

読者投稿欄

放射光と伝熱

河村 洋 (東京理科大学)

最近、放射光装置の大規模化にともない、除熱の問題が重要になってきたため、本学会の発表等にも「熱」に関するテーマを見受けることが多くなった。筆者は、原子力工学や機械工学の分野で熱に関する仕事をしてきたもので、放射光に関しては全くの素人であるが、この数年とくに放射光光学素子の冷却に関して若干のお手伝いをさせて頂いている。そのような立場の人間が、最近の本学会での講演を伺ったり論文を拝見したりしていると、いろいろ気付くこともあり、また熱の問題についてご質問を受けることも多いので、今回本欄をお借りして、放射光と伝熱に関し、筆者の気付いたことなどを書かせて頂くこととなった。

1. 「熱伝導」と「熱伝達」

いうまでもなく熱は一般には温度の高い部分から低い部分へと移動するが、これを我々は「伝熱」と呼び、通常、その形態を次の3種に分類している。

「熱輻射」 「熱伝導」 「(対流)熱伝達」
前二者は改めて説明するまでもないと思われるが、第3番目の熱伝達とは、流体の流れにともなって熱が移動する現象で、とくに固体表面と流体間の熱移動を云う。たとえば、モノクロメータの内側を水で冷却する場合に、モノクロメータの水に接する面から水流への熱移動がこれにあたる。

他方、熱伝導は媒体は移動せず温度差のみによる熱の移動を云う。上の例では、モノクロメータ表面で発生した熱が、シリコン結晶内を冷却チャンネル側へ移動するのが熱伝導である。このように、「熱伝導」と「熱伝達」は異なる現象である。世間一般では、「熱伝達」というべきところ

を「熱伝導」といわれることがあるが、本学会では、物理のご専門の方が多くだけあって、この種の誤用は少ないように見受けられる。

2. 「熱流束」と「熱伝導率」

単位面積、単位時間当りに通過する熱量を熱流束と呼んでいる。時折、「熱流速」と書かれているのを見ることがあるが、これは誤用である。もっとも最近、ワープロミスによることも多い。

熱流束(q)と温度勾配(dT/dX)の間には、よく知られたフーリエの法則による比例関係

$$q = -\lambda (dT/dX)$$

があり、このときの比例定数 λ を「熱伝導率」と呼んでいる。単位はW/mKである。したがって、熱伝導率は物性値であり、物性のハンドブック等から求められる。

3. 「熱伝達率」

固体を加熱または冷却する場合に、固体表面の温度を T_w (添字wはwallの意)、流体内の代表的な温度(たとえば平均温度)を T_f (添字fはfluidの意)とすると、温度差($T_w - T_f$)と熱流束 q との間に比例関係を仮定し、

$$q = \alpha (T_w - T_f)$$

としたときの比例定数 α を、「熱伝達率」と呼んでいる。単位はW/m²Kである。上式はニュートンによって提唱されたということになっており、ニュートンの法則と呼ばれているが、固体表面の

熱伝達は複雑で、このような簡単な比例関係で表されるものではないので、近年では、上式は単に熱伝達率の定義を与える式と見なされている。

したがって、熱伝達率は、熱伝導率とは異なり、物性値ではなく、流体側の流れの状態や、固体の形状、寸法などに大きく依存する。それでも流れが相変化のない单相流にとどまる限りは、(α が流速や流路寸法等に依存するとはいえ)熱流束 q と温度差($T_w - T_f$)との間の比例関係そのものはほぼよく成立することが多いが、相変化があって沸騰が生じたりすると、この比例関係自体が全く成立しなくなる。

では具体的にどのようにして熱伝達率を推定するかというと、従来からの研究の蓄積があって、いろいろな因子を考慮した整理式がハンドブック等に収められているので、それを利用して頂くことになる。代表的な例としては、日本機械学会から発行している「伝熱工学資料」¹⁾があるが、複雑な無次元数が多く含まれる式ばかりで、一般には使いにくいとの評判なので、パソコンで式の計算もできるようにした簡易版のハンドブックを現在作成しており、日本機械学会から近く発表する予定である²⁾。

