

300 K 輻射に対するバッフルの効果

山元 一広

東京大学宇宙線研究所

平成 18 年 5 月 24 日

1 Introduction

CLIO の鏡の入熱は 1 mW 程度と予想されていたが、実際には 100 mW 程度であった。いままでは低温ダクトに一度も当たらない 300 K の輻射のみが入ってくると考えていたが、実は低温ダクトに当たった輻射は吸収されず反射され、鏡を囲う内部シールド内に侵入するらしい。計算によるとダクトに一度も反射されない 300 K 輻射に対してダクトを反射して伝播する輻射のエネルギーは 100 倍以上になることがわかった [1]。また [1] ではダクトの内面に低反射 coating を施した場合の効果も検討している。ここではバッフルを入れることでどの程度 300 K 輻射の侵入を防げるかを検討した。

2 基本的な考え方

バッフルの反射率によって話は変わってくるが、バッフルの基本的な役割は低温ダクトの入り口から内部シールドへの見通しを悪くすることである。よってバッフルに一度も反射せず、シールドに入るのが困難になることが大事である。まず話を簡単にするためにバッフルの反射率は 0、つまり当たった輻射は完全に吸収するとして話を進める。最後にバッフルの反射率が 0 でない場合も考える。なおバッフル自体の輻射はここでは考えない。

3 ダクトとバッフルの仕様

CLIO の低温ダクトの長さは $L = 5$ m、半径は $a = 15$ cm である。バッフルの高さは $d = 10$ cm とした。つまりバッフルの穴の半径は $a - d = 5$ cm である。これは CLIO の鏡の半径が 5 cm だからである。ダクトの反射率を R とする。バッフルの反射率は先に書いたようにとりあえず 0 とし、最後にダクトと同じ反射率を持つ場合を考える。

5 ダクトの入り口のみにはバツフルがある場合

ダクトの入り口のみにはバツフルがある場合には入り口の面積が $(a-d)^2/a^2$ 倍になることに相当する。つまり入る輻射の量は $(a-d)^2/a^2$ 倍になる。CLIO の場合は $1/9$ 倍、つまりおよそ 1 桁小さくなることに相当する。

6 ダクトの出口のみにはバツフルがある場合

この場合、バツフルに当たらない path は観測点と出口を含む無限平面上の

- 出口の中心から半径 $(a-d)$ の円内 (ダクトやバツフルに全く反射しない)
- 出口の中心から半径 $2na$ (n は自然数) の円周から距離 $(a-d)$ 以下の領域 (ダクトに n 回反射して、バツフルには反射しない)

という領域を結ぶ直線となる。よって観測点から内部シールドを見込む立体角は観測点から上記の無限平面上の領域を見込む立体角に等しい。立体角を 2π で規格化すると、ダクトの入り口に入ったパワーに対するダクトを抜けるパワーの割合がわかる。半径 $(a-d)$ の円内を見込む立体角を 2π で規格化すると

$$\frac{\pi(a-d)^2}{2\pi L^2} = \frac{(a-d)^2}{2L^2} \quad (1)$$

である。半径 $2na$ の同心円およびその付近の領域を見込む立体角を 2π で規格化すると反射率の重みも考えて

$$2\pi \times 2na \times 2(a-d) \times R^n \times \frac{L}{\sqrt{L^2 + (2na)^2}} \times \frac{1}{L^2 + (2na)^2} \times \frac{1}{2\pi} = \frac{4na(a-d)LR^n}{[L^2 + (2na)^2]^{3/2}} \quad (2)$$

以上の総和がダクトに入ったパワーのうち、内部シールドに侵入することができるパワーの割合である。

式 (2) を式 (1) で規格化して plot したのが図 2 である。 R は上から $0.97, 0.95, 0.9$ である。 R が極めて 1 に近い (0.999 程度) 場合、もっとも寄与が大きいのは $n = 12$ のときである。これは式 (2) からわかるように $L = 2na$ となる

$$n = \frac{L}{2a} \sim 17 \quad (3)$$

に近い。これより n が小さいと無限平面に投影された領域の面積が小さくなり、これより大きいと、観測点と領域の距離が長くなることや、無限平面の法線と観測点からの視線方向が平行でなくなるという効果が効いてくる。ここで気をつけることは R がそれなりに小さく

