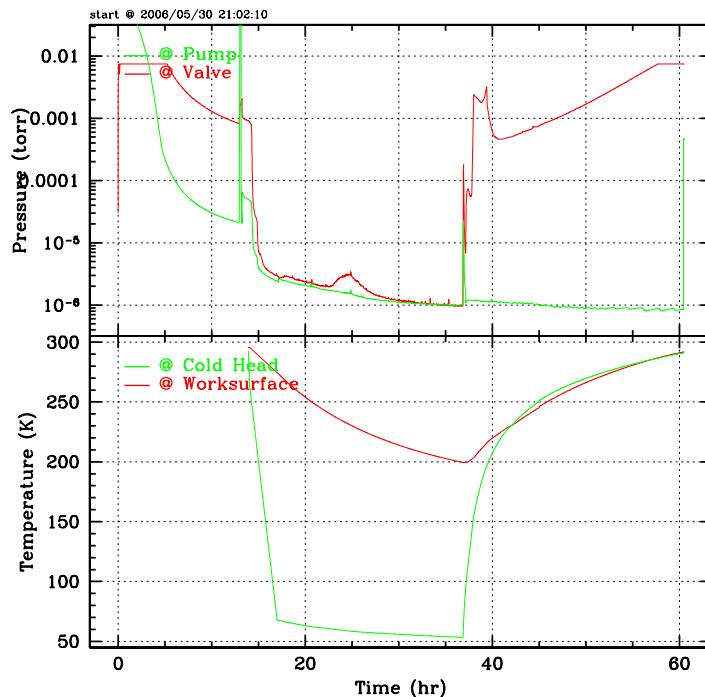


図 1: 1 回目の冷却試験の温度と圧力変化。

- 22 時間あたりで一度クライオスタットのバルブを閉じ、真空ポンプとの接続を切ったところ真空度が悪化したために 25 時間あたりで再度バルブを開いた。
- 暖める際には真空ポンプとの接続は切り、あえて真空度が悪くなるようにしている。

1.3 サイクル 2

コールドヘッドとワークサーフェス間の編線を 20cm 程度にして再度冷却した。
圧力温度変化は図 2 のようになった。

- 定常状態になるまでにおよそ 50 時間かった
- 定常時の温度はコールドヘッドが 60K、ワークサーフェスが 100K 程度。
- 50 時間目あたりからコールドヘッドの温度に微細ではあるが周期的な変化が見られる (図 3)。これは一回目の冷却の際には見られなかったものである。

He ガスに何らかのコンタミがあるのか？ 今後の挙動に注意する必要がある。

- 暖めは真空ポンプで引きながら行った。何度かピークが見えているが、おそらくはアウトガスであろう。

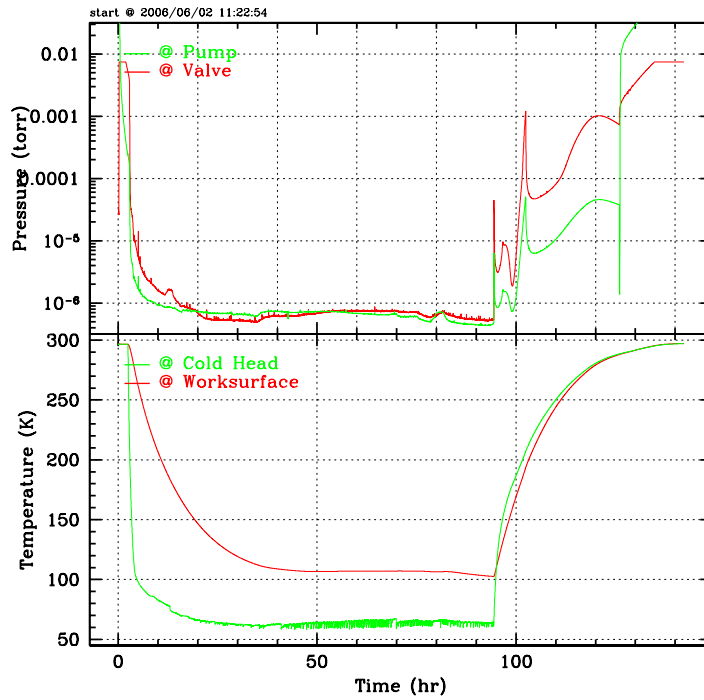


図 2: 2 回目の冷却試験の温度と圧力変化。

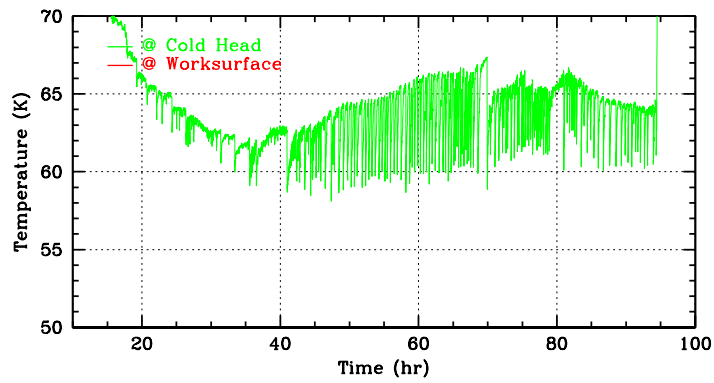


図 3: コールドヘッド温度の挙動

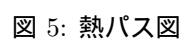
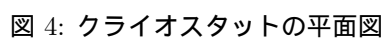
2 熱計算

