照射位置で様なビーム強度を得るための ビームレット偏向の最適化

正 員 松 岡 守 (原 研)

Optimization of Beamlet Steering for Flat Beam Intensity at a Target Surface
Mamoru Matsuoka, Member (Japan Atomic Energy Research Institute)

Flat beam intensity at a target surface is required to study high heat flux materials. An optimum beam steering for this purpose is formulated and then numerically solved for the case that a multi-aperture ion source is used. It is found that the optimum distribution of the beam axes at the target surface is discrete when the beam divergence is comparable with the required flat width. The distribution gradually becomes continuous as the required width is enlarged.

キーワード：ビーム偏向，イオン源，高熱負荷試験装置，イオン注入装置，極値問題，改訂マルカート法

1. はじめに

トカマク装置の第一壁など，高熱負荷受熱機器の開発のために使用される電子ビーム，あるいはイオンビーム照射装置⁽¹⁾⁽²⁾においては，なるべく高い熱負荷まで照射可能であること，低熱負荷から高熱負荷まで任意の値に設定可能であることに加えて，必要な照射範囲で熱負荷が様であることが望ましい。ビーム強度の様性は表面組成を変えるためのイオン注入装置の場合も必要とされる。この目的のために，電子ビームの場合はビームを磁氣的に走査する方法が採用されている。これは電子ビームの場合，電子の質量が軽いためにビーム電流密度，従ってビーム強度を高くとれることから，電極孔が単一もしくは少数個でよいこと，およびビームの発散が小さく，必要な照射範囲よりもビーム径のほうが通常十分小さいことによる。

一方，正イオン源を用いる場合は，電子ビームほどビーム発散を小さくすることはできないのでビームを走査するのは適当でない。一例として，炭素系の材料を照射する場合を考える。この場合，被照射材の蒸発などの影響によるイオン源の耐電圧劣化を避けるために，被照射材をイオン源からある程度離しておく必要がある。例えば，この距離を2m，イオンビームの発散をビーム強度が $1/e$ となる幅で ± 1 度とすると，イ

オンビームは照射位置で ± 3.5 cmの広がりをもつ。これは被照射材と同程度から数分の一のスケールである。そこでイオンビームを用いる場合は，電極の広い範囲に多くのビーム引出し孔を開け，断面積の大きいビームを引出すことによって様な強度のビームを得ることが行われている。この場合問題となるのは，ビーム発散と照射範囲とが同程度のスケールのため，単純な平行ビームでは各ビームレットの重なりにより，照射範囲の中央部分でビーム強度が大きい山なりの分布になってしまうことである。もちろん，必要な照射範囲に比べて十分広い範囲にビームを照射し，その中央部分を利用すれば様なビーム強度を得られるわけではあるが，これではビームの利用効率が悪い。そこで，必要最小限の範囲にビームを当てて，かつビーム強度が様となるようにビームの向きを決める工夫が要される。概念的には，照射範囲の周辺に多少多めにビームを向ければ様なビーム強度分布を得ることができるはずである。なお，各電極孔ごとのビーム（ビームレット）を特定の方向に向ける方法としては，電極を湾曲させて各電極孔を所定の向きに向ける方法⁽³⁾，および各電極は平面のままとし，電極孔の中心軸を電極間で相互にずらすことによるビームレット偏向の方法⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾がある。これらのビーム偏向法は，これまで多孔電極からのビームを一点に収束させてビー

ム強度を上げたり、プラズマを加熱する中性粒子ビーム入射装置のように幅の狭いビームダクトを介してビームを入射する必要がある場合に利用されてきている。

高熱負荷試験装置としては、ビームの非一様性が5%以下程度であればよい。この程度の精度の一様性であれば、照射位置で一様なビーム強度を得るための最適なビームの向きの分布を、ビーム軌道計算コードを用いてトライアンドエラーで求めることも可能ではある。しかし、これでは条件が変わるたびに再計算を行う必要があり見通しが悪いので、数学的により良い取扱い方がないか検討した。以下、第2章ではこの問題を定式化し、第3章でこれを数値的に解いた。第4章で考察をし、最後にまとめを記した。

