

実験技術

光熱量法による大強度放射光の
強度分布測定

柳原 美広

東北大学科学計測研究所

Photocalorimetric Measurement of Power Distribution
in Multipole-Wiggler Radiation

Mihiro YANAGIHARA

Research Institute for Scientific Measurements, Tohoku University

This paper presents a photocalorimetric method to measure intensity of high-power synchrotron radiation with the experimental results. The calorimetric device consists of a photoabsorber, a heat conductor, both are monolithically made from a copper block, and a water-cooled heat sink. Based on the temperature gradient along the heat conductor measured at a stationary state the incident power was evaluated. Power density distribution in multipole-wiggler radiation was measured on the beamline BL-28 of the Photon Factory. The beamline had neither beryllium nor graphite windows, which allowed exact comparison between measured powers and calculated values using Kim's formula for undulator radiation. Although the measured density was lower by on an average 20% at the peak density, it was ascertained that Kim's formula gives the power density of multipole-wiggler radiation. Besides, the photocalorimetry was found to be useful means for measuring high-power x-radiation.

1. はじめに

放射光光源は今日第三世代を迎え、高輝度化が益々進み、新しい放射光物理の展開の糸口になることが期待されている。それは一方で、強度 $100\text{W}/\text{mm}^2$ を越すと予想されるビームを扱うことを意味し、ビームライン光学素子にとっては極めて過酷な時代を迎えている。しかし、光源の優れ

た特性を活かすも殺すも偏に光学素子に負っており、系統的な研究に基く開発が今日ほど望まれている時は無い。大型光源の建設が進む中で、各国では地道な研究が続けられている¹⁾。筆者は現在軟X線多層膜の開発とそれらの放射光実験への応用を一つの目標にしている。その一環として二結晶型軟X線分光器や光CVD用パワーフィルター²⁾

への応用を考えている。これらに用いる多層膜が要求される共通点は言うまでもなく放射光の高い熱負荷に対する耐久性である。一般に耐熱性光学素子の開発には素子を実際に大強度放射光に晒す照射テスト³⁾が不可欠である。このとき入射するビームの全強度、或はパワー密度は照射面の温度と共に照射効果を正確に見積もるための重要な実験条件の一つである。そこで入射ビームの強度を高い精度で測定する方法を開発しようというのがこの仕事を始めた直接の動機である。実際の測定はフォトンファクトリーにおいてBL-12Cの偏光電磁石からの放射光⁴⁾とBL-28のマルチポールウィグラー光⁵⁾について行なった。本稿はこのうちBL-28での経験を中心にして述べようと思う。ところで、アンジュレータから放射されるパワーの角度分布についてはKimの式⁶⁾がよく知られている。また最近では北村ら⁷⁾がビームのサイズや発散を考慮してより精度を高めた計算を行なっている。測定するビームラインの途中にベリリウムやグラファイト窓、或は振り分けミラーがなければ、直接測定値と計算値が比較できる。そこで両者を比較することでそれぞれの妥当性を検討することや、アンジュレータについての情報を得ることが期待できる。

2. 光熱量測定法

強力な放射光の強度を測定するにはどのような方法が優れているだろうか？その測定法が満たすべき条件は次の3点に集約される。

- 1) もともと強力な光に晒されるので増倍機構は不要である。むしろ、高エネルギー光の照射損傷に耐えられる頑丈なものでなければならない。
 - 2) 照射効果を見積もるときのパラメータにするのだから入射光の光子数よりもエネルギーを観測するものである。
 - 3) できるだけ短時間で高精度の測定が可能で、且つ装置も単純なものに越したことはない。
- このような要請から考案されたのがこれから述べ

る光熱量測定法である。測定子は銅でできた光吸収体、熱伝導体、及び熱浴から成り立っている。光吸収体に吸収された光エネルギーは熱エネルギーに変換され、熱伝導体を通して熱浴に流れていく。吸収体での損失が無視できる時は吸収されたエネルギーは全て熱伝導体を通ずるから、定常状態では2点間の温度差と熱伝導度から熱流量を見積もることができる。熱伝導体の熱伝導度を k 、断面積を a 、2つの熱電対間の距離を l 、その温度差を ΔT とすると、熱伝導体を流れる熱量 Q はよく知られている熱伝導の式、

$$Q = ka \frac{\Delta T}{l} \quad (1)$$

で与えられる。

入射した光エネルギーの損失が少なく、それがどの程度熱エネルギーに変換されるかについては十分な検討が必要である。この点について本方法が優れているのは次の点である。

- 1) 銅のX線に対する反射率は概ね 10^{-3} 以下である⁸⁾。
- 2) 銅の光電子放出効率は無視できないが、光電子の運動エネルギーは入射光のエネルギーに比べて極めて小さいので無視できる。
- 3) 銅の放射率は赤外領域では約0.01なので⁹⁾、素子の表面が鏡面に近い仕上げのときには放射熱損失は無視できる。

