論文および報告

電子ビーム溶接時における電子ビーム流の特性*

—電子ビーム溶接に関する研究(3)—

鈴木 春義** 橋本 達哉** 松田 福久**

Characteristics of Electron-Beam for Welding*

—Studies on Electron-Beam Welding (3)—

By Haruyoshi Suzuki**, Tatsuya Hashimoto** and Fukuhisa Matsuda**

abstract

The electron-beam diameter and intensity distribution of the NRIM 1.5 kW electron-beam welder, home-made, were measured by interrupting the beam with a water-cooled copper plate. The effects of filament current, anode voltage, welding beam current and focusing voltage on beam focusing were studied experimentally.

The following conclusions were obtained :

- 1) The intensity distribution of electron-beam current on the specimen surface showed approximately a normal distribution.
- 2) The electron-beam was of a cone shape with a vertex angle of 7 degrees.
- 3) The minimum diameter of electron-beam on the specimen is affected severely by filament current, anode voltage, welding current and focusing voltage. Greater values of filament current and anode voltage and smaller welding current contributed to making the diameter of electron-beam smaller.
- 4) In electron-beam welding, the beam diameter on the specimen should always be noted besides welding current, anode voltage and welding speed.

1. 緒 言

従来のアーク溶接に比して電子ビーム溶接が異なる大きな特徴は、熱源の直径を任意に制御できることである。電子ビーム溶接での熱源は加速されたビーム流であり、このビーム流は外側から電界をかけることにより任意の直径に絞ることができる。

絞ったビームの焦点を試料上にあてると、そのビーム径が十分小さいときには試料を溶融させることができる。このビーム径が数〜数十ミクロン程度では金属の微細な穴あけや切断加工に利用され、数十ミクロン〜数ミリ程度では溶接に、またそれ以上では溶解、ろう接、表面処理などに利用される。

溶接の場合には後報に述べるごとく、ビーム流径の大小により溶込みが非常にかわってくる。したがってビーム流径を測定することが電子ビーム溶接を研究するうえ

に重要な課題となっている。

本研究はこの点より、電子ビーム溶接に関する基礎研究の一環として、著者らの製作した溶接機を使用して¹⁾電子ビームの濃度の分布、ビーム流の形状およびビーム流の直径におよぼす溶接機諸元の影響について研究し今後の研究参考としたものである。

2. 電子ビーム流の直径の測定

著者らの製作した電子ビーム溶接機の電子銃室内の電極の配置を示すと Fig. 1 のごとくで、上より陰極、グリッド、陽極、X-Y 位置調整、シールド弁、絞りおよび試料台となる。ビーム電流または溶接電流は試料台と気密空間で測定している。

電子ビーム流の直径(以下ビーム径と略す)の測定方法として著者らが使用したのは、水冷の銅板(板厚 10 mm)を、Fig. 2 の右端に示すごとく台車上にのせ、これを一定速度で移動させ電流の増加からビーム径を測定したのである。すなわち電子ビームが銅板に全く照射しない位置より台車を動かし、ビームがしだいに銅板にあ

* 原稿受付、昭和37年10月6日(昭和37年度溶接学会秋季学術講演会において発表)

** 正員、金属材料技術研究所 Member, National Research Institute for Metals

Fig. 1 Arrangement in the home-made 1.5 kW electron-beam welding unit at NRIM

Fig. 2 Measuring method of electron-beam diameter by copper-wedge interruption

たりビーム電流が増加し、ついに全ビーム電流が銅板上に流入するのであるがこれを電磁、ペン書きまたは陰極線オシログラフで測定した。この増加現象の典型図を Fig. 2 の左上に示す。ビーム径は銅板上の電流が零から増加し最高値に達したときの位置の横軸の距離であらわした。それはこの曲線の勾配を示すと同図の左下図と

(a) Minimum beam spot (about 1 mm ϕ)

Fig. 3 Typical oscillogram of variation of electron-beam current when interrupted by copper-wedge

(b) Broad beam spot

なるが、この山型のすそ野間の距離がビーム径となるからである。

上記の方法により測定した陰極線オシログラフの例を Fig. 3 (a) と (b) に示す。(a) はビーム径を約 1 mm に絞ったときで (b) はビーム径をいくぶん広げた場合である。

