

Inner Shield、懸架系の冷却時間

理学系研究科物理学専攻 修士2年 35-106033 榊原裕介

2011年8月31日

1 Inner Shield の冷却

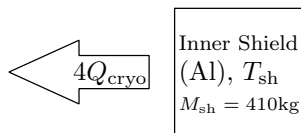


図 1: Inner Shield の冷却

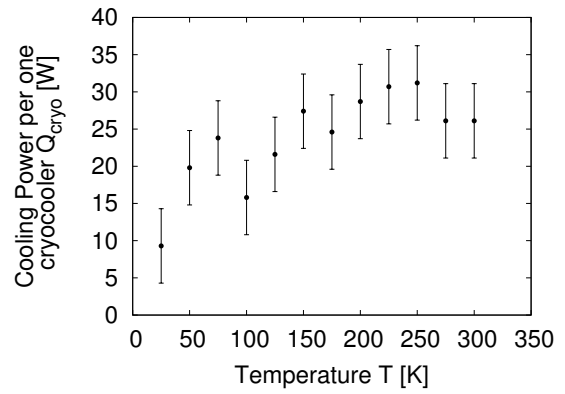


図 2: 冷凍機の冷却能力 Q_{cryo}

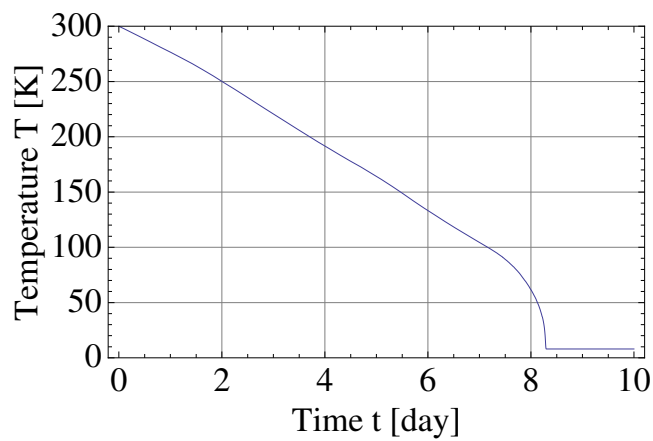


図 3: 温度変化

図1において質量 $M_{sh} = 410 \text{ kg}$ の Inner Shield を冷凍機4台で冷却したときの温度 T_{sh} の変化を考える。冷凍機の冷却能力を Q_{cryo} （ここでは LCGT 冷凍機の冷却試験結果から算出した [1] 図2 を線形補間した）とすると、解くべき方程式は

$$\frac{dT_{sh}}{dt} = -\frac{4Q_{cryo}(T_{sh})}{M_{sh}C_{Al}(T_{sh})} \quad (1)$$