以上みたように、反射、光電子、熱放射によるエネルギー損失は無視できるほど小さい。しかし、注意しなければならないのは、8.98keV以上の入射X線成分の励起による銅のK系列X線発光を通じた損失である。銅のK発光量子効率は約0.5である¹⁰⁾。二次的に放出されるK発光の空間分布は放射面の法線方向が最も強い。2次X線が再び吸収された場合にはもはや3次的なX線発光は無視できるので、この2次X線をいかに吸収体に閉じ込めるかにかかってくる。今回は吸収体の内側を円錐状にし、その頂角をできるだけ小さくするこ

とにした。

入射パワーを(1)式を使って計算する上で注意した点は銅の熱伝導率の値である。文献(9)から $3.89\text{W}/(\text{cm}^\circ\text{C})$ を用いたが、これは純度99.9%の銅についてのデータで 350°K に内挿して得たものである。厳密には熱伝導率は温度に依存するが、銅の材料によって約2%のばらつきがあり、温度依存性と同程度であるので、測定された平均的な温度での値を用いることにした。

3. 測定

初めに、測定に利用したPFのBL-28について簡単に説明する。ここには楕円偏光発生用のマルチポールウィグラーが設置されている¹¹⁾。磁極間ギャップを最小の30mmにした場合、リング電流が350mAの時に発生する全強度は計算では2.56kWに達する。測定を行なった直進ビームラインの途中には窓やミラーはない。測定に用いた照射テスト槽¹²⁾は光源から約16.5mの地点に設置されている。

測定は入射ビームの全強度とその密度分布について行なった。それぞれの測定に合わせて測定ユニットを2種類製作した。2つのユニットは基本的には光吸収体、熱伝導体、及び水冷による熱浴からなっている。熱伝導を良くするため光吸収体と熱伝導体は純度99.9%の銅のブロックから旋盤を用いて一体仕上げで作製した。アルメルクロメル熱電対が2箇所につけられている。その熱電対は直径0.3mmのものを選んだ。一方、両者の主たる違いは各部の肉厚、太さであり、これは入射するエネルギーを基準にして決定した。具体的な説明は個々の測定のところで行なうこととし、以下で強度分布、全強度測定の順で述べていく。

3.1 強度分布の測定

強度分布測定用のユニットの断面を図1に示す。光吸収体は開口部が80mm×40mmの楕円錐で、頂角は最も小さいところで約30°で、その肉

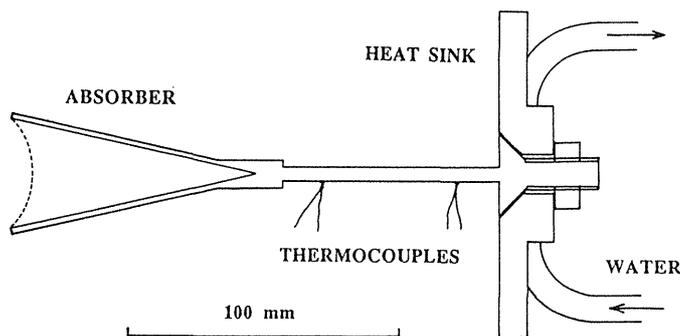


Fig. 1 Cross section of the photocalorimetric device for power distribution measurement. (From Ref. 5)

厚は2mmである。また、熱伝導体の直径は5mmで、熱電対間の距離は50mmにとっている。強度分布を測定する場合は実際にはユニットは固定したままで、ユニットの上流で光源から14.1mの地点にある縦0.8mm横1.6mmのスリット(実際には4象限スリットで形成)を上下方向に動かしながら通過した光の強度を測定した。測定はウィグラーの磁極間ギャップが30mm(K値で14.7)と60mm(同7.66)の2つの場合についてリング電流が概ね300mAの時に行なった。2つの熱電対が記録した最も高い温度はやはり最小ギャップの時点で 83.8°C と 40.6°C で、これから計算される入射パワーは6.78Wである。このときの吸収体の照射点に当たる部分は局所的には 83.8°C より高いはずで、おそらく 100°C より高くなっているであろう。熱電対の出力はペンレコーダで観測し、温度が一定になったと判断された時点で測定した。一定の状態になるまでに40分から60分かかった。これだけ時間がかかったのはユニットのサイズに原因がある。熱伝導体の断面積に比べて光吸収体の容量が大き過ぎたためである。それは次に述べる全強度測定用ユニットと比較すると良くわかる。熱浴の冷却水の温度上昇はこの場合はっきりとは認められなかった。入射パワーは高々6~7Wなので、熱浴の負担は問題にならなかったのである。真空槽の真空度は 7×10^{-9} Torrで、照射中は 1×10^{-8}