3. 電子ビームの濃度分布

電子ビーム電流の増加曲線を Fig. 2 の方法により測定し、これを電磁オシログラフに描き、その曲線の勾配を求めると、電子ビーム流の濃度分布曲線が得られる。この測定例を Fig. 4 (a), (b) の実線にて 50 kV (加速電圧), 10 mA (ビーム電流=溶接電流) と 40 kV, 15 mA の電子ビーム流の濃度分布を示す。いずれもいくぶん広いビーム径で測定を行なった。(a) はビーム径が約 4.7 mm, (b) は約 11 mm である。

これらの濃度分布をみるといずれもビーム中央が高い

(a) 50 kV, 10 mA, broad beam diameter

Fig. 4 Typical curve of beam current distribution

(b) 40 kV, 15 mA, broad beam diameter

山型となっている。とくにビーム径が比較的絞られた (a) では中央が急峻となっている。このことからビームの濃度分布は正規分布をしていることが予想されるので、実測値について標準偏差 (σ) を求め、この値より正規分布曲線 $N(m, \sigma^2)$ を描くと図中の破線となる。(b) は 3σ ビーム直径となり、また実線と破線がほぼ一致している。(a) は中央で実線が破線より高くなりいくぶん異なっているが、ビーム流の縦方向の濃度分布をも考慮すると実線の中央が低くなることが予想されるので、(a) もほぼ正規分布に一致してくる。

以上のことより、溶接の電子ビーム流の濃度はほぼ正規分布をしていると考えられ、正規分布の取扱いができる。

4. 電子ビーム流の形状

溶接用の電子ビーム流をレンズで絞り、焦点を試料面にあてたとき、その面の上下方向においてビーム径がどのように変化しているのかについての測定を行なった。測定したビーム流の条件は 50 kV, 29 mA で、絞った焦点のビーム径は 2.0 mm ϕ であった。測定方法は水冷銅板を焦点の上下面の位置でビーム流に直角方向に切断して、ビーム電流の増加の開始から最高値に達する瞬間の距離 (ビーム流の分布が正規分布の場合はこの距離は理論的には無限大となるのであるが、実測では容易に測定できる。) を測定しビーム径とした。

Fig. 5 に測定結果を示すが、縦軸に測定位置を、横軸にビーム流の径を示す。

測定結果よりみると、ビーム流の形は焦点を中心に上下はほぼ対称形をしておりその形は一定の絞り角を持った梯形である。このビーム流の絞り角度は Fig. 5 で約 7.0 度である。装置の設計時にはこの角度を約 6 度で設計した。これは実測値とほぼ一致している。またこの角度は

Fig. 5 Typical shape of electron-beam near the focus

焦点に近い位置では小さくなる傾向を示す。

5. 電子ビーム流の直径と溶接機諸元の影響

溶接時の電子ビーム径におよぼす陰極電流、ビーム加速電圧、ビーム電流および絞り電圧などの影響について研究を行なった。

5.1 陰極電流の影響

溶接機の陰極の形式には種々の形状および寸法がある。著者らの溶接機では実験結果より Hair-pin type を採用し、タングステンの 0.5 mm 径のワイヤーで Y 型に

Fig. 6 Filament current vs. minimum electron-beam diameter

曲げ加工を行なって使用している。

陰極に流入する適正陰極電流値とワイヤー径の間には一定の関係があるが、著者らは 0.5 mm 径のタングステンを使用した陰極に 17~21 A の電流を通じて熱電子を放出させ、この熱電子流 (9 mA) を加速し (50 kV) 絞って試料表面にあて、絞り電圧を変化させて得られる最小ビーム径と陰極電流の関係を測定した。測定結果を Fig. 6 に示す。縦軸はビーム径、横軸は陰極電流 (フィラメント電流) であり、図中で縦に並んだ黒点は一定の陰極電流値において絞り電圧を種々変化させた場合のビーム径の変化を示したもので、その最小の点はその陰極電流値における最小ビーム径を示している。実験結果よりみて最少ビーム径は陰極電流の増加につれ実線にしたがって減少していく。そして