4. 「高い冷却効率」とは？

最近、放射光の熱に関するご発表に、たとえば「フィンをとりつけることにより、非常に高い冷却効率が得られた」と云うような表現をよく見かける。云われようとする意味は、「小さな温度差で大きな熱負荷が除熱できた」ということであろうことは十分推測できるが、我々の伝熱の分野では「冷却効率」という用語は使わない。「効率」とは、やはり何%と云う割合を表す言葉だからである。上の例でも、たとえば「100%の入熱の内、どこかへ失われてしまったのは20%で、残りの80%は冷却できた」というようなことを意図されているのではないと思う。ではどう云えば良いかというと、ばくぜんと云うなら「高い冷却効

果」や「熱伝達の向上」位であろうし、もう少し定量的に云うのなら「高い熱伝達率」と云うことになる。

5. 放射光光学素子の冷却方式の分類

ここで話題を変えて、放射光光学素子を、冷却という観点から分類してみたい。筆者の考えでは、放射光光学素子は、図1の3種に分類できるのではないかと考えている。

第1は、入射光面の直下を冷却し得る場合で、ミラー、モノクロメータのような「反射型素子」、およびアブソーバー等の「吸収型素子」がこれにあたる。

第2は、入射光面の直下に冷却材を流せない場合で、ウインドー、フィルター等の「透過型素子」に用いられる。

第3は、上記2方法のバリエーションとも見られるが、入射ビームの寸法が微少な場合に当たり、冷却部はビーム径に比して相対的に遠方にならざるを得ないので、伝熱的には別の取扱になる。

6. 除熱の限界とその向上

放射光装置内の熱負荷が各所で大きくなるにつれ、どの程度の熱負荷まで除熱できるかという質問を受けることがよくある。これは、上記の冷却方式にも依存し、一概には答えられない問題である。

除熱限界の向上方法は、発熱部から除熱部に至るまでの熱流パスの内、どの部分の熱抵抗が支配的になっているかに依存する。

6.1 熱伝導支配の場合

固体内の熱伝導が支配的な場合、その部分にできる限り熱伝導率の大きな材料を用い、さらにそのパスをできる限り短くすることになる。たとえば上記の直下冷却型では、受光面部分の肉厚をできる限り薄くする。