Torrであった。図2と3に磁極間ギャップが30mmと60mmの場合の測定値を●で示す。いずれもリング電流300mAの場合に換算してある。実線はKimの式を使って得られた計算値である。ビームサイズを考慮した場合にはこれより5%ほど低くなる。パワー密度の最高値で~15%から~25%測定値の方が低い。測定の誤差~5% (4象限スリットの中の設定に伴うもの) を考慮してもこの差は明白である。一方、鉛直方向の全範囲で測定しなかったため(時間不足のため)ははっきりしたことは言えないが、半値巾は約10%広がっているとみられる。両者の間のこのような差はビームサイズだけでは説明が難しく、銅のK発光による損失の他にウィグラーの装置そのものの不完全性を反映しているとも考えられる。今後の精密な測定による解明が必要であるが、ともあれ、今回紹介している簡便な方法でかなり正確に強度が測定できることがわかっていただけたと思う。一方、またKimの式もアンジュレータ光のパワーを見積もる

上では十分な精度で与えてくれることが確認できた。なお、測定値で-5mm付近の値が殆ど0に近いが、これはユニットの上流にある縦8mm横13.2mmの散乱光防止用の水冷マスクに入射光の一部がかかっているためである。ちなみに、水平方向の分布については、このダイアフラムの範囲内では大きく変化しなかったため詳しい測定は省いた。

3.2 全強度測定

最後に全強度測定について述べる。全強度と言ってもウィグラー光の全パワーを受け取るわけではなく縦8mm横13.2mmの水冷マスクを通過する光について測定したものである。図2や図3からわかるように、縦方向は大部分の光を受けているが、横方向に関してはかなり切っていることになる。しかし、通常の光学素子が受けるビームサイズもこの程度であるので全強度と表現したわけである。時期的にはこの測定の方が密度分布測定より

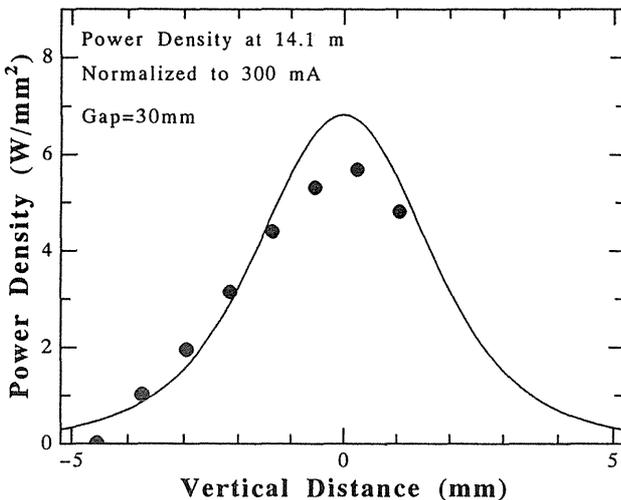


Fig.2 Power density distribution of x-radiation from the BL-28 multipole wiggler of the Photon Factory measured at a distance of 14.1 m for the magnet gap of 30 mm. The solid circles and the curve show, respectively, the measured data and those calculated using Kim's formula, both are normalized to a ring current of 300 mA. (From Ref. 5)

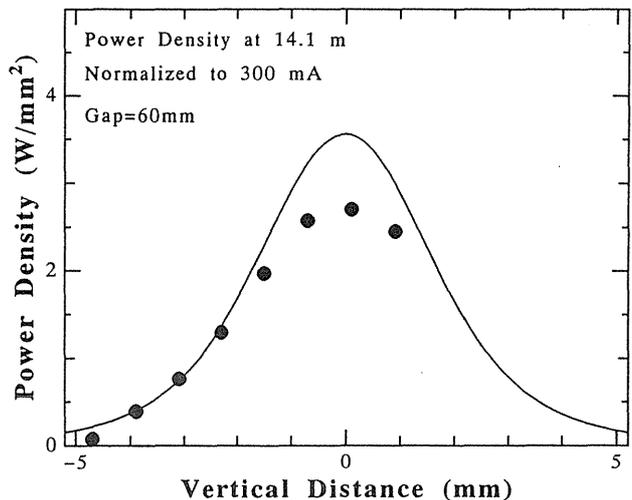


Fig.3 Power density distribution of x-radiation from the BL-28 multipole wiggler of the Photon Factory measured at a distance of 14.1 m for the magnet gap of 60 mm. The solid circles and the curve show, respectively, the measured data and those calculated using Kim's formula, both are normalized to a ring current of 300 mA. (From Ref. 5)

