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）

倉 岡 泰 郎

株式会社ほくさん研究所 札幌市白石区菊水5条2丁目
(1978年12月4日受理)

Heat Analysis and Reduction of Evaporation Rate of Liquid Helium Dewar Part II

Yasuo KURAOKA

Laboratory, Hoxan corp.
5-2 Kikusui, shiroishi-ku, Sapporo

(Received December 4, 1978)

Synopsis :

We reported in a previous paper that, in a wide aperture liquid helium dewar, the largest factor among heat losses is the radiant heat input from the top surface and that it can be reduced by painting aquadag on the inner wall.

In this paper, we investigate several kinds of surfaces instead of aquadag as durable treatment, for example, sulfurized, oxidized or sandblasted surface. In the case of sandblasted surface, its rough surface was approximated by sine-wave and a computer simulation was applied to the thermal analysis.

1. 序 論

液体ヘリウムデュワーにおける Funnelling と見かけの固体熱伝導に対する熱解析と実験結果はすでに報告した¹⁾。

この報告の中で以下の事実が明らかとなった。

- (1) 広口直円筒型の液体ヘリウムデュワーの場合 Funnelling が最大の熱侵入の要素である。
- (2) このとき、見かけの固体熱伝導は0である。
- (3) 液体ヘリウムデュワーの内槽内壁に低反射率のアクアダックを塗布することにより、蒸発速度が大きく減少する。
- (4) アクアダック塗布後、見かけの固体熱伝導が現われ、これが全侵入熱量の大部分をしめる。

しかし、アクアダックは剝離しやすく耐久性に欠ける。そこで本研究では実用的な黒体化処理デュワーとしての内面処理について検討した。耐久性のある内面

処理として、スチールショットブラストなどにより表面を粗す、いわゆる幾何学的処理と、化学的に低反射率の皮膜を形成させる化学的処理とを扱った。特に幾何学的処理においては、モンテカルロ法によって有効立体角を算出し、表面粗さと effective な反射率との関係を検討した。

2. 乱反射による有効立体角の計算

2.1 モンテカルロ法によるシュミレーション
計算のために、デュワー内壁面の幾何学的構造に対するモデルをつくる。モデルをつくるうえで、満たすべき条件を以下のように設定する。

- (1) 微分方程式、もしくは計算機シュミレーションによって取扱い可能なモデルとする。
- (2) 表面粗さを凹凸の深さと幅との2つのパラメータで表示し、しかも Funnelling の大きさが2つのパラメータによってどのような影響を受ける

かを関連づけられるようにする。

計算は上記の条件を満たすようにデュワー内壁面の粗さを規則的な SIN 波で置き換えたモデルを用いて行なった (Fig. 1)。つまり、表面の凹凸の深さと幅は、それぞれ SIN 波の振幅の 2 倍と周期とに対応している。また、計算はモンテカルロ法による計算機シミュレーションによった。

計算手順は下記の通りである。

- (1) 2 個の乱数を発生させ、デュワー上端面の輻射波のスタートの位置と方向を定める。
- (2) 輻射波の最初の強度を 1 として乱数により定められた位置から定められた方向に輻射波をスタートさせる。
- (3) SIN 波 (デュワー壁面) に衝突した輻射波はその場所の SIN 波の傾きに応じた方向に整反射 (specular reflection) される。
- (4) このとき、輻射波の強度は ϵ 倍だけ減衰する。ただし、 ϵ はデュワー内槽内壁を構成する材質の研磨状態での反射率である。

Fig. 1 Schematic drawing of diffused reflection.

(5) このように反射された輻射波は幾度か壁面との衝突を繰返し、その度毎に強度を ϵ 倍ずつ減衰させながら液体ヘリウム液面に到達する。

(6) 液体ヘリウム液面に入射する輻射波の強度を I_1 とする。

(7) 次に新たな乱数を 2 個発生させ、(1)~(6) の手順で I_2 を求める。

(8) 上述の手順で次々と輻射波をスタートさせ、 $I_3 \sim I_n$ を求め、これらの平均値 I が要求する範囲以下のバラつきになるまで計算を続ける。

(9) このようにして求められた輻射波の平均強度 I は、

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{n} \div \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{n} \quad (n: \text{整数}) \quad (1)$$

となる。

2.2 整反射における有効立体角との対応

整反射による Funnelling の大きさは、次式で与えられる¹⁾。

$$\left. \begin{aligned} Q\Omega &= \sigma \epsilon S (T_1^4 - T_2^4) \frac{\Omega^\dagger}{2\pi} \\ \Omega^\dagger &= \lim_{n \rightarrow \infty} \pi (1 - \xi) \left[\sum_{n=0}^{n-1} \xi^n \{ X^2 + (2n+1)^2 \} \right. \\ &\quad \left. + 1 - \sqrt{(X^2 + (2n+1)^2 + 1)^2 - 4(2n+1)^2} \right] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ただし $Q\Omega$ は Funnelling の大きさ (Watt), σ は Stefan-Boltzmann constant (5.67×10^{-12} Watt/cm² K), ϵ はフランジの輻射率, S はフランジの面積, T_1, T_2 はそれぞれフランジと液体ヘリウムの温度, $\Omega^\dagger$ は有効立体角, ξ は壁面の反射率, X は l/R (l はフランジから液面までの深さ, R はデュワーの内半径) を表わす。

