

A beam-profile diagnosis algorithm using a thin foil and a thermographic camera

^AKen Katagiri, ^ASatoru Hojo, ^AMasao Nakao, ^BToshihiro Honma, ^AAkira Noda, ^AKoji Noda
^A National Institute of Radiological Sciences
4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba 263-8555, Japan
^B Accelerator Engineering Corporation, Ltd.
3-8-5 Konakadai, Inage, Chiba 263-0043, Japan

Abstract

A new algorithm for digital image processing apparatuses is developed to evaluate profiles of high-intensity DC beams from temperature images of irradiated thin foils. Numerical analyses are performed to examine the reliability of the algorithm. To simulate the temperature images acquired by a thermographic camera, temperature distributions are numerically calculated for various beam parameters. Noise in the temperature images which is added by the camera sensor is also simulated to account for its effect. Using the algorithm, beam profiles are evaluated from the simulated temperature images and compared with exact solutions. We confirm that the algorithm is adaptable over a wide beam current range of approximately 0.1–40 μA , even when employing a general-purpose thermographic camera with rather high noise ($\Delta T_{\text{NETD}} \approx 0.3 \text{ K}$; NETD: noise equivalent temperature difference).

サーモグラフィックカメラと薄膜を用いたビームプロファイル診断の ためのアルゴリズムの開発

1. はじめに

サイクロトロン加速器を備える RI(Radio-Isotope)生産施設の照射システムにおいて、ターゲットの健全性を保つ為にターゲット上流のビーム分布の診断が必要となる。このために、シンチレーションスクリーンやワイヤーモニター等のプロファイルモニタが一般的に用いられてきた[1]。RI 生成で用いられる大電流・直流ビームの診断をする際には、シンチレーションスクリーンはいくつかの問題を持つ。撮像に用いられる CCD 素子が中性子線により損傷され易いこと、蛍光板がビーム加熱により溶解すること等である。また、ワイヤーモニターに関しても、ビーム形状が中空形状である場合には、正確にその分布を測定出来ないことが問題として挙げられる。RI 生成現場での安定した正確なビーム診断のためには、これらの問題を改善した新しいモニタが必要となる。

この背景のもと、ビームライン上に置いた薄膜と、その温度分布を測定するためのサーモグラフィーを用いてビーム分布を正しく評価する方法を検討した。サーモグラフィーの撮像素子である非冷却型マイクロボロメーターは中性子線に耐性があることが確認されており[2]、RI 生成現場で

の安定した診断システムとして期待ができる。この温度分布からビーム分布を導出するために、新しいアルゴリズムを開発した。RI 生産を行う加速器照射システムでは、照射ターゲット部とビーム輸送ラインの圧力差を保つために、その間に薄膜が必ず設置される。本方法では、この薄膜の温度分布情報を用いる事を想定している。

サーモグラフィーで測定した温度分布には、センサーによって加えられたノイズが含まれる。このノイズを含む温度分布から、開発したアルゴリズムを用いて正しくビーム分布の導出が出来るかどうかを確かめる為に、数値解析を行った。サーモグラフィーによって得られるノイズを含む薄膜の温度分布を、シミュレーションによって模擬した。この模擬温度分布から変換アルゴリズムを用いてビーム分布を導出し、その結果を厳密解と比較した。これらの結果から、この変換アルゴリズムの性能を議論する。

2. 変換アルゴリズム

本アルゴリズムは、イオンビームにより加熱された十分に薄い膜の温度分布が 2 次元分布であることを利用し、サーモグラフィーで撮影したその温度分布から熱源であるビーム分布を導出する。サーモグラフィーを用いた薄膜温度測定システムの模式図を図 1 に示

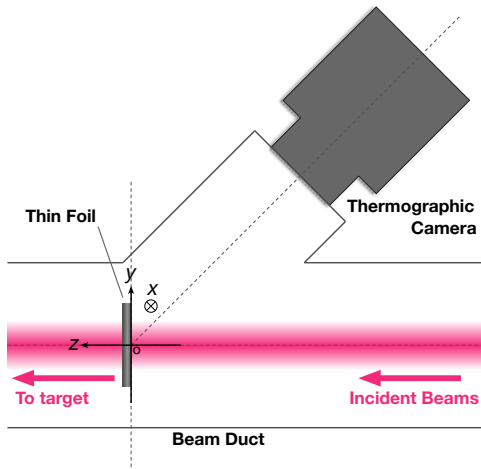


FIG. 1: A thin foil and a thermographic camera for temperature distribution measurement.