である。ただし、 C_{Al} はアルミニウムの比熱であり、[2] のデータ（図7に示した）を用いた。これを解くと図3を得た。

2 Inner Shield、懸架系の冷却

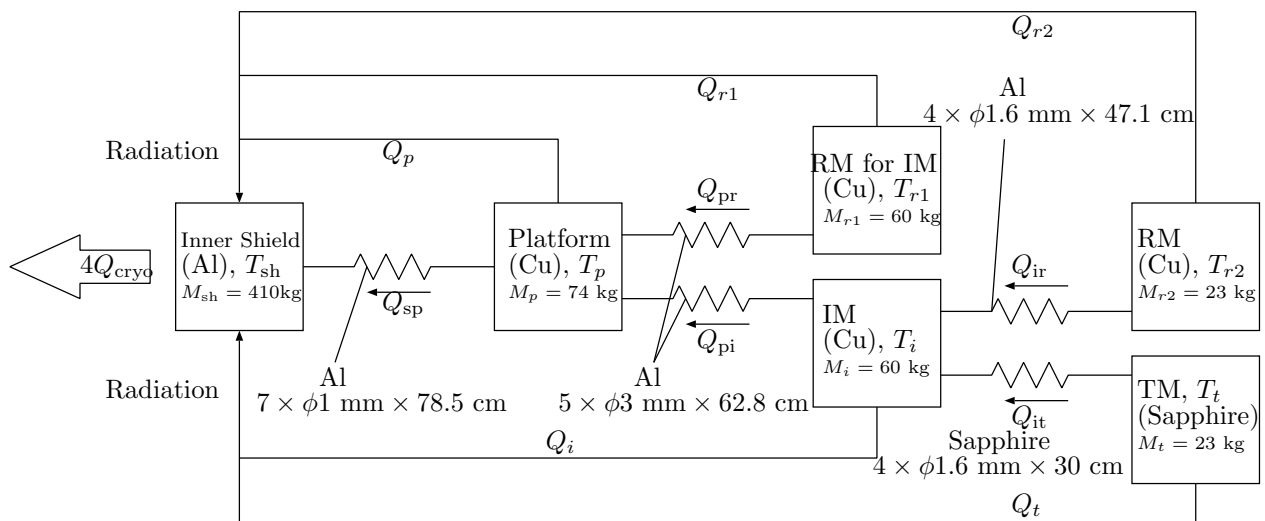


図4: 熱伝導、熱放射による冷却

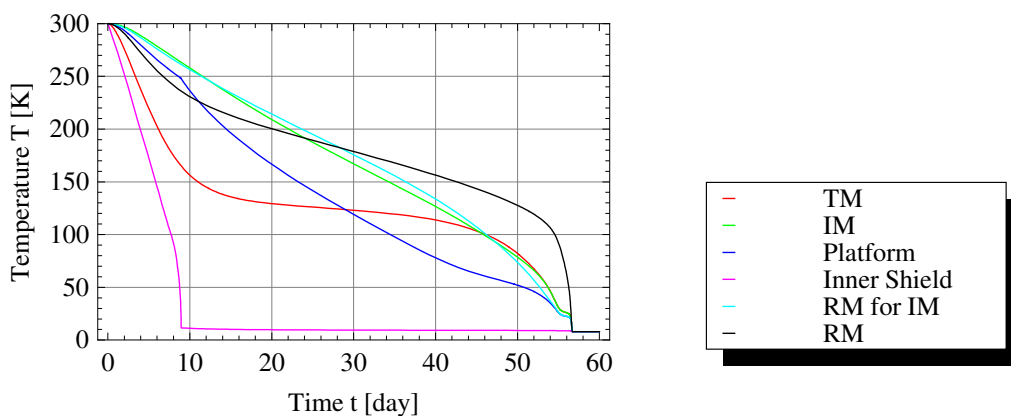


図5: 温度変化

図4のように熱伝導と、各 mass から Inner Shield への熱放射を考慮するモデルを考える。温度の時間依存を求めめるためには

$$\frac{dT_{\text{sh}}}{dt} = \frac{-4Q_{\text{cryo}}(T_{\text{sh}}) + Q_{\text{sp}}(T_{\text{sh}}, T_p) + Q_p(T_p, T_{\text{sh}}) + Q_i(T_i, T_{\text{sh}}) + Q_t(T_t, T_{\text{sh}}) + Q_{r1}(T_{r1}, T_{\text{sh}}) + Q_{r2}(T_{r2}, T_{\text{sh}})}{M_{\text{sh}}C_{\text{Al}}(T_{\text{sh}})} \quad (2)$$

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{-Q_{\text{sp}}(T_{\text{sh}}, T_p) + Q_{\text{pi}}(T_p, T_i) + Q_{\text{pr}}(T_p, T_{r1}) - Q_p(T_p, T_{\text{sh}})}{M_p C_{\text{Cu}}(T_p)} \quad (3)$$

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{-Q_{\text{pi}}(T_p, T_i) + Q_{\text{it}}(T_i, T_t) + Q_{\text{ir}}(T_i, T_{r2}) - Q_i(T_i, T_{\text{sh}})}{M_i C_{\text{Cu}}(T_i)} \quad (4)$$

$$\frac{dT_t}{dt} = \frac{-Q_{\text{it}}(T_i, T_t) - Q_t(T_t, T_{\text{sh}})}{M_t C_{\text{sap}}(T_t)} \quad (5)$$

$$\frac{dT_{r1}}{dt} = \frac{-Q_{\text{pr}}(T_p, T_{r1}) - Q_{r1}(T_{r1}, T_{\text{sh}})}{M_{r1} C_{\text{Cu}}(T_{r1})} \quad (6)$$

$$\frac{dT_{r2}}{dt} = \frac{-Q_{\text{ir}}(T_i, T_{r2}) - Q_{r2}(T_{r2}, T_{\text{sh}})}{M_{r2} C_{\text{Cu}}(T_{r2})} \quad (7)$$