周辺冷却型では、冷却部までの距離をできるだ

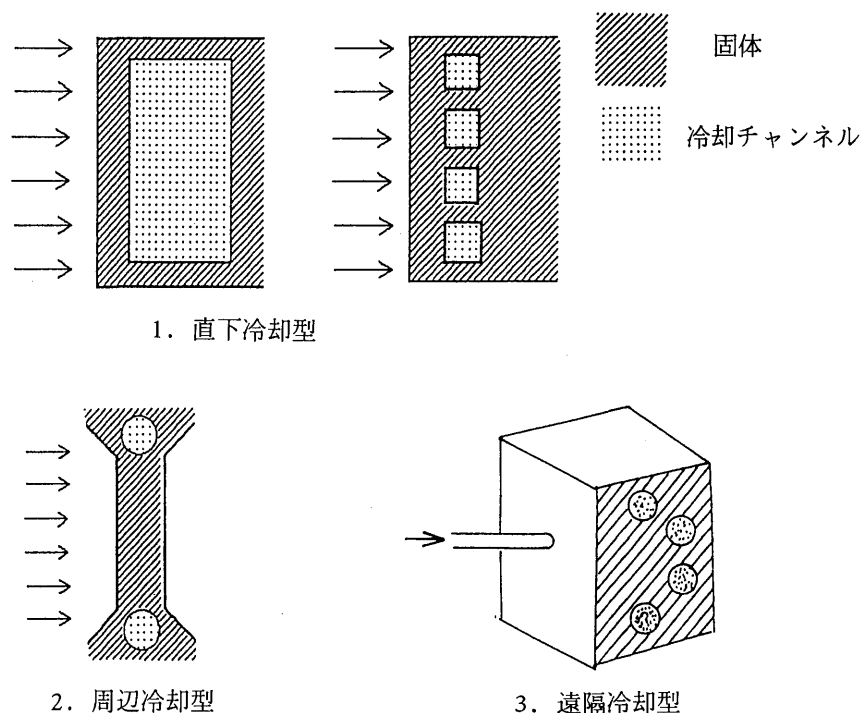


図1 放射光光学素子の冷却方式

け短くすることが必要である。一般に、単位面積当りの入射光強度を小さくするために入射光面を傾けることがよく行われるが、アブソーバーの場合、1枚当りの吸収量を一定とする条件下では、入射光に対して傾けて設置すると、かえって不利になるという一見パラドキシカルな結論が導かれる。これは、冷却部までの距離が長くなることによる。

上記の冷却方式の分類の内、第3の微小径ビームの場合は、完全に熱伝導支配となるため、入熱と表面温度との関係は、かなり簡単な熱伝導計算で概算できる。それによれば、材料を決めると、表面最高温度は、入熱 Q [W] とビーム径 d [mm] の比、 Q/d のみによって決まる。したがって、ビーム径が小さくなるほど、熱の3次元的な拡散効果が大きくなるため、単位面積当りの熱流束 q (W/mm^2) では、かなり大きな値まで許容できることとなる。

6.2 熱伝達支配の場合

支配的な熱抵抗が固体表面から冷却材への熱伝達部分である場合にも、あまり特別な名案はなく、取り得る方法は、大略以下の通りである。

- (1) 伝熱面積を増加させる。
- (2) 冷却材の流速を増加させる。
- (3) 伝熱面を粗くする。
- (4) 熱伝導率の大きな流体を利用する。
- (5) 沸騰など相変化を利用する。

よく行われる入射光に対して面を傾ける方法は、入射面の面積を増加させる方法で(1)の一種である。次に、入射光面積を一定にすると、伝熱面にフィンを用いるのが、代表的な方法である。この方法は、放射光のモノクロメータの冷却に採用されているが³⁾、最近では半導体の分野でも集積度が向上しやはり冷却が大きな問題となっているため、フィン間隔を0.5mm以下に狭くしたマイクロフィンの研究が行われている⁴⁾。フィンはある程度以上長くしても先端が冷えてしまって効果はないので、いきおい間隔をつめようとすることに

なる。むろん工作上からの限界はあるが、将来工作方法の改良によってさらに小さなフィン間隔を実現させることは有効であると考えられる。

冷却材の流速を大きくすると、熱伝達率は増加する。乱流域では熱伝達率は流速の0.8乗に比例して増加することが知られている。しかし流速を増加させると圧力損失も流速の1.75乗に比例して増加するため、おのずと限界がある。一般のエネルギープラントの場合には、熱効率の面からも流速をあまり大きくすることはできないが、放射光設備の場合にはそのような制限はないから、素子の変形が許容できる限度まで流速を大きくすることができる。なお、流れが層流の場合には、逆説的ではあるが、熱伝達率は流速には依存しない。もっとも流速が低いと流れ方向への温度上昇が大きくなるから、やはり流速をある程度大きくすることは必要である。

第3番目の伝熱面表面を粗くする方法は、一見第1番目の伝熱面積を大きくする方法と同じと思われるかも知れないが、この場合は、伝熱面に細かい粗さを与えるのみで面積自体の増加はほとんどなく、冷却材の流れを攪乱して熱伝達率を向上させる効果が利用される。熱伝達率の増加はおおよそ1.5から2倍程度で、放射光装置にも、条件の厳しいところにはもっと検討されてもよい方法であると考えられる。

第4番目については、熱伝導と熱伝達は別であると云ったことと矛盾するようであるが、熱伝導率の大きな流体を用いれば、熱伝達率もやはり大きくなる。通常流体の中では水は熱伝導率が大きく最適な流体で、これより熱伝導率の大きなものを探そうとすると、液体金属にならざるを得ない。原子炉の冷却材としてはナトリウムが用いられるが、融点が高すぎ反応性も大きいので、放射光装置ではガリウムが検討されている。ガリウム