2.1 熱流入

クライオスタットは図 4 のようになっている。
 主な熱パスは以下が考えられる。これらは図 5 に掲げた。

- $\dot{Q}_{\text{Rad1}}$: デュワー窓からワークサーフェスへの輻射流入
- $\dot{Q}_{\text{Rad2}}$: デュワー壁からワークサーフェスへの輻射流入
- $\dot{Q}_{\text{Cond1}}$: ワークサーフェスからコールドヘッドへの銅編線による熱流入

- 以下、計算条件。



- 今回の冷却ではコールドヘッド側の radiation shield の板は取りつけていない。しかしながら計算を簡単にするためにとりあえずはそれがあるものとして考える。そんなに悪い近似ではないはず。

デュワー外壁の内寸は $260 \times 260 \times 240$ (mm)、radiation shield の外寸が $214 \times 214 \times 187$ (mm) なので、輻射計算の際の面積はこの平均をとって用いる。

- デュワー窓 ($40\text{mm}\phi$) は 300K で光っていて、入射はすべて吸収されるとする。
- 温度計の導線による熱流入は、温度計あたり直径 $0.16\text{mm} \times 7$ 本の鍍銅線が二本あるとして計算する。鍍導線の長さは 30cm とする。
- ワークサーフェスとコールドヘッドを結ぶ編線の断面積 $A = 3.3 \times 10^{-5}(\text{m}^2)$ は、編線の重量と長さ、それに銅の密度 $\rho = 9 \times 10^3(\text{kg}/\text{m}^3)$ から算出した。

2.2 計算式

2.2.1 輻射

温度 T_1 と T_2 の向かい合う平行平面間での輻射による熱輸送は

$$\dot{Q}_{\text{Rad}} = \sigma A (T_2^4 - T_1^4) \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_1 \epsilon_2} \quad (1)$$

と書ける (「低温技術 [第 2 版]」)。ここで σ はボルツマン定数、 A は表面積、 ϵ_1, ϵ_2 はそれぞれの面の放射率。今回使っているアルミ合金面の放射率は $0.048 \sim 0.052$ 程度のものである (「低温工学概論」)。

2.2.2 熱伝導

温度 T_2 から T_1 への伝導による熱流は

$$\dot{Q}_{\text{Cond}} = \frac{A}{L} \int_{T_1}^{T_2} k(T) dT \quad (2)$$

と書ける (「低温技術 [第 2 版]」)。ここで A 、 L は物体の断面積と長さ。また、 $\int_{T_1}^{T_2} k(T) dT$ は熱伝導率 $k(T)$ の積分値で、電解銅の場合は以下ようになる。

T_2	T_1	$\int_{T_1}^{T_2} k(T) dT$ (W/m)
300	100	8.18×10^4
300	60	1.033×10^5
100	60	2.15×10^4
300	150	6.02×10^4
300	50	1.123×10^5
150	50	5.21×10^4

2.3 計算結果

2.3.1 サイクル 2

以下のパラメータを用いた。

- コールドヘッドとワークサーフェス間の銅編線の長さ=0.2m
- 外気温 $T_1 = 300K$
- 定常状態の際のワークサーフェス温度 $T_2 = 100K$
- 定常状態の際のコールドヘッド温度 $T_3 = 60K$
- デュワー窓、radiation shield の emissivity = 0.05

結果は以下の通り。

item	$\dot{Q}$ (W)
ワークサーフェスへの流入熱量	
$\dot{Q}_{\text{Rad1}}$: デュワー窓からの輻射	0.573
$\dot{Q}_{\text{Rad2}}$: デュワー壁からの輻射	2.94
$\dot{Q}_{\text{Cond2}}$: 温度計導線	0.0768
合計	3.59
ワークサーフェスからの流出熱量	
$\dot{Q}_{\text{Cond1}}$: コールドヘッドへの編線	3.55
合計	3.55
コールドヘッドの流入熱量	
$\dot{Q}_{\text{Cond1}}$: ワークサーフェスからの編線	3.5475
$\dot{Q}_{\text{Cond3}}$: 温度計銅線	0.0966
合計	3.64

ワークサーフェスの熱収支は大体あっている。ただ、これ以上の熱源 (モータの待機電流や検出器のファンアウトボードなど) が入ると、結構厳しくなってくるかもしれない。

2.3.2 サイクル 1

サイクル 1 が、あのまま冷やしつづけると何度になっていたのか? を概算する。計算条件は以下。

- コールドヘッドとワークサーフェス間の銅編線の長さ=0.5m
- 外気温 $T_1 = 300K$
- 定常状態の際のワークサーフェス温度 $T_2 =$ 不定
- 定常状態の際のコールドヘッド温度 $T_3 = 50K$
- デュワー壁、radiation shield の emissivity = 0.05

いくつか温度を動かしたところ、 $T_2 = 150K$ で収支がほぼバランスした。

item	$\dot{Q}$ (W)
ワークサーフェスへの流入熱量	
$\dot{Q}_{\text{Rad1}}$: デュワー窓からの輻射	0.543
$\dot{Q}_{\text{Rad2}}$: デュワー壁からの輻射	2.79
$\dot{Q}_{\text{Cond2}}$: 温度計導線	0.056
合計	3.39
ワークサーフェスからの流出熱量	
$\dot{Q}_{\text{Cond1}}$: コールドヘッドへの編線	3.44
合計	3.44
コールドヘッドの流入熱量	
$\dot{Q}_{\text{Cond1}}$: ワークサーフェスからの編線	3.44
$\dot{Q}_{\text{Cond3}}$: 温度計銅線	0.105
合計	3.55