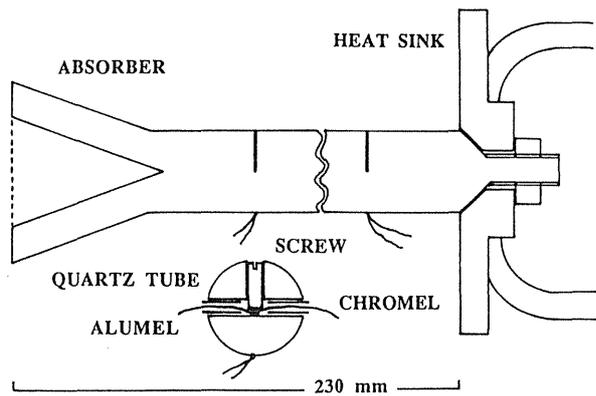


Fig. 4 Cross section of the photocalorimetric device for total power measurement. In the bottom is shown a schematic drawing of the thermocouple fixed inside the rod. (From Ref. 5)

早く行なったのであるが、後で見るように計算値との差が明白だったので、密度の測定にまで及んだ次第である。この時用いたユニットの断面を図4に示す。光吸収体の開口部は直径4cmの円で、頂角40°の円錐で、その肉厚は12mmである。熱伝導体は直径30mmであり、2つの熱電対を100mm離して熔着した。また、熱伝導体の断面内での温度の均一性を確認するため、図4の挿入図のように別の1組の熱電対の接点を軸の中心にM2のねじで固定した。熱電対ケーブルは直径2mmの孔に石英細管で絶縁して通した。

測定は磁極間ギャップが30mm、45mm、60mmの3つの場合について行なった。熱電対で測定した最高の温度はやはりギャップが30mmのときで、リングの電流が294.5mAのとき195.1°Cと98.7°Cを記録した。このときのパワーは270.6Wに達する。定常状態になるまでに約20分かかった。上に述べた1組の熱電対で熱伝導体の中心と表面の温度の差を調べたところ、違ってもせいぜい0.4°Cで、軸に垂直な平面内では温度は均一であることが確かめられた。これは(1)式が厳密に適用できることを保証している。図5に■で測定結果を示した。ここでは測定値を縦軸に、それに対応する計算値を横軸にとった。計算値より~13%

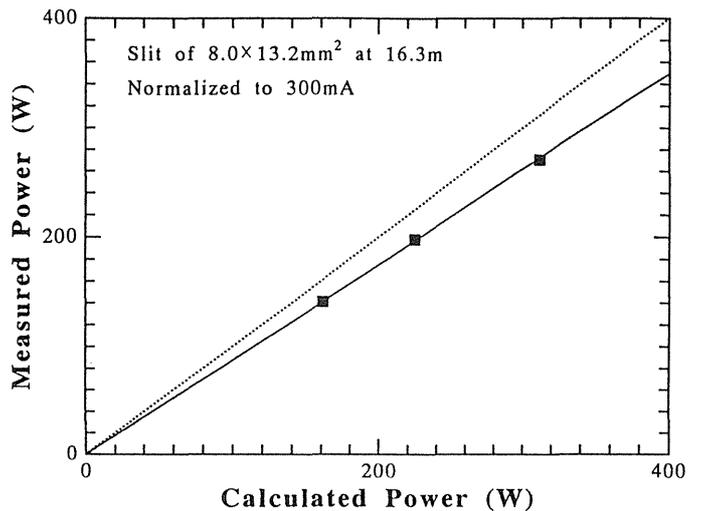


Fig. 5 Plots of measured power versus calculated power of radiation from the multipole wiggler of BL-28 of the Photon Factory, passing through an aperture of $8.0 \times 13.2 \text{ mm}^2$ at a distance of 16.3 m, for the magnet gap of 30, 45, and 60 mm. They are normalized to a ring current of 300 mA. (From Ref. 5)

低い直線上にのっている。この値は先に述べた強度分布の積分と誤差の範囲でよく一致している。また3つの測定値が原点を通る直線上にのことは磁極間ギャップが最小のときでも放射による熱エネルギー損失の影響が微小であることを示唆している。