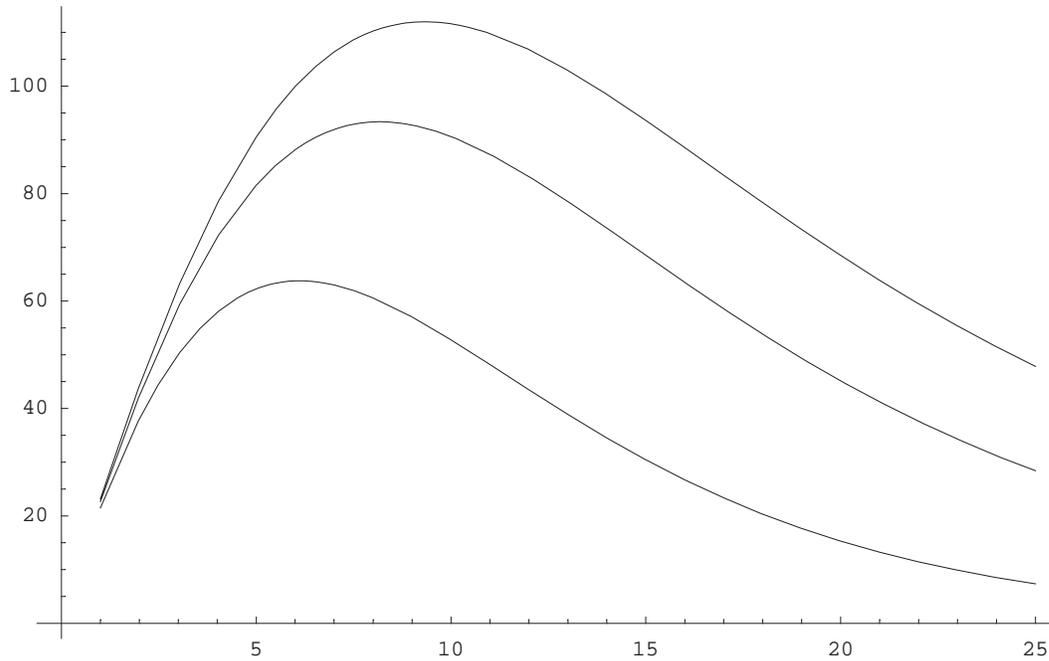


図 2: 式 (2) を式 (1) で規格化して plot したもの。横軸が n 、縦軸が規格化された式 (2)。 R は上の線から 0.97, 0.95, 0.9 である。

なると寄与が最大の n の値は小さくなることである。一回の反射で全体の $(1 - R)$ だけエネルギーがなくなるので反射回数はせいぜい

$$n \sim \frac{1}{1 - R} \quad (4)$$

となるからである。反射率が 1 に近いと $n = 12$ の寄与が一番大きかったので、 $R \sim 0.9$ 程度になると、寄与が最大の n が小さくなると考えられる。実際図でもそうになっている。

式 (1) と式 (2) の 1 から n までの総和を plot したのが図 3 である。但しバツフルがないときの観測点からダクト出口を見込む立体角 2π で割った

$$\frac{1}{2\pi} \frac{\pi a^2}{L^2} = \frac{a^2}{2L^2} \quad (5)$$

で規格化した。つまりバツフルがない場合に、ダクトに一度も反射しない輻射のパワーに対する比となる。図 3 からわかるように十分収束するためには先に求めた寄与が最大となる n より数倍大きい n まで考えなければならない。 R が 1 に近づくと収束するのに必要な n の値は大きくなる。 $R = 0.9, 0.95, 0.97$ で $n = 40, 80, 120$ まで足す必要がある。収束した値をまとめると表 1 となる。比較のためにバツフル無し、つまり $d = 0$ の場合の値も調べた。この結果は都丸の結果 [1] と一致しなければならないはずであるが、無事一致した。