を用いることにより、水に比しておそらく数倍程度大きな熱伝達率が得られるが、実際の利用には今後の技術開発が必要である。

第5番目の沸騰を利用する方法では、比較的簡単に高い熱伝達率が得られる。光学素子の冷却に沸騰を許容したときの問題点は、気泡発生による振動の懸念であろう。実際にどの程度振動が生じそれが許容できる範囲がどうか、実験によって確認することが望まれる。一般に沸騰熱伝達では高い熱流束の除熱が可能であるが、明確な限界点が存在する。これがいわゆるバーンアウト点で、熱流束が限界値をこえると、熱伝達は急激に劣化し、伝熱面が急上昇して破損に至る。したがって沸騰を許容する場合にはバーンアウト点の限界熱流束を、確実に把握する必要がある。

限界熱流束に関する研究や整理式も数多くあり、大略の値は予測できる。かなりサブクールを大きくとった水の強制対流沸騰の場合、設計上許容される限界熱流束は、伝熱面上でおそらく数～5W/mm²程度であると思われる。拡大伝熱面を用いれば、受光面上での熱流束はもっと大きくなる。さらに高い熱流束の除熱が必要となれば、流路内部にツイストテープを挿入する等の方法もある。

従来のバーンアウト研究は、原子炉内を想定したものが主であり、形状も条件も大きく異なるので、放射光用には相当の実験を行って確認せざるを得ない。この限界熱流束が高いという点からも、水は最適の冷却材である。最近、シリコンの線膨張率が小さくなる性質を利用するため、液体窒素による冷却も検討されているが、沸騰の発生は避けられないと思われるので、限界熱流束が大きな制約となろう。

7. あとがき

以上、筆者が本学会のご発表などを伺って気付いた点や、よくご質問を受ける伝熱関連の諸点について、ランダムではあるが述べてみた。放射光

と伝熱は従来おそらく接点を持たなかった分野であると思われる。それだけに、伝熱分野での既存の知識がお役に立ちそうであるし、また逆に我々がこれまで考えもしなかった問題が、放射光の側から提示されることもある。このようにして両者が刺激しあい、双方の発展につながれば幸いと考えている。

文献

- 1) 「伝熱工学資料 (改定第4版)」, 日本機械学会, (1986).
- 2) 「伝熱工学ハンドブック」, 日本機械学会, (1992予定).
- 3) T. Matsushita et al.: Workshop on Cooling of X-ray Monochromators on High Power Beamlines, KEK Report 88-15, (1989).
- 4) 日本伝熱シンポジウム講演論文集(第29回), A331-A334, (1992).

バックナンバー紹介

日本放射光学会特別シンポジウム予稿集 (1991年1月)

Part 1 小型光源加速器の現状と展望—リソグラフィへの出番は？

Part 2 ソ連の放射光新技術

主催 日本放射光学会 後援 電子技術総合研究所

協賛 応用物理学会

体裁 A4判 (全英文, 2分冊) Part 1 B5判, Part 2 (OHP集)

定価 Part 1, 2, とも各1,000円

内容

Part 1 Status and Prospects of Compact Synchrotrons

May we expect their turn for lithography?

Current Techniques of Lithography

1. Survey of Advanced Microdevice Technology.....S. Namba (Osaka Univ.)
2. The state-of-the-Art ULSI Fabrication Technologies.....S. Asai (Hitachi)
3. Electron-beam Patterning Techniques.....H. Yasuda (Fujitsu)
4. Recent Progress in Optical Lithography.....M. Nakase (Toshiba)

Synchrotron Radiation Lithography

5. SOR Lithography in NTT.....H. Yoshiwara (NTT)
6. X-ray Lithography for Quarter Micron Application.....J. Trube et al (IMT)
7. Low Energy Proximity X-Ray Lithography.....K. Suzuki (NEC)
8. SR Lithography at SORTEC.....N. Atoda et al (SORTEC-ETL)

Status Reports on Compact Synchrotrons

9. Development of Compact SR Rings for Industrial Use in Japan.....T. Tomimasu (ETL)
10. Present Status of Helios.....T. Ford (Oxford Instr.)
11. Super ALIS: A Superconducting Compact Storage Ring.....T. Hosokawa et al (NTT)