4. おわりに

ここで紹介した熱量測定法が大強度放射光の強度測定にかなり効果的であることがわかっていただけたと思う。ビームラインの途中にベリリウムやグラファイト窓、或は振り分けミラーがなければKimの式で充分予測できるが、ある場合にはそれらの効果を入れて計算しなければならない。しかし、データの不足もあって見積もりが必ずしも信頼できない時は測定してみる以外に方法は無く、そのような時に本方法が威力を発揮するだろう。

この方法で短時間で精度の高い測定をしようとするなら、設計の段階で各部のサイズを充分検討

しておく必要がある。温度差 ΔT を大きくして精度を上げるためには(1)式からもわかるように熱伝導体を断面積を小さくして長くすれば良い。しかし、こうすると定常状態に達するまでに時間がかかってしまうので問題である。むしろ、逆に太く短くした方が吸収体の温度上昇も抑えることができるので良さそうである。予想される入射強度を予め見積もって、それに対して ΔT が 10°C 前後になるように設計するのが適当であろう。太さと長さの関係で末端効果に影響されないように熱電対の取り付け位置には注意すべきである。熱吸収体の形状についても一言付け加えたい。今回は製作の容易さを優先させて円錐形にしたが、空洞を形成することを考えれば、入口にビームの入射を妨げない程度のダイヤフラムはあった方が良くだろう。また、吸収体の肉厚は薄過ぎては硬いX線は通過してしまうが、熱容量とのかねあいから必要以上には厚くしない方が良い。

本方法が使えるのは本稿の最初のところで述べたような条件を満足する場合であり、測定を試みたPF BL-28のマルチポールウィグラー光はちょうどこの条件にあてはまる光源であった。しかし、放射光スペクトルがずっと高エネルギー側にシフトする光源ではそのまま透過してしまう硬X線成分の割合が問題になるであろうし、低エネルギー光源では反射損失が無視できない真空紫外光や可視光の占める割合が問題になるであろう。前者については光吸収体の肉厚を厚くし、後者については光吸収体の内面を粗く、できれば黒く仕上げて反射損失を抑えるなどの工夫が必要である。また、そもそも本方法は高強度光に対して用いることを前提としており、強度の弱い光に対して用いるには感度を上げる工夫が必要である。例えば、吸収体からの放射熱損失を防ぐために、周り

にシールドを取り付けてヒータで加熱し、温度差ができるだけ小さくなるように制御することなどが挙げられる。

謝辞

本文で述べた測定は高エネルギー物理学研究所放射光実験施設の前沢秀樹教授、浅岡聖二技官と協力して行なった。またウィグラー光の強度計算は東北大学科学計測研究所大学院生後藤良則君が行なった。ここで深く感謝の意を表したい。

文献

- 1) 例えば, A. K. Freund, G. Marrot, H. Kawata, St. Joksch, E. Ziegler, L. E. Berman, and J. B. Hastings: *Rev. Sci. Instrum.* **63**, 442 (1992), 及び, 同書中の文献。
- 2) M. Yanagihara, M. Yamamoto, A. Arai, J. Cao, and T. Namioka: *SPIE Proceedings Vol.984*, 228 (1989).
- 3) M. Yanagihara, K. Mayama, S. Asaoka, and H. Maezawa: *SPIE Proceedings Vol.1739*, 615 (1992).
- 4) M. Yanagihara, T. Maehara, S. Gunadi, M. Asano, and T. Namioka: *Appl. Opt.* **31**, 972 (1992).
- 5) M. Yanagihara, Y. Goto, S. Asaoka, H. Maezawa, and H. Sugawara: *SPIE Proceedings Vol. 1739*, 282 (1992).
- 6) K. Kim: *Nuc. Instrum. Methods* **A246**, 67 (1986).
- 7) 詳細は北村英男教授(高工研)にお尋ねください(プログラム名:SRCP)。
- 8) H. -J. Hagemann, W. Gudat, and C. Kunz: *DESY-rep. SR-74/7* May 1974.
- 9) Y. S. Touloukian, ed. *Thermophysical Properties of High Temperature Solid Materials* (Macmillan, 1967).
- 10) V. O. Kostroun, M. Chen, and B. Crasemann: *Phys. Rev.* **A3**, 533 (1971).
- 11) H. Kitamura, Y. Kamiya, H. Kobayakawa, T. Koide, M. Kihara, and M. Kobayashi: *KEK Rep.* 89-24, 297 (1990).
- 12) S. Asaoka, H. Maezawa, Y. Kamiya, and M. Yanagihara: *Rev. Sci. Instrum.* **63**, 473 (1992).