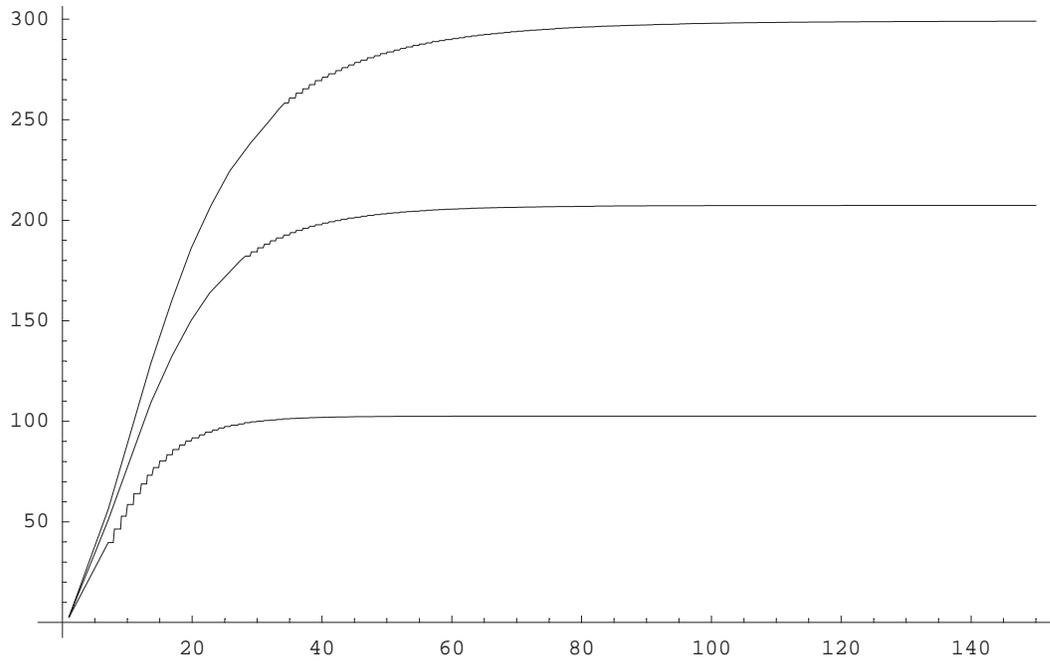


図 3: 式 (1) と式 (2) の 1 から n までの総和を plot したもの。横軸が n 、縦軸が式 (1) と式 (2) の 1 から n までの総和。但し式 (5) で規格化した。 R は上の線から 0.97, 0.95, 0.9 である。

収束するために足さなければならない項の数はバッフルの有無に依存しない。表 1 よりバッフルをダクトの出口に設置したことで放射のパワーはおよそ $1/3$ になることがわかる。バッフルによって出口の面積は $(a-d)^2/a^2 \sim 0.1$ となったがそこまでは小さくならないようである。

表 1: 内部シールドに入る放射量 (ダクトの出口にバッフルがある時とない時)

| | $R = 0.9$ | $R = 0.95$ | $R = 0.97$ |
|--------|-----------|------------|------------|
| バッフルあり | 103 | 207 | 299 |
| バッフルなし | 308 | 622 | 898 |

7 3枚目のバッフル

以上のことからわかるように入り口にバッフルを入れるとおよそ1桁輻射量が小さくなり、さらに出口につけると1/3倍になるので両方つけるとおよそ1/30倍となる²。もう一枚バッフルを入れるとさらに小さくなると考えられるが、どこに入れるのが最適であろうか。先に述べたように出口のバッフルに衝突しない path は出口を含む無限平面上の中心部と同心円状の領域に到達する。中心部はレーザービームが通るから邪魔をすることはできない。つまり3枚目のバッフルは同心円状の領域に到達するのを極力邪魔する位置に置くのがよい。入り口から距離 x の位置に3枚目のバッフルを置いたとしよう。これが邪魔をする optical path をダクトの出口を含む無限平面まで延長すると、到達する領域は出口にあるバッフルに当たる optical path が到達する領域を L/x だけ拡大したものとなる。この3枚目のバッフルに当たる領域と、出口のバッフルに当たらない optical path の到達点の領域が極力重なるようにするのがよい。それには、出口のバッフルに当たらない同心円状の領域の一番内側、中心から距離 $(a+d)$ 、と、3枚目のバッフルに当たる領域で一番内側の部分、中心から距離 $(a-d)L/x$ が一致すればよい。これを満たす x は

$$x = \frac{a-d}{a+d}L \quad (6)$$

となる。CLIO の場合は $L/5 = 1$ [m] である。

出口と3枚目のバッフルどちらでも反射されないがダクトでは反射される optical path は少なくとも何回ダクトで反射されるであろうか。先に見たとおり出口のバッフルで遮られない領域は中心を含む領域を除くと中心からの距離 r が