を解けばよい。ただし、 C_{sap} 、 C_{Cu} はサファイア、銅の比熱であり、それぞれ [3]、[4] のデータ (図7) を線形補間したものを用いた。また、両端が温度 T_x 、 T_y のときの本数 N 、断面積 S 、長さ ℓ 、熱伝導率 κ のファイバーを伝わる熱量は

$$Q_{xy}(T_x, T_y) = \frac{NS}{\ell} \int_{T_x}^{T_y} \kappa(T') dT' \quad (8)$$

であり、サファイア、アルミニウムの熱伝導率として、それぞれ [6] (サイズ効果を考慮)、[4] (サイズ効果を無視) のデータ (図8) を線形補間したものを用いた。さらに x から Inner Shield へ放射によって伝わる熱量は

$$Q_x(T_x, T_{\text{sh}}) = \frac{A_x \sigma (T_x^4 - T_{\text{sh}}^4)}{\frac{1}{\epsilon_x(T_x)} + \frac{A_x}{A_{\text{sh}}} \left(\frac{1}{\epsilon_{\text{sh}}} - 1 \right)} \quad (9)$$

である。ただし、 ϵ_x は x の熱放射率であり、サファイア、銅の熱放射率としてそれぞれ [3]、[5] を線形補間したもの (図9) を用いた。そして、Inner Shield の熱放射率は $\epsilon_{\text{sh}} = 0.03$ (ECB 処理したアルミニウム表面を想定、[5]) とした。

また、各表面積は

$$A_{\text{sh}} = 12.0 \text{ m}^2 \quad (1.0 \text{ m} \times 1.6 \text{ m} \times 1.7 \text{ m} \text{ の直方体の表面積}) \quad (10)$$

$$A_p = 0.378 \text{ m}^2 \quad (44 \text{ cm} \times 33 \text{ cm} \times 5.7 \text{ cm} \text{ の直方体の表面積}) \quad (11)$$

$$A_i = 0.124 \text{ m}^2 \quad (31 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 11 \text{ cm} \text{ の直方体の上面、下面の面積}) \quad (12)$$

$$A_t = 0.0760 \text{ m}^2 \quad (\text{直径 } 22 \text{ cm} \text{ の円柱の底面積}) \quad (13)$$

$$A_{r1} = 0.169 \text{ m}^2 \quad (44 \text{ cm} \times 33 \text{ cm} \times 11 \text{ cm} \text{ の直方体の側面積}) \quad (14)$$

$$A_{r2} = 0.182 \text{ m}^2 \quad (\text{直径 } 29 \text{ cm}、\text{厚さ } 20 \text{ cm} \text{ の円柱の側面積}) \quad (15)$$

である。

これを解くと、Inner Shield、各 mass の温度変化として図5を得た。

3 Inner Shield、懸架系の冷却 (High emissivity coating)

熱放射による冷却効果を最大にするため、Inner Shield 内側、Platform、IM、RM、RM for IM 表面にDLC(Diamond Like Carbon) コーティング ($\epsilon = 0.41$ 、波長 $10 \mu\text{m}$ での吸収率の測定値を使用) を施したと仮定し、同様の計算を行ったところ図 6 を得た。