ここで、乱反射による Funnelling の大きさは、

$$Q\Omega = \sigma \epsilon S (T_1^4 - T_2^4) I \quad (3)$$

となり、式 (2) より明らかに I は $\Omega^\dagger/2\pi$ に対応している。すなわち $\Omega^\dagger/2\pi$ はデュワー壁面の反射率 ξ の関数であるから、 $\Omega^\dagger/2\pi$ と I との比較によって乱反射の場合の effective な反射率を求めることができる。

乱反射による有効立体角を、いくつかの例について計算により求めた。計算は 500 組の一樣乱数を用いて行なったが、Fig. 2 に示した例から明らかなように、これは本計算に対して充分小さなバラつきを与える乱数の個数であると考えられる。次に、整反射における $\Omega^\dagger/2\pi$ の計算例との比較を Fig. 3 に示す。ただし、 α, β はそれぞれ SIN 波の振幅と周期を表わす。ま

Fig. 2 Fluctuation of effective solid angle dependence of the number of couples random numbers.

Fig. 3 Comparison between specular and diffused reflection.

た、 ξ は整反射における反射率であり、前述した乱反射の場合の有効立体角の計算に用いる SIN 波面の反射率は 0.83 として計算を行なった。

Fig. 3 から、下記のことが明らかとなった。

- (1) 乱反射による有効立体角の値は、デュワー内壁表面の凹凸の深さと幅との比の大きさに依存している。
- (2) 反射の機構の違いにより両者の $X (=l/R)$ 対有効立体角曲線は異なった曲率を示しているが、

ある X に注目することによって、 β/α を整反射の場合の反射率 ξ に対応させることができる。このときの反射率を有効反射率と呼ぶ。

- (3) β/α が小さくなればなる程有効立体角は減少する。つまり、凹凸の幅に比して深さが増せば増す程乱反射による Funnelling の減少効果は大きい。

- (4) X の増加にともない有効立体角は減少する。すなわち、デュワーの半径に比して液面深さが増すほど、乱反射による Funnelling の減少効果は大きくなる。

3. 実験方法と結果

3.1 実験装置と実験方法

デュワー内壁表面粗さと Funnelling の減少との関係、及び化学的皮膜による反射率の低減と Funnelling の減少との関係を実験的に示す。

種々の表面状態に対する実験が行なえるように、デュワー内槽として互換性のある構造のクライオスタットを使用した (Fig. 4)。使用したデュワー内槽の種類としては、内壁表面を #400 バフ研磨したものとアクアダックを塗布したもの、化学的処理としてアルカリ酸化による皮膜形成と硫化膜形成したもの、また、幾何学的処理としてグラスビーズブラスト、サンドブラスト、スチールショットブラストを施したものを用いた。

Fig. 4 Liquid helium dewar used for experiment.

実験は各内槽に対して、液体ヘリウム液面深さを超電導液面計を用いて測定し、また、侵入熱量はマスフローメータにより蒸発速度を測定し、これを換算することにより求めた。

3.2 結果と検討

各種内槽に対する液面深さ対侵入熱量の測定結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5 より各種表面処理によって侵入熱量の大きさが変化しているのがわかる。そこで、侵入熱量と反射率または有効反射率との関係について検討をする。

まず、各種ブラストを使用して梨地処理をした表面の凹凸を SIN 波に置き換えるために表面粗さの測定を行なった。ガラスビーズブラストの例を Fig. 6 に示す。ここで SIN 波の振幅と周期としてそれぞれ

Fig. 5 Heat input dependence of the liquid helium.

- ; polished by #400 emery
- ; painted by aquadag
- ; oxidized
- ▲; sulfarized
- ; glass beads blasted
- △; sand blasted
- ▽; steel shot blasted

Fig. 6 Blasted surface by glass beads.