$$(2n-1)a+d < r < (2n+1)a-d \quad (7)$$

である。3枚目のバッフルで遮られない領域はこれを

$$\frac{L}{x} = \frac{a+d}{a-d} \quad (8)$$

倍したものである。つまり出口のバッフルで遮られない領域のうち中心から数えて $(a+d)/(a-d)$ の整数倍に近い自然数（これはダクトの反射回数となる）に当たる領域は3番目のバッフルでも遮られない可能性が高い。出口のバッフルで遮られない各領域の幅は式(7)から $2(a-d)$ であるから、3番目のバッフルで遮られない領域の幅は式(8)をかけて $2(a+d)$ である。出口のバッフルで遮られる領域の幅が $2d$ で遮られない領域の幅が $2(a-d)$ であるから、遮られない領域とその両側の遮られる領域の幅の合計が $2(a+d)$ となる。つまり3枚目のバッフルで遮られない領域の1つに入る出口のバッフルで遮られない領域の数はせいぜい

² といっても既に CLIO には入り口と出口にバッフルが設置されているのであるが。

2 となる。 $(a+d)/(a-d)$ がちょうど自然数の場合には 1 つだけとなる。まとめるとダクトの反射回数が $(a+d)/(a-d)$ の整数倍の前後の自然数に当たる場合出口のバッフルも 3 枚目のバッフルでも遮られない可能性がある。

CLIO の場合を考えると $(a+d)/(a-d) = 5$ である。よって 5 の倍数ダクトに反射する path は出口のバッフルでも 3 枚目のバッフル (入り口から 1m) でも遮ることはできない。それ以外のダクトを反射する path は全てどちらかのバッフルで遮られる。3 枚目のバッフルをつけたときの輻射の量は図 3 の計算において 5 の倍数の項のみ足せばよい。結果は表 2 となる。表 1 の結果も併せた。比較すると出口のみにバッフルがあるときのおよそ 1/5 となる。さらに入り口にもバッフルを入れることによってバッフルが全くない場合に比べておよそ 1/150 に輻射量を減らすことができる。 $R = 0.9$ の場合にはバッフルがないときにダクトに反射しないで内部シールドに侵入する量の 2 倍程度にまで抑えることができる。

表 2: 内部シールドに入る輻射量 (入り口から 1m と出口にバッフルがある場合)

| | $R = 0.9$ | $R = 0.95$ | $R = 0.97$ |
|-----------------|-----------|------------|------------|
| 全くバッフルなし | 308 | 622 | 898 |
| 出口のみバッフル | 103 | 207 | 299 |
| 入り口から 1m にもバッフル | 19.5 | 40.5 | 58.8 |
| 入り口にもバッフル | 2.17 | 4.50 | 6.54 |

8 バッフルによる反射の影響

今までの計算ではバッフルの反射率は 0 としてきた。つまりバッフルに当たった輻射は完全に吸収されるとしてきた。このような場合にはバッフルが出す熱輻射が問題となるが、より現実的にはバッフル自体ダクトと大差ない反射率を持つと考えられる。このような場合には熱輻射が問題とならなくなる代わりに、一度バッフルに反射されて戻っていく輻射が別のバッフルで再度反射され、それが今度はバッフルで遮られることなく内部シールドに進入することを考えなければならない。

ここでは話を簡単にしてダクトと同じ反射率を持つバッフルが入り口と出口にあるときに、どの程度の量の輻射が内部シールドに進入するか考える。このような場合も先と同じく展開するのが考えやすい。先はダクトの半径方向だけを展開したが、今度は軸方向 (x 軸とする) にも展開する。入り口を $x = 0$ とし、出口を $x = L$ とすると m を自然数として $2(m-1)L < x < (2m-1)L$ の領域が輻射が入り口から出口へと進む時に、 $(2m-1)L < x < 2mL$ の領

域が輻射が出口から入り口に帰るときに対応する。 $x = mL$ となる無限平面の

- 中心 (x 軸) から距離 $(2n - 1)a$ の円周上とそこから距離 d の領域

と交差する path がバッフルに反射される。

バッフルで一度も反射されることなく、内部シールドに入る輻射量と出口と入り口のバッフルで一度ずつ反射されてシールドに入る輻射量を比較してみよう。前者は表 2 から計算できるので後者だけでよい。出口、 $x = L$ 、で前の paragraph で述べた領域を通過する path が出口のバッフルで反射される。この path が $x = 2L$ (入り口) まで伸びると

