金属パイプ内を伝搬する熱輻射の考え方

都丸 隆行*

Methods for Estimating the Radiation Heat Transfer in Metal Pipe

Takayuki TOMARU*

Synopsis: The heat transfer equation derived from the Stefan-Boltzmann law is frequently used to calculate the heat load due to thermal radiation in a cryogenic apparatus. This equation expresses heat transfer from one surface to the other, and includes no information on structures between these surfaces. In the case of thermal radiation through a metal pipe, which exists between different temperature regions, its reflection and conduction in the pipe (funneling) have to be considered. This effect is much larger than the simple estimation derived from the solid angle between these temperature regions. In this paper, the heat transfer equation derived from a ray-trace model and an experiment conducted to confirm it are described. Moreover, the reduction experiment of this heat load using metal baffles is also reported.

Keywords: thermal radiation, cryostat, radiation heat transfer, thermal insulation design

1. はじめに

熱の移動形態には、主として、伝導、対流、輻射の3タイプがある。これらがどの程度の熱負荷になり、どの程度低減できるかを推定することは、低温システムの設計上重要な仕事である。それぞれ便利に定式化や数値リスト化されていて普段何気なく使っていることも多いが、取り扱いを誤ると予期せぬ大きな熱負荷に苦しめられることになる。

例えば熱輻射の場合、どの教科書にもステファン-ボルツマン則が説明されており、実用的な熱輸送の式として、

$$P = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_1 \epsilon_2} \sigma (T_2^4 - T_1^4) A \quad [\text{W}], \quad (1)$$

のように定式化されている¹⁾⁻³⁾。さらに両端面を見込む立体角 Ω を考慮し、

$$P = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_1 \epsilon_2} \sigma (T_2^4 - T_1^4) A \frac{\Omega}{2\pi}, \quad (2)$$

のように拡張した式を使うことも多い。ここで、 T_1 、 T_2 は2つの面の温度、 ϵ_1 、 ϵ_2 は輻射率、 A は表面積、 σ はステファン-ボルツマン定数である。

この熱輸送の式は向かい合った2つの平面間での熱のやりとりを表したものであり、面と面の間に構造があるような場合には使用に注意が必要である。例えばFig. 1のように、高温領域と低温領域の間に配管が存在するような低温システムはよくあるが、このような場合には配管表面での

熱輻射の反射・伝搬の影響(Funnelling)が大きく作用する。失敗談になるが、式(2)に基づいて設計が行われた重力波検出器用クライオスタットでは非常に大きな輻射熱侵入が観測され、初期の冷却試験で十分な温度まで到達することが出来なかった。

このような熱輻射の反射・伝搬の影響については、液体ヘリウムデュワーの熱解析から倉岡等が詳しく調べており、基本的な考え方や考察が報告されている^{4),5)}。我々のグループでは、重力波検出器のR&D用プロトタイプ伝導冷却型クライオスタット(CLICK)を用いた実証実験とモデル計算により、より直接的に熱輻射の伝搬・反射の影響を調べた⁶⁾。

この技術ノートでは、2つの異なる温度領域間にパイプ状の構造が存在している場合に、熱輻射がどのように侵入するかという問題の具体的な考え方および検証実験について紹介したい。また、このようなケースの熱負荷を低減する実験についても紹介する。

2. 金属パイプを介した輻射熱輸送の式

300 Kの熱輻射は、波長約 $20 \mu\text{m}$ にピークを持つ赤外線が集まりである。アルミニウム等の金属は、この波長域で高い反射率を持つことが知られており、例えばスーパーインシュレーションではその性質が十分に発揮されている。したがって、2つの温度領域間に金属パイプが存在しているような場合の熱輸送を考える際には、金属パイプ内での輻射の反射・伝搬を考慮する必要がある。

Fig. 2は、300 Kと4 Kの2つの温度領域の間に、直径 a 、長さ L 、赤外線平均反射率 R のパイプが存在している場合のray-trace modelである。パイプのサイズは赤外線の波長より

Received October 25, 2008

* 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

High Energy Accelerator Research Organization, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

E-mail: tomaru@post.kek.jp

Fig. 1 Examples of cryostats which have a metal pipe between different temperature regions, in the case of (a) liquid helium dewar, (b) a dewar cryostat with a vacuum vessel, (c) the cryostat for an accelerator magnet, and (d) the cryostat for a gravitational wave detector.