2. 問題の定式化

簡単のため、電極間の一方向だけに着目して一次元的に考える。図1で $z=0$ がイオン源の電極面、 $z=l$ が被照射材の置かれる位置である。イオン源の電極孔のあいている範囲を $-a_l \leq x \leq a_l$ 、被照射材の幅、すなわちビーム強度を一様にすべき範囲を $-a_r \leq x \leq a_r$ 、またこの範囲でビーム強度が一様であるようにするために、ビーム軸を向ける範囲を後者の範囲より両方向に、更に δ_r だけ広い範囲とする。ビームレットの発散がガウス分布であるとする、照射位置におけるビーム強度はこのガウス分布の重ね合せである。照射位置で $x=a$ を通るビーム軸の一つのビームレットによる、ビームの照射位置における強度分布は

$$b(x) = c_b(a) \exp \left[- \left(\frac{x-a}{r} \right)^2 \right] \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 $c_b(a) : x=a$ をビーム軸とした一つのビームレットの強度、 r : ターゲットにおける長さで表したビームレットの発散

ここで、ビームレットの偏向角度 θ の絶対値が大きいと r が θ の関数となり、更にはガウス分布で近似できなくなるので、 θ の絶対値は小さいとした。こ

図1 電極面と照射面の関係
Fig. 1. Geometry of electrodes and a target.

れは前章に示した例で、電極孔のあいている範囲も被照射材の幅と同程度とするとオーダとして $\theta \sim 3.5 \text{ cm/2 m} = 17.5 \text{ mrad}$ と小さく、十分良い近似である。多孔型イオン源のビームの出発点は多くの電極孔であり、離散的であるが、電極孔の並びが十分細かいとして空間的に連続であると考ええる。するといろいろな方向を向いたこれらのビームレットのうち、ビーム軸が照射面の $x=a$ に交差するものの密度分布 $c(a)$ は、 x について連続的に定義された関数となる。この関数を用いるとすべてのビームレットの寄与を合成した照射面におけるビーム強度分布は次式で与えられる。

$$i(x) = \int_{-a_r - \delta_r}^{a_r + \delta_r} c(a) \exp \left[- \left(\frac{x-a}{r} \right)^2 \right] da \dots \dots \dots (2)$$

この式で

$$\left. \begin{aligned} \frac{x}{r} &= X, & \frac{a}{r} &= A \\ rc(x) &= C(X), & i(x) &= I(X) \\ \frac{a_r}{r} &\equiv A_r, & \frac{\delta_r}{r} &\equiv \Delta_r \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3)$$

と規格化すると

$$I(X) = \int_{-A_r - \Delta_r}^{A_r + \Delta_r} C(A) \exp \left[- (X-A)^2 \right] dA \dots \dots \dots (4)$$

となる。ここではビーム軸を向ける範囲を $-A_r - \Delta_r \leq X \leq A_r + \Delta_r$ としているので積分範囲を限っているが、この範囲外では $C(X)=0$ であるので積分範囲を $[-\infty, \infty]$ に広げてよい。積分範囲を広げた式は一種の積分変換の形をしており、1変数のGauss変換(あるいはWeierstrass変換、Gauss-Weierstrass変換、Hille変換などと呼ばれているもの)である⁽⁷⁾⁽⁸⁾。ここで取上げている問題は、範囲 $-A_r \leq X \leq A_r$ で $I(X)$ が一様となるような $C(X)$ を A_r をパラメータにして求めることである。

ある範囲で一様なビーム強度を得るには、ビーム軸を向ける幅に下限が存在する。その必要条件として、両端の2方向だけにビームを向けたときに一様とすべき区間の両端($\pm A_r$)の位置、もしくはここよりも外側にビーム強度分布のピークがあることが挙げられる。この条件を満たす場合には、 $\pm A_r$ よりも内側に一部のビーム軸を振り分けて凹みを埋めることにより、一様な分布が得られると期待される。