- 中心 (x 軸) から距離 $2(2n - 1)a$ の円周上とそこから距離 $2d$ の領域

となる。これと $x = 2L$ のバッフルが遮る領域が重複する部分は

- 中心 (x 軸) から距離 $2(2n - 1)a$ の円周からの距離が $(a - d)$ 以上、 $2d$ 以下の領域

となる。但し $a - d > 2d$ 、つまり $d < a/2$ となる場合には重複する部分はない。つまり出口のバッフルで反射された輻射はかならず入り口のバッフルで反射されることなく外部に戻る。CLIO の場合はこの条件は成立しないので、入り口のバッフルで反射される輻射の行方を追わなければならない。 $x = 3L$ 、つまり再度出口に到達すると、出口と入り口で 1 回ずつ反射された path は $x = 3L$ の無限平面上の

- 中心 (x 軸) から距離 $3(2n - 1)a$ の円周からの距離が $3(a - d)/2$ 以上、 $3d$ 以下の領域

に到達する。 $x = 3L$ ではバッフルに遮られてはいけないことを考えると、出口と入り口のバッフルに 1 度ずつ反射して、内部シールドに侵入する path は $x = 3L$ 上で

- 中心 (x 軸) から距離 $3(2n - 1)a$ の円周からの距離が $(d$ か $3(a - d)/2$ の大きい方) 以上で $2a - d$ 以下

の領域となる。CLIO の場合 d の方が $3(a - d)/2$ より大きい。つまり

- CLIO の場合は中心 (x 軸) から距離 $3(2n - 1)a$ の円周からの距離が d 以上で $2a - d$ 以下

となる。もう少し書き直すと

- CLIO の場合は中心 (x 軸) から距離 $2(3n - 1)a$ 及び $2(3n - 2)a$ の円周からの距離が $(a - d)$ 以下

の領域となる。この領域が見込む立体角を求めて、 2π で規格化してみよう。式 (2) を参考にするとバッフルで 2 回反射されることも考慮して

$$2\pi \times 2(3n-1)a \times 2(a-d) \times R^{(3n-1)+2} \times \frac{3L}{\sqrt{9L^2 + 4(3n-1)^2 a^2}} \times \frac{1}{9L^2 + 4(3n-1)^2 a^2} \times \frac{1}{2\pi} = \frac{12(3n-1)a(a-d)LR^{(3n+1)}}{[9L^2 + 4(3n-1)^2 a^2]^{3/2}} \quad (9)$$

が $2(3n-1)a$ 付近の領域に相当し、

$$2\pi \times 2(3n-2)a \times 2(a-d) \times R^{(3n-2)+2} \times \frac{3L}{\sqrt{9L^2 + 4(3n-2)^2 a^2}} \times \frac{1}{9L^2 + 4(3n-2)^2 a^2} \times \frac{1}{2\pi} = \frac{12(3n-2)a(a-d)LR^{3n}}{[9L^2 + 4(3n-2)^2 a^2]^{3/2}} \quad (10)$$

が $2(3n-2)a$ 付近の領域に相当する。式 (9)(10) の和を式 (1) で規格化したものを n の関数とすると以下の図 4 のようになる。式 (3) の導出を参考にすると反射率が非常に高い