十分大きいとし、ray-trace model が成り立つ場合のみを取り扱うこととする。このモデルでは、300 K の面の中心から等方的に赤外線が放射されたと仮定し、パイプ内各位置への入射成分が正反射しながら 4 K の面に到達すると考える*1。この時の熱輸送の式は

$$P_{tot} = P_0 \left[\frac{\Omega}{2\pi} + \int_0^L R^{N(x)} \frac{d\Omega}{2\pi} \right] \\ = P_0 \left[\frac{a^2}{2L^2} + \int_0^L R^{N(x)} \frac{a^2}{(x^2 + a^2)^{3/2}} dx \right]. \quad (3)$$

のように表す事が出来る。ここで、 P_0 は 300 K から放射される熱輻射の全パワーで、

$$P_0 = \epsilon \sigma (T_{300}^4 - T_4^4) \pi a^2, \quad (4)$$

$N(x)$ は場所 x に入射する輻射の反射回数を表す関数で、

$$N(x) = 1 + \left\lceil \frac{L-x}{2x} \right\rceil, \quad (5)$$

Ω は 2 つの面を見込む立体角である。[] は Gauss 記号で、小数点以下をカットし、整数化することを表す。

一方、立体角 Ω のみを考慮した (2) 式の場合には、

$$P_s = P_0 \frac{a^2}{2L^2}, \quad (6)$$

となる。

次節で述べる検証実験で使用したアルミニウムパイプ ($a = 3.5$ cm, $L = 135$ cm) の場合の計算結果が、**Table 1** である。いくつかの反射率について、 P_{tot}/P_s を求めた。この結果、パイプ内での反射・伝搬を考慮すると、単純に立体角のみを考えた P_s に比べ、2 ~ 3 桁も熱侵入量が大きくなり、2 つの面の間にある構造が大きく影響することが分かる。

Fig. 2 A ray-trace model of thermal radiation in a metal pipe between different temperature regions.

Table 1 The calculation results of Eq. (3), normalized by P_s . The specifications of the pipe in a prototype cryogenic interferometer (CLIK), 3.5 cm in radius and 135 cm in length, were used in this calculation.

	$R = 0.90$	$R = 0.95$	$R = 0.98$
P_{tot}/P_s	345	737	1,395

3. 検証実験

(3) 式の ray-trace model を検証するため、東大宇宙線研のプロトタイプ低温干渉計 CLIK を用いて検証実験を行った。**Fig. 3** は実験のセットアップである。ビームダクト内に、およそ 100 K まで冷却した直径 7 cm、長さ 135 cm のアルミニウム 1070 製パイプを導入し、このパイプの両端に輻射源とボロメータを設置して、アルミニウムパイプを介した輻射熱の侵入量を調べた。輻射源には輻射率がおおよそ 0.9 と大きい紙を用いた。ボロメータには赤外線吸収率の大きい UB-NiP 黒体⁸⁾を用い、シリコンダイオード温度計と純アルミニウム製のヒートリンクを取り付けた。UB-NiP 黒体の吸収率は、波長 $8.33 \mu\text{m}$ の赤外線自由電子レーザーを用いて正反射率計測から求め、吸収率約 80 % という値を得た。また、熱負荷とボロメータ温度の関係を求めるため、マンガニンフィルムヒーターを取り付けてキャリブレーションを行った。実験は 2 回行い、十分な再現性を確認した。

*1 このモデルでは skew ray を考えていないが、skew ray は反射回数が増えるので副次的になると考えられる。skew ray の取り扱いについては、文献 7)などを参照されたい。

Fig. 3 The experimental set-up to measure total heat load from 300 K to 4 K through an aluminum pipe. Baffles were used only in the reduction experiment described in Section 4.

以上の実験により実測された平均の輻射熱侵入量は、390 mW であった。ここでは、輻射源の輻射率とボロメータの吸収率を考慮し、補正した。この値は、パイプ内での反射・伝搬を考慮しない P_s に比べて 740 倍も大きい。

さらに、この実験結果と前節で述べた計算結果の整合性を調べるため、東京理科大学赤外線自由電子レーザー研究センターの光源⁹⁾を利用し、実験で用いたアルミニウムパイプ内面の赤外線反射率を調べた。測定方法は、パイプを四つ割にしたサンプルに赤外線レーザーを入射し、その正反射パワーから反射率を求めたものである。測定波長は $8.33 \mu\text{m}$ である。この結果得られたアルミニウムパイプ内壁面の反射率は、98% であった。ただし、受光面の大きなカロリメータタイプのディテクタを用いたこと、およびレーザーパワーの不安定性の問題で、得られた反射率には数% の不確実性がある。一方、実験で得られた熱負荷の数値と (3) 式を用いて逆算したアルミニウムパイプの反射率は 95% であり、測定誤差の範囲で実測の反射率と一致した。

以上のことから、2つの異なる温度領域の間にパイプ状構造物が存在する場合の輻射熱輸送は、前節で述べた ray-trace model によりうまく説明できると結論づけられる。

4. 輻射熱伝搬の低減

Fig. 4 は、CLIK の場合の (3) 式の被積分関数を、 $R = 0.95$ でプロットしたものである^{*2}。このグラフが示すように、300 K

Fig. 4 The plot of the integrand of Eq. 3 in the case of CLIK.

側に近いところへ入射する輻射成分の寄与が大きいことがわかる。したがって、300 K 側のパイプ内で輻射の反射・伝搬を阻害するのが効率的である。

Fig. 5 The baffle positions in the reduction experiment of radiation heat transfer through an aluminum pipe under the conditions of (a) two baffles, and (b) six baffles.