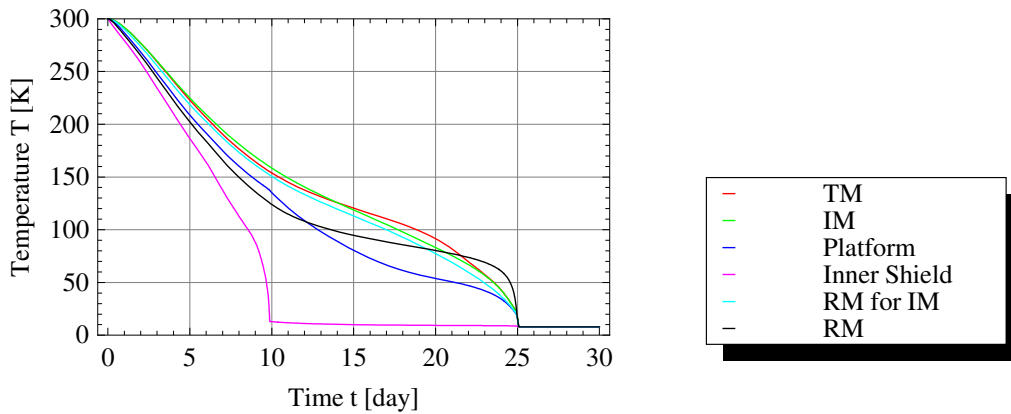


図 6: 温度変化

参考文献

- [1] 木村誠宏 : private communication (2011)
- [2] http://cryogenics.nist.gov/MPropsMAY/5083%20Aluminum/5083Aluminum_rev.htm
- [3] Y.S.Touloukian: "Thermophysical Properties of Matter Volume 5 Specific Heat Nonmetallic Solids," IFI/Plenum (1970)
- [4] 産総研熱物性データベース、NMIJ Database Working Group
- [5] 榊原裕介 et al. : 「大型低温重力波望遠鏡 (LCGT) 熱シールド用金属の低温における波長 $10 \mu\text{m}$ での反射率測定」 低温工学 46 (2011) 434-440
- [6] K.Yamamoto: "Data of Parameters of cryogenic payload in LCGT," LCGT DocDB (2011) JGW-T1100569-v1

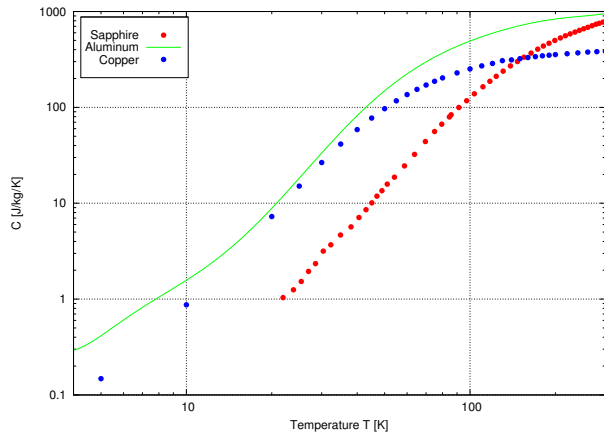


図 7: 比熱 (サファイア [3]、アルミニウム [2]、銅 [4])

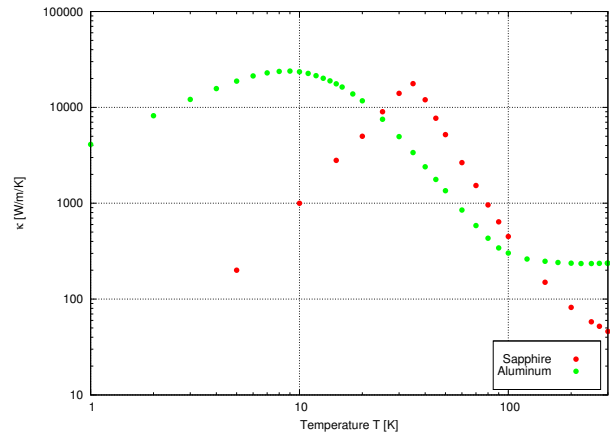


図 8: 熱伝導率 (サファイア [6]、アルミニウム [4])

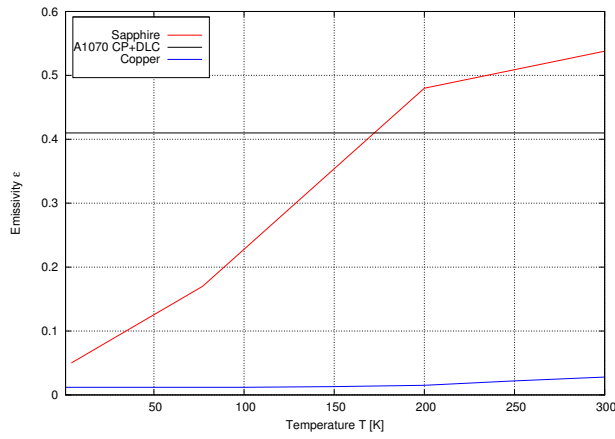


図 9: 熱放射率 (DLC は波長 $10 \mu\text{m}$ での吸収率を測定、サファイア [3]、銅 [5])