以上の条件を式で表すと以下になる。まず、 $\pm(A_r + \Delta_r)$ に同強度のビームを向けたときのビーム強度分布は、

図2 ビーム軸を向ける範囲の必要条件
Fig.2. Minimum width of beam axis distribution.

$$I(X) = c_b \exp[-(X - A_T - \Delta_T)^2] + c_b \exp[-(X + A_T + \Delta_T)^2] \quad (5)$$

で与えられる。ビーム強度のピークが $\pm A_T$ の位置、もしくはここよりも外側になる条件は

$$\left[\frac{dI}{dX} \right]_{X=A_T} \geq 0 \quad (6)$$

で与えられる。この条件を図2に示す。(6)式を満たす範囲は図中の実線よりも上側の範囲となる。とるべき Δ_T の値は $A_T = 0$ の極限で $1/\sqrt{2}$ となり、 A_T の増大と共に小さくなる。なお、点線は $X = 0$ で凹みができる条件

$$\left[\frac{d^2 I}{dX^2} \right]_{X=0} \geq 0 \quad (7)$$

すなわち、

$$A_T + \Delta_T \geq \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (8)$$

の等号条件を参考までに示したものである。後者の条件は前者よりも緩く、 $A_T = 0$ の極限で両者は一致する。

(4)式において、与えられた $I(X)$ から $C(X)$ を求める手法としてラプラス変換、あるいはフーリエ変換などが考えられる。しかしながら、これらの方法では解に条件が付けられないので、物理的に無意味な負の $C(X)$ が解に含まれる可能性がある。実際、(4)式をフーリエ級数に分解して強引に解くと、正負に振動する解となってしまう。そこで、

$$E(X) \equiv \ln\{C(X)\} \quad (9)$$

で定義される $E(X)$ を導入し、 $E(X)$ について最適な解を求めてからこれを $C(X)$ に戻すことを考える。

(4)式を解くのを、与えられた $I(X)$ になるべく近い分布の得られる $C(X)$ (あるいは $E(X)$) を求めること

であると考え、これは一種の極値問題である。そこで(4)式を離散化し、関数二乗和を極小化する計算ルーチンを用いて求めた。具体的には以下のようにした。

ここでは $X=0$ を一様とすべき分布の中心と考えているので、 $I(X)$ は X について正負対称、すなわち偶関数である。この場合、 $I(X)$ から $I(-X)$ を引くことにより $C(X)$ も偶関数であることが証明できる。そこで、ここでは0以上の範囲について $C(X)$ を求めることにする。ビーム強度を一様とすべき区間の半分 $0 \sim A_T$ 、およびビーム軸を向ける区間の半分 $0 \sim A_T + \Delta_T$ をそれぞれ $m(\geq 2)$ 個の点に等分割すると、それぞれの k 番目の $(1 \sim m)$ の座標 X_{Tk} 、 X_{Ik} は

$$X_{Tk} = A_T \times \frac{k-1}{m-1} \quad (10)$$

$$X_{Ik} = (A_T + \Delta_T) \times \frac{k-1}{m-1} \quad (11)$$

である。これより、 X_{Tk} におけるビーム強度 $I(X_{Tk})$ は次式で与えられる。

$$I(X_{Tk}) = C(0) \exp[-X_{Tk}^2] + \sum_{n=2}^m C(X_{In}) \{ \exp[-(X_{Tk} - X_{In})^2] + \exp[-(X_{Tk} + X_{In})^2] \} \quad (12)$$