す。このアルゴリズムは、FPGA、DSP 等のデジタル演算器に実装して用いることを想定し、シンプルに構築されている。

ビームの電流が一定で、薄膜が十分に薄く個々の入射イオンのエネルギー損失量 ΔE が z 軸方向(ビームの進行方向)で一様である場合には、温度分布 $T(x,y)$ と熱源 $S(x,y)$ の関係は、以下の 2 次元定常熱伝導方程式により定まる:

$$\frac{\partial^2 T(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x,y)}{\partial y^2} = -S(x,y)/\lambda(T). \quad (1)$$

ここで、 $\lambda(T)$ は、温度に依存する熱伝導率である。式(1)の 2 階微分に中心差分法を適用し、 $S_{i,j}$ について解くと以下の様になる:

$$S_{i,j} = -\lambda_{i,j} \left\{ \frac{T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{T_{i,j+1} - 2T_{i,j} + T_{i,j-1}}{\Delta y^2} \right\}. \quad (2)$$

添字の i,j は、離散空間における x, y 座標をそれぞれ表し、また $\Delta x, \Delta y$ は離散空間で分割されたセルの x, y 方向の 1 辺の長さをそれぞれ示す。 $T_{i,j}$ 、 $S_{i,j}$ は、点 (i,j) にあるセル上の温度、熱源である。式(2)は、点 (i,j) の熱源は、その点とその周り 4 点の温度より求まることを示す。熱源からビーム分布へは、次の関係を用いて行う:

$$I_{i,j} = q S_{i,j} l_z / \Delta E. \quad (3)$$

但し、 q はイオンの電荷、 l_z は薄膜の厚さ、 ΔE はビームを成す個々のイオンの薄膜中におけるエネルギー損失である。

以上の温度分布からビーム分布への変換法と、ノイズ除去のための平均化およびフィルタリング法を組み合わせ変換アルゴリズムは構成される。このフローチャートを図 2 に示す。

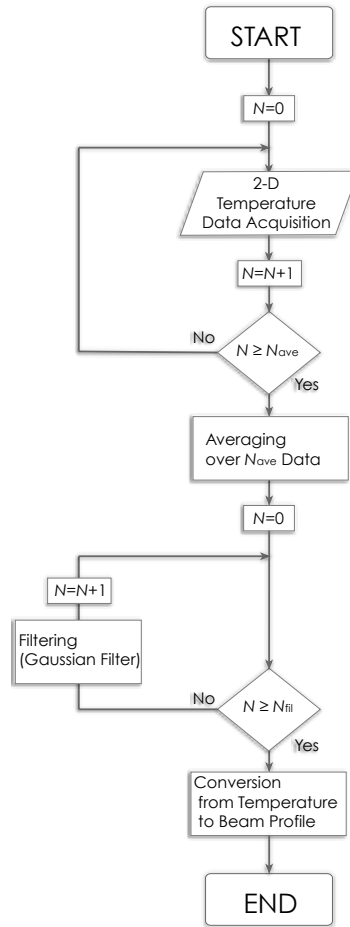


FIG. 2: Flowchart of the algorithm.

3. 数値解析法

サーモグラフィーによって得られる温度分布を

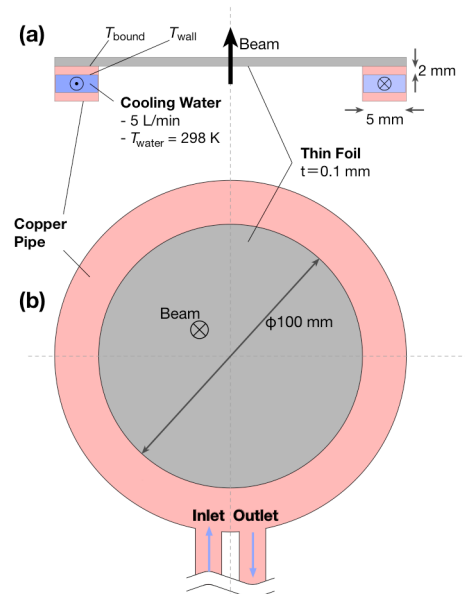


FIG. 3: Schematic diagram of the thin foil and the cooling pipe: (a) a cross section, and (b) a bottom view.