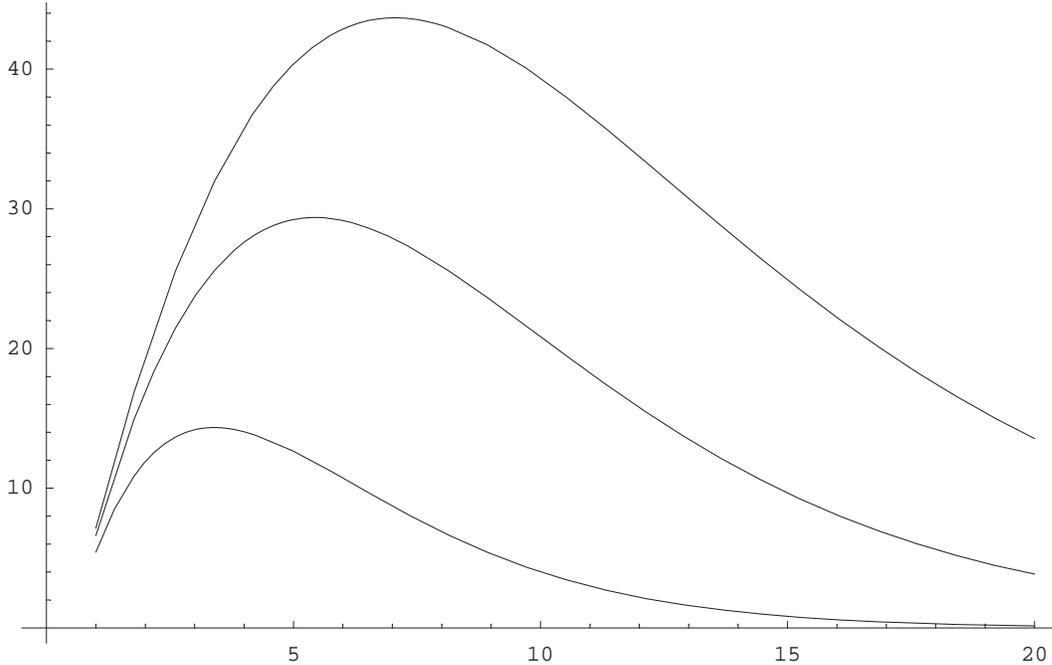


図 4: 式 (9)(10) の和を式 (1) で規格化したものを plot したもの。横軸が n 、縦軸が式 (9)(10) の和を式 (1) で規格化したもの。 R は上の線から 0.97, 0.95, 0.9 である。

ときは寄与が最大となる n は $3L = 2(3n - 3/2)a$ を満たす

$$n \sim \frac{L}{2a} \sim 17 \quad (11)$$

となる。しかし $n = 17$ のときのダクトとバツフルに対する反射回数は $\sim 3n \sim 50$ となる。つまり式 (4) の導出からわかるように $R < 0.98$ となると

$$n \sim \frac{1}{3(1-R)} \quad (12)$$

となる n で寄与が最大となる。図 4 は $R < 0.98$ であるのでこちらとなる。確かに大体そうになっている。

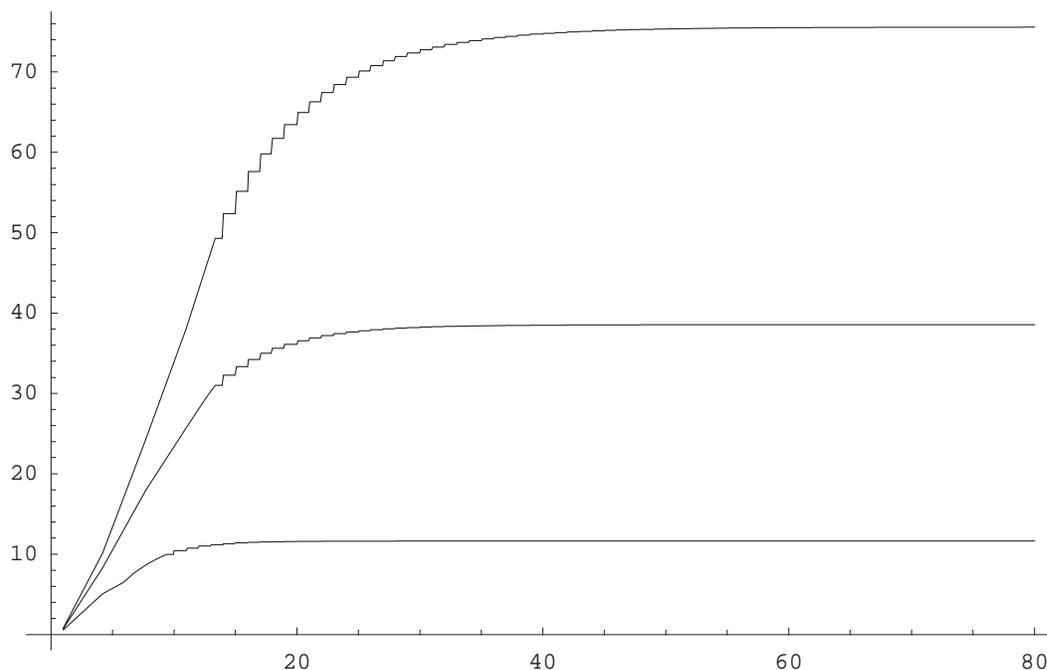


図 5: 式 (9)(10) の和を 1 から n まで足したものを式 (5) で規格化したものを plot したものの。横軸が n 、縦軸が式 (9)(10) の和を 1 から n まで足したものを式 (5) で規格化したもの。 R は上の線から 0.97, 0.95, 0.9 である。