$R_{max}/2$ (R_{max} は最大粗さ) と凹凸の平均間隔をとった。この場合、黒体輻射の波長分布は λ_{max} の $1/2$ から 5 倍の波長領域中に約 95% のエネルギーが含まれる。従って、ほぼ $1/2 \lambda_{max}$ 以下の凹凸に関しては無視した。

また、化学的表面処理とアクアダック塗布に対しては実際に「反射率の測定を行なった。測定方法としては、試料の法線に対し 15° の角度から単色波長の赤外線を入射し、法線に対称に整反射する光の強度を測定する方法をとった。

各種の処理に対し、(有効) 反射率、有効立体角、液体ヘリウムの保持時間をまとめたものを Table 1 に示す。ここで、反射率は実測値であり、有効反射率は粗さ測定から計算した理論値である。また、有効立体角の計算値はデュワー内壁面の反射率から、式(2)を用いて算出した値であり、有効立体角の実測値としては、全侵入熱量がほぼ Funnelling の値と一致するものと仮定し、全侵入熱量から式(2)を用いて換算した値である。 $l/R=12.5$ の場合について扱った理由は、このときの蒸発速度と平均蒸発速度がほぼ比例関係にあるからである。

Table 1 の中で、有効立体角の理論値と実測値は、#400バフ研磨、アルカリ酸化膜、ガラスビーズブラスト、サンドブラストの場合かなり良く一致しているが、アクアダック塗布、硫化膜、スチールショットブラストの場合はかなり差があるのがわかる。

有効立体角の理論値、実測値(全侵入熱量を Funnelling に換算したもの)と反射率の関係をグラフ化すると Fig. 7 のようになる。ここで、実線は有効立体角の計算値であり、プロットした各点は実測値である。

Fig. 7 から下記のことがわかる。

- (1) このデュワーの場合、約60%の反射率を境と

Table 1

Treatments	Reflectivity	Effective Solid Angle (calculated) $\theta/R=12.5$	Effective Solid Angle (experimental) $\theta/R=12.5$	Holding Time
Polished by #400 emery	83 %	0.335	0.316	8.0hrs
Painted by aquadag	2 %	>0.004	0.174	14.5hrs
Oxidized	74 %	0.214	0.196	13.0hrs
Sulfarized	8 %	0.005	0.122	20.7hrs
Glass beads blasted	2 % (74.5 %)	>0.004 (0.219)	0.190	13.5hrs
Sand blasted	-(61 %)	(0.119)	0.125	20.0hrs
Steel shot blasted	-(58 %)	(0.104)	0.122	20.9hrs

Fig. 7 Effective solid angle dependence of reflectivity.

- ; polished by #400 emery
- ; painted by aquadag
- ; oxidized
- ▲; sulfarized
- ; glass beads blasted
- △; sand blasted
- ▽; steel shot blasted

して2つの領域に分けられる。(以下この反射率を限界反射率と呼ぶ)

- (2) 高反射率領域では反射率の減少にともなって侵入熱量は有効立体角のカーブに沿って減少する。つまり、この領域では、全侵入熱量はほとんど Funnelling によってしめられている。

ちなみに、真空断熱層を通しての液体窒素槽からの輻射は 3mW 程度であり、全侵入熱量に対して充分小さい。

- (3) 低反射率領域では、反射率の減少に無関係に侵入熱量は一定となる。このことは、Funnelling が減少した分だけ見かけの固体熱伝導が増加していることを示すと考えられる。すなわち破線と実線で囲まれた部分が、ほぼ見かけの固体熱伝導を

表わす部分といえる。

- (4) アクアダック塗布の場合、これらのカーブ上にのらないのは、アクアダック塗布によって結果的に固体熱伝導に寄与する肉厚を増加させることになっており、そのため見かけの固体熱伝導が増加したためと考えられる。

従って、デュワーの肉厚を増加させると、破線部分は上に平行移動し、肉厚を減少させると下に平行移動し、また、それにともない限界反射率も変化する。

以上のことから、デュワーの設計に対しては必要とする性能を得るための反射率と肉厚を選定する必要がある。

4. 結 論

以上の解析と実験から次のことが明らかとなった。

- (1) 幾何学的表面処理の場合、乱反射による Funnelling の減少効果は表面粗さを SIN 波に置き換えた計算によって良く説明できる。
- (2) デュワー内壁を構成する材質の反射率に変化はなくとも、乱反射によって結果的に Funnelling を減少させることができる。また、このことによって見かけ上反射率が減少しているように見える。
- (3) 幾何学的表面処理による乱反射の場合、表面の凹凸の幅に対する深さの割合が大きければ大きい程見かけ上の反射率が小さくなり、従って Funnelling の減少効果も大きくなる。
- (4) ある反射率（この場合幾何学的処理における見かけ上の反射率も含む）以下では、見かけの固体熱伝導が現われ、結果的に反射率が減少しても全侵入熱量は変化しない。
つまり、これ以上反射率を減少させてもデュワーの性能は向上しない。
- (5) ある反射率以上では、全侵入熱量の大部分が Funnelling であり、反射率の減少にともない全侵入熱量も低減する。

最後に本研究に対し有益な御助言を下された北海道大学理学部助教授の渡辺昂先生と、反射率の測定に御助力下された大阪大学低温センターの山本純也先生に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 倉岡泰郎, 他: 低温工学 Vol. 12 (1977) 19