模擬する為に、ビームのパラメーターを決めた上で、式(1)を数値的に解いた。図3に計算で考慮した薄膜、及びその冷却系の模式図を示す。φ100 mmの領域を200×200のセルで離散化し、有限差分法により計算を行った。温度分布に加えるノイズは、その振幅が正規分布であると仮定し、 $2\sigma = \Delta T_{\text{NETD}}$ となるように擬似乱数を用いて決めた。この ΔT_{NETD} (NETD: noise equivalent temperature difference)は、ノイズの振幅に相当する温度の広がりを示したものであり、サーモグラフィーの性能に依存する。本解析では、比較的ノイズの大きい汎用のサーモグラフィーの使用を想定して、 $\Delta T_{\text{NETD}} = 0.3 \text{ K}$ とした[3]。

以上のシミュレーションにより得られた温度分布を、図2で示されたアルゴリズムを用いてビーム分布に変換した。その結果を、あらかじめ決められた厳密解と比較した。

4. 結果と考察

図4に、平均化、フィルタリングを行わずに、式(2)で示される変換法のみを用いて導出したビームプロファイルを示す。入射ビームとして、20 MeV、20 μA、ビーム径 $2\sigma = 10 \text{ mm}$ のプロトンビームを考慮した。また、薄膜は厚さ100 μmの銅箔とした。図4(a)で

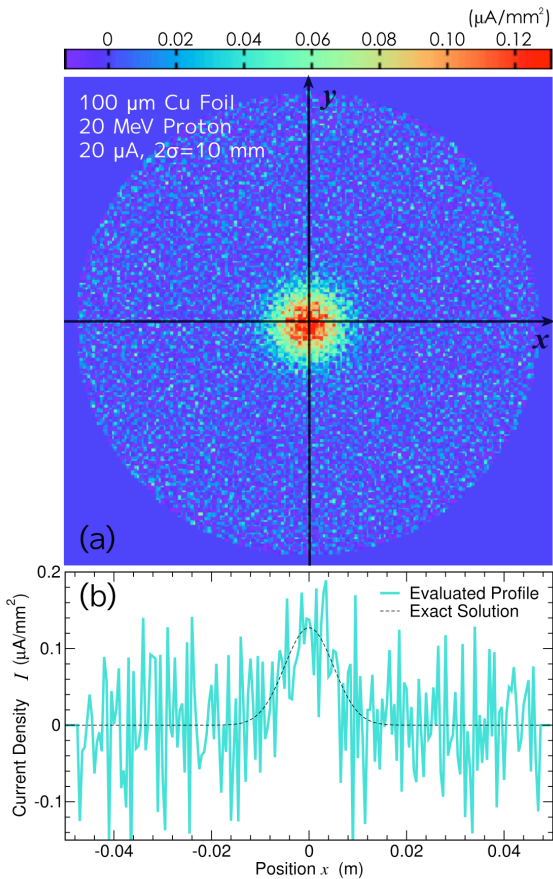


FIG. 4: (a) Converted beam profile without any averaging and filtering procedures; (b) Comparison between the converted beam profile and the exact solution along the x-axis.