Σ 中の第2項は $-X_{In}$ を向いたビームの寄与分である。また $C(0)$ を Σ の外に出しているのは、 $X_{In} = 0$ を向いたビームの寄与を二重にカウントしないようにするためである。 $I(X_{Ik})$ を規格化して、 $I(X_{Tk})$ が $0 \sim A_T$ で単位(1)となるような $C(X)$ を求めることとする。 $I(X_{Tk}) - 1$ を m 個の変数 $E(X_{Ik})$ で定まる m 個の関数と考え

$$F(X) = \sum_{k=1}^m \{I(X_{Tk}) - 1\}^2 \quad (13)$$

が最小となるような $E(X)$ を求め、これから $C(X)$ を求めた。この計算には、FACOMの科学用サブルーチンライブラリSSL II⁽⁹⁾にある改訂マルカート法(Levenberg-Marquardt-Morrison法)を用いて倍精度で計算した。

以上、一次元の場合を考え、その結果は方形断面のビームという二次元の場合に対しては、各方向についてそのまま適用できる。また円形断面のビームに対しては、以上の式を円筒座標系に書き直せば同等の式が得られると考えられる。

3. 計算結果

以下の計算では $0 \sim A_T$ までの計算上の分割点数を51とし、各条件ごとにターゲットの幅とビーム発散

図3 ビーム軸の分布(a)とビーム強度の分布(b) ($\Delta r=0$ の場合)
Fig.3. Beam axis distribution (a) and beam profile (b) for $\Delta r=0$.

図4 ビーム軸の分布(a)とビーム強度の分布(b) ($\Delta r=0.5$ の場合)
Fig.4. Beam axis distribution (a) and beam profile (b) for $\Delta r=0.5$.

の各半値幅の比 A_r を 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 と変えた。

$\Delta r=0$, つまり一様なビーム強度が必要とされる幅の範囲にだけビーム軸を向けた場合の計算結果を図3に示す。(a)図は $C(X)$ をその最大値 $C_{\max}$ で割って規格化した値を $A_r+\Delta r$ で規格化した長さ X の関数として示したもので、また(b)図はこの $C(X)$ の分布により得られるビーム強度 $I(X)$ を A_r で規格化した長さ X の関数として示したもので、各 A_r ごとに上下の図で同じ線種を用いて示した(以下同じ)。この場合最適なビーム軸の分布は離散的となる。特に(8)式(図2の点線)を満たさない $A_r=0.2$ および 0.5 の場合は、最も外側だけにビーム軸を向けても、当然ながらビーム分布は中心でピークしたものとなっている。

$\Delta r=0.5$, つまり(ターゲットの幅)+(ビーム発散の半分)の範囲にビーム軸を向ける場合を図4に示す。このように、ビーム軸を向ける範囲を広げていくと、次第に最適なビーム軸の分布は連続的になり、更には滑らかになってくる。ビーム強度分布は $\Delta r=$

0.5 で十分に様になることがわかる。

図5は(6)式を満たす限界、つまり図2の実線となるように Δr を選んだ場合のものである。 $C(X)/C_{\max}$ の分布は図3のものと見掛け上ほとんど変わらないが、実際は横軸の分母の Δr が異なり、従って照射範囲が違っていることに注意する必要がある。図5の条件で、高熱負荷試験用としては実用上問題のない様なビーム分布が得られることがわかる。

4. 考 察

計算の結果、必要な照射範囲よりもビーム発散の半分程度を加えた範囲に離散的にビーム軸を向ければ十分に様になる、また(6)式を満たす範囲にビーム軸を向けるだけでも実用上問題のない程度に様なビーム強度分布が得られることがわかった。ただし、この結果を実際の設計に適用するには、照射位置におけるビーム軸の分布をイオン源におけるビームレットの偏向の分布に焼き直さなければならない。第1章で示したように、ビームレットの偏向法には電極を湾曲させる方法と、電極孔の中心軸をずらす方法の2種がある。前

図 5 ビーム軸の分布(a)とビーム強度の分布(b) [(6)式で与えられる Δ_T の場合]
Fig.5. Beam axis distribution (a) and beam profile (b) for Δ_T given by Eq. (6).