式 (9)(10) の和を 1 から n まで足したものを式 (5) で規格化したのが図である。 $R = 0.9, 0.95, 0.97$ で $n = 20, 40, 60$ 程度で収束している。最大の寄与の n よりも大きい n も考慮しなければならない。

出口と入り口にバツフルがあるときに、一度もバツフルに反射しないで内部シールドに侵入する輻射の量と出口と入り口で 1 回ずつ反射して侵入する量を比較した。前者は表 2 から計算できる。入り口にバツフルがあるのでダクトに入る輻射量が小さくなることも考慮すると表 3 のようになる。バツフルに反射しない輻射に対する、反射する輻射の比はせいぜい $1/3$ であることがわかる。さらに R が小さい方が比が小さい。これは反射の過程で輻射エネルギーが吸収されるためである。これは図 2 からわかるように式 (3) もしくは式 (4) 程

表 3: 内部シールドに入る輻射量 (バッフルに反射する成分と反射しない成分)

| | $R = 0.9$ | $R = 0.95$ | $R = 0.97$ |
|--------------------|-----------|------------|------------|
| バッフルに反射しない輻射 | 11.4 | 23.0 | 33.2 |
| 各バッフルに 1 回ずつ反射する輻射 | 1.29 | 4.28 | 8.40 |
| 入り口にしかバッフルがない場合 | 34.3 | 69.2 | 99.8 |

度の反射回数、つまり 10 程度、の輻射の寄与が大きいからである。今回のように出口と入り口だけにバッフルがあった場合、一度出口のバッフルではねられると少なくとも余計に 1 往復しなければならない。つまり 20 回程度余計に反射することになる。反射率が 0.97 でも輻射が生き残るには厳しい条件である。バッフル反射回数がもっと大きい場合も考えられるがその寄与はもっと小さいだろう。また入り口のバッフルで反射される成分があっても、内部シールドに侵入する輻射は入り口にのみバッフルがある場合よりは大きくなることはない。この値も表 3 にのせておいた。これと上 2 行の数値を比較すると、各バッフルに 2 回ずつ以上反射する成分による寄与は差して大きくなさそうである。

9 注意点

CLIO の鏡への輻射量は予想の 100 倍程度であった。しかし既に入り口と出口にバッフルがあるのでその量は表 3 の 1 行目と 2 行目の和程度のはず (つまり 10 倍の order) である。よってバッフルの数は 3 枚ではなくもう少し増やしたほうがよいかもしれない。また低反射 coating[1, 2] も効果的であろう。

10 まとめ

バッフルを入れることによってどの程度 300K 輻射の内部シールドへの侵入が防げるか検討した。ダクトの入り口と出口、そして入り口から 1m のところにバッフルを入れた場合、いずれのバッフルにも当たらずシールド内に到達できる輻射量はバッフルが全くない場合の輻射量より 2 桁小さくなることがわかった (表 2)。バッフルの反射率が 0 でないと、バッフルで反射された輻射が再度反射されることで結局シールドに到達することはありうるが、その量は小さい (表 3)。これはもともと 10 回以上ダクトと反射する輻射の寄与が大きいいため、バッフルによってはねられることで、余計な距離を進まなければならなくなり、これは反射回数的大幅な増加を意味するからである。まとめるとバッフルは反射率がダクト程度の

値であっても、300K 輻射がバッフルに当たることなく内部シールドに侵入することを著しく困難にし、かつバッフルが輻射を一度だけでもはねるだけでダクトとの反射回数は著しく大きくして輻射を減衰させる働きがある。

CLIO の鏡への輻射量は予想の 100 倍程度であった。しかし既に入り口と出口にバッフルがあるのでその量は表 3 の 1 行目と 2 行目の和程度のはず（つまり 10 倍の order）である。よってバッフルの数は 3 枚ではなくもう少し増やしたほうがよいかもしれない。また低反射 coating[1, 2] も効果的であろう。

参考文献

[1] 都丸 隆行、2006/4/20,2006/5/2

[2] 鈴木 敏一、2006/4/28