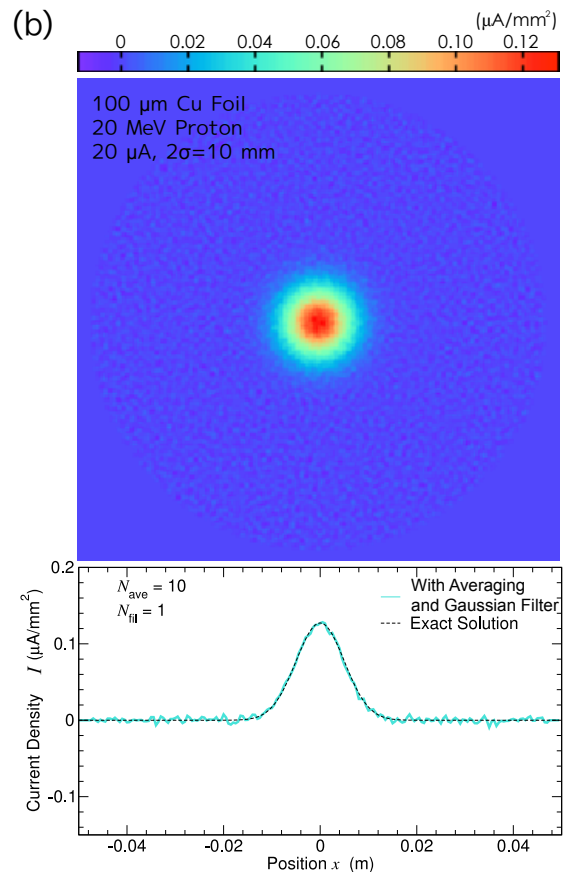
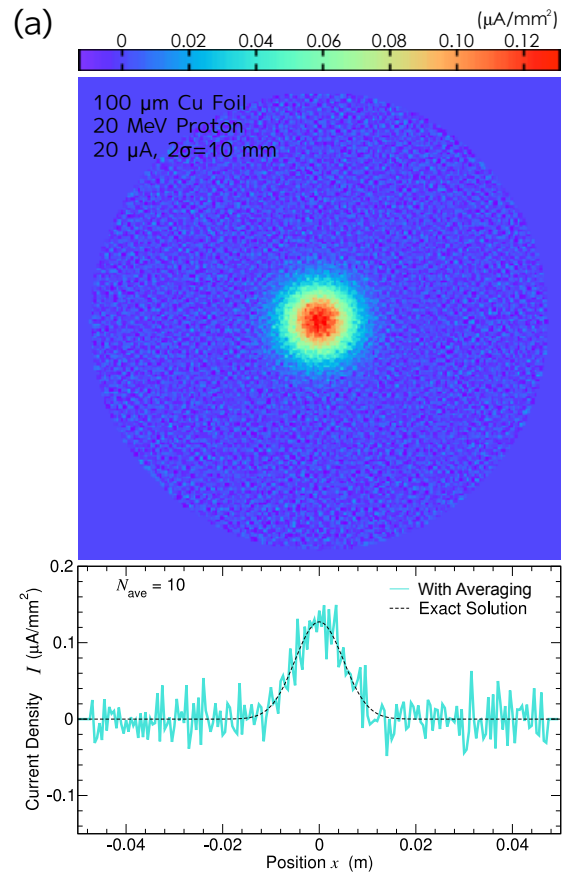


FIG. 5: Converted beam profile using (a) averaging procedures, and (b) averaging procedures and one-time filtering.

の 2 次元分布からは、ある程度のビーム形状を判断する事が可能であるが、ノイズが目立つ。このノイズは、変換前の温度分布から伝搬して生じたものである。図 4(b)に示す通り、ノイズの振幅とビーム分布の強度が同程度である。したかつて、ビーム分布の正確な測定のためには、温度分布上のノイズの除去が必要であることが分かる。

図 5(a)は 10 枚の温度分布を用いて平均化した後に変換法を用いて導出したビーム分布、図 5(b)は、10 枚の温度分布を用いた平均化し、さらに 1 回のフィルタリングを行った後に変換法を用いて導出したビーム分布である。平均化のみでは残るノイズをフィルタリングによって効果的に除去出来ることが確認出来る。また、変換されたビーム分布は破線で示す厳密解を十分よく再現出来ていることが確認出来る。今回考慮した $2\sigma = 10 \text{ mm}$ のビームに対して、薄膜上の温度分布の幅は $2\sigma \approx 30 \text{ mm}$ となり、3 倍程度広がった分布が観測された[4]。したがって、正しくビーム分布を正確に検証する上で、今回開発したアルゴリズムは非常に有用であると考えられる。

5. まとめ

ビームライン上に置かれた薄膜の温度分布をサーモグラフィーにより測定し、その温度分布からビーム分布を導出する為のアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムは新たに考案された変換法と平均化法、及びフィルタリング法から構成される。このアルゴリズムを用いる事で、比較的ノイズの大きいサーモグラフィー($\Delta T_{\text{NETD}} \approx 0.3 \text{ K}$)を用いた場合でも、 $20 \mu\text{A}$ 程度のプロトンビームに関しては十分正確に分布を診断できることが確認された。

参考文献

- [1] P. Strehl, "Beam Instrumentation and Diagnostics" (Springer, Berlin-Heidelberg, 2006).
- [2] M. Takada, S. Kamada, *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A, 689 (2012) 22.
- [3] F. Niklaus, C. Vieider, *et al.*, Proc. of SPIE, 6836 (2007) 68360D-1.
- [4] K. Katagiri, S. Hojo, *et al.*, Rev. Sci. Instrum., Submitted.