者は原理的に単純で、以下に示すように、この目的に対して性能的に優れているが、電極の製作上は電極孔の中心軸をずらす方法のほうが容易である。

電極を湾曲させる場合でも、ビームレットを一点に収束させるといった通常行われる目的の場合には、電極が球面となるので製作はそれほど困難とはならない。一方、ここで問題としている用途の場合、一般には複雑な曲面とする必要があり、検討当初イオン源の製作上この方法はあまり適していないように思われた。しかしながら計算結果によれば、必要とされるビーム軸の分布が離散的でかつその数が少なくてよいので、その個数だけの球面状の電極セグメントからなるイオン源を製作し、各電極セグメントからのビームレットをそれぞれ所定の方角に向けるという形で実現可能と思われる。電極を湾曲させる方法は以下に検討する電極孔の中心軸をずらす方法と異なり、イオン源の運転条件を変えても各ビームレットの向きが変わることがないので都合が良い。

残る問題としては、ビーム発散が運転条件と共に変

わることである。一般にビーム発散はビームエネルギーを上げると小さくなる。また、ビームエネルギーを一定として、ビーム発散が最小となる値からビーム電流を増減させると、ビーム発散の絶対値だけでなく、その形がガウス分布からずれる⁽¹⁰⁾。従って、熱負荷を変化させるためにビームエネルギーやビーム電流を変えると、一般にビーム発散は計算で仮定したビーム発散からその絶対値や分布がずれることになる。以上のずれに対しては、例えば熱負荷を増すためにビームエネルギーを上げる場合、ビームエネルギーが上がってビーム発散が小さくなった分だけビーム電流をビーム発散が最小となる値からずらすというように運転条件を定めれば、ほぼ一様なビーム強度が得られると考えられる。その場合、計算で仮定したガウス分布からずれることになるが、この寄与も含めてガウス分布を仮定して計算したものに実質的にほぼ対応する運転条件があると思われる。

次に、電極孔の中心軸をずらす場合を考える。この場合、イオン源が何段加速であるか、複数段加速の場合はどの電極で中心軸をずらすかにより、その特性が変わってくる。相対的に低エネルギーのイオン源に使用される一段加速方式⁽⁴⁾では、運転条件によりビームレットの方角が変わることはないで、特性は電極を湾曲させる方式と同等である。高熱負荷試験装置として、より高エネルギー域で一般に使用されている二段加速イオン源の場合は、各段にかかる加速電圧の比を変えるとビームレットの偏向角が変わる。そのなかでも偏向角の変化が最も小さく、一般に使用されている減速電極で電極孔の中心軸をずらす場合を以下に検討する。この場合、電子レンズ系について近軸近似により求めたビームレットの偏向は次式で与えられる⁽⁵⁾。

$$\frac{\Delta_l(x)}{4d_2} \approx \frac{\theta}{\Gamma} \dots\dots\dots (14)$$

ただし、 $\Delta_l(x)$ 、 d_2 ：それぞれ中心軸のずれの距離、2段目（ビームについて下流側）のギャップの距離、 θ ：偏向角度、 Γ ：2段目の加速電圧と全加速電圧の比

上式からわかるように、 Γ を変えるとそれに比例して偏向角度も変わってしまう。ビーム電流は、チャイルドラングミュア則より、ほぼ1段目の加速電圧の3/2乗に比例して変化させることができる。従って、同じ加速電圧でもビームパワーを変化させることができるわけで、 Γ が可変であることは高熱負荷試験装置として利点がある。そこで、 Γ を変えてもほぼ一様なビーム分布を得るためには、例えば図6のように

図 6 Γ にあまり依存しないビーム偏向法
Fig. 6. Beam steering to reduce Γ dependence.