^{*2} おおまかな考え方では、反射率 R を持つ鏡面間での光の反射回数は

$$N = \frac{1}{1-R} \quad (7)$$

と書けるため、 $R = 0.95$ のパイプ内では平均 20 回の反射が起こる。したがって、 $L = 135 \text{ cm}$ のパイプの場合には 6.8 cm 間隔が

これに対応し、Fig. 4 のようなピーク位置とほぼ一致する。

Table 2 The measured heat load of thermal radiation through an aluminum pipe after introducing aluminum baffles under the conditions of (a) two baffles, (b) six baffles, and (c) no baffles.

Baffle position	(a)	(b)	(c)
Heat load [mW]	7.9	< Measurement limit	315

輻射の反射・伝搬を阻害するには、吸収と反射の2つの方法が考えられる。低温システム全体への熱負荷を軽減させるためには、後者のように出来るだけシステムの外へ輻射を打ち返してしまう方が望ましい^{*3}。そこで、バッフルを用いた輻射熱侵入の低減実験を行った。実験のセットアップはFig. 3と同じであり、アルミニウムパイプの中に口径2.4 cm (パイプ直径の1/3)のアルミニウム製バッフルを挿入し、熱負荷の減少を計測した。バッフルの配置は、Fig. 5のような2パターンを試した。(a)は2つのバッフルを用いた場合であり、(b)は6つのバッフルを用いた場合である。(b)のケースでは、パイプ内300 K側にバッフルが多い配置であると共に、バッフルの作る陰がパイプ内をほぼ覆うような配置になっている。

Table 2に測定結果のまとめを示す。(c)にバッフルを用いなかった場合も参考値として記した。ここでは、ボロメータの吸収率や輻射源の輻射率を補正していない。(a)のバッフルが2コのケースでは、(c)に比べ熱負荷が98%も低減し、(b)のバッフルが6コのケースでは、測定限界以下であった。したがって、バッフルの導入はパイプ内を反射・伝搬する輻射熱侵入の低減に非常に効果的であることが分かった。

5. まとめ

この技術ノートでは、2つの異なる温度領域間にパイプ状の構造物が存在する場合の熱輸送について解説を行った。実験と計算を行った結果、このようなケースの熱輸送はray-trace modelでうまく説明が出来、単純に立体角だけを考えた場合に比べ、2～3桁も大きくなりうる事が分かった。さらに、バッフルを用いた低減実験の結果、2コのバッフルを導入しただけでも、98%の低減が達成出来る事が分かった。現在さらに効率的なバッフルの形状および配置について研究を進めている。

本研究は東京大学宇宙線研究所の共同利用研究として行われた。特に宇宙線研究所の黒田和明氏、徳成正雄氏（現日本IMB）、高エネルギー加速器研究機構の鈴木敏一氏、日本大学の新富孝和氏には、実験全般にわたりアドバイスとご協力を頂いた。また、東京理科大学赤外線自由電子レーザーセンターの今井貴之氏および築山光一氏には、UB-NiP黒体やアルミニウムパイプの赤外線反射率（吸収率）測定時にご支援いただいた。ここに改めて感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) R. F. Barron, "Cryogenic Systems, Monographs on Cryogenics 3", Oxford University Press N. Y. (1985)
- 2) 低温工学協会編, 「超伝導・低温工学ハンドブック」, オーム社 (1993)
- 3) 小林俊一、大塚洋一, 「低温技術, 物理工学実験 7」, 東京大学出版会 (1987)
- 4) 倉岡泰郎 他, 「液体ヘリウムデュワーの熱解析及び蒸発速度の低減」, "Heat analysis and reduction of evaporation rate of liquid helium dewar", 低温工学, **12** (1977) 19-27
- 5) 倉岡泰郎, 「液体ヘリウムデュワーの熱解析及び蒸発速度の低減 (その2)」, "Heat analysis and reduction of evaporation rate of liquid helium dewar part II", 低温工学, **14** (1979) 32-36
- 6) T. Tomaru et al., "Conduction effect of thermal radiation in a metal shield pipe in a cryostat for a cryogenic interferometric gravitational wave detector", Jpn. J. Appl. Phys. **47** (2008) 1771-1774
- 7) D. G. Hawthorn and T. Timusk, "Transmittance of Skew Rays through Metal Light Pipes", Appl. Opt. **38** (1999) 2787-2794
- 8) T. Tomaru et al., "Study of optical dumpers used in high vacuum system of interferometric gravitational wave detectors", J. Phys.: Conf. Ser. **32** (2006) 476.
- 9) H. Kuroda, "Status of the FEL-SUT Project", Proc. Int. Symp. Infrared Free Electron Laser and Its Application, Jpn. J. Appl. Phys. **41** (2002) Suppl. 41-1. 1.

都丸 隆行 昭和45年9月14日生。平成8年東京工業大学理学部物理学科卒業。平成13年東京大学理学系研究科物理学専攻博士課程修了。同年日本学術振興会特別研究員。平成16年高エネルギー加速器研究機構機関研究員。同年同機構助手。現在同機構助教。専門は重力物理学、低温工学。低温工学協会、日本物理学会会員。博士（理学）。

^{*3} 壁面で吸収させてしまう場合の研究については、文献4)、6)を参照。