ビーム軸を振り向けると良いように思われる。つまり、 Γ を変化させるとそれにほぼ比例して全体にビームの当たる幅が変わる。その変化の程度が小さい場合は、ターゲットにおけるビームの収束の収差も小さく、新たな範囲においてほぼ一様なビーム強度が得られると期待される。

上の例からもわかるように、ビームの照射位置のビーム軸の分布から、イオン源におけるビームレットの偏向の分布は一意には定まらない。偏向角度が大きいと電極の製作に困難が生じたり、あるいはビームの特性に問題が生じ得るので、一般には図 6 のようにはビームレットを途中で交差させないで、ほぼ直接対向する位置にそのまま割当てるのがよいと考えられる。

5. ま と め

本論文を要約すると次のようである。

(1) 照射範囲に比してビーム発散が無視できないような場合に、ビームの偏向をどのようにすれば一様なビーム強度が得られるかを検討し、この問題が 1 変数の Gauss 問題の形に記述できることを示した。

(2) 続いて、この式を離散化して極値問題の形に変形し、数値的に解いた。その結果、照射範囲に比べてビーム発散の程度が大きい場合、平坦なビーム強度を得るに最適な照射位置におけるビーム軸の分布は離散的となり、ビーム発散の程度が小さくなるにつれて次第に連続的となり、更には滑らかになってくることがわかった。

運転条件によるビーム発散の絶対値やガウス分布からのずれ、偏向角度の変化に関する検討も行ったが、その検討で予測した事項の確認は今後の計算や実験の項目として残されている。

本論文をまとめるにあたっては、日本原子力研究所の NBI 装置試験室および NBI 加熱研究室のメンバー、特に奥村義和副主任研究員との議論に負うところが大きかった。ここに謝意を表す。また、國枝俊介 NBI 装置試験室室長、栗山正明 同室長代理、小原祥裕 NBI 加熱研究室室長には終始御支援いただいた。ここに併せて謝意を表す。(平成 3 年 10 月 18 日受付)

文 献

- (1) 秋場・田中・関：「高熱負荷試験への電子ビームの応用」, 原子力学誌, **33**, 447 (平 3)
- (2) M. Araki, M. Dairaku, T. Inoue, M. Komata, M. Kuriyama, S. Matsuda, M. Ogawa, Y. Ohara, M. Seki & K. Yokoyama: "Burnout Experiments on the Externally-Finned Swirl Tube for Steady-State and High Heat Flux Beam Stops", *Fusion Eng. & Design*, **9**, 231 (1989)
- (3) M. Fumelli & F. P. G. Valckx: "The Periplusmatron, an Ion Source for Intense Neutral Beams", *Nucl. Instrum. & Methods*, **135**, 203 (1976)
- (4) L. D. Stewart, J. Kim & S. Matsuda: "Beam Focusing by Aperture Displacement in Multiampere Ion Sources", *Rev. Sci. Instrum.*, **46**, 1193 (1975)
- (5) Y. Ohara: "Beam focusing by Aperture Displacement in Two-Stage Acceleration System", *Japan. J. Appl. Phys.*, **18**, 351 (1979)
- (6) Y. Okumura, Y. Mizutani & Y. Ohara: "Experimental Study of Ion Beamlet Steering by Aperture Displacement in Two-Stage Accelerator", *Rev. Sci. Instrum.*, **51**, 471 (1980)
- (7) 森口・宇田川・一松：数学公式 II (昭 32) 岩波全書
- (8) A. H. Zemanian, *Generalized Integral Transformations* (1968) John Wiley & Sons, Inc., New York
- (9) 富士通：FACOM FORTRAN SSL II 使用手引書
- (10) Y. Ohara, M. Akiba, M. Araki, H. Horiike, M. Kuriyama, S. Matsuda, M. Matsuoka, Y. Okumura & S. Tanaka: "Geometrical Efficiency of the Prototype Neutral Beam Injector Unit for JT-60", *Rev. Sci. Instrum.*, **54**, 921 (1980)

松 岡 守 (正員)

昭和 30 年生。52 年三重大学工学部電気工学科卒業。54 年名古屋大学工学研究科修士課程修了。同年日本原子力研究所入所。中性粒子入射装置の開発に従事。日本物理学会、プラズマ・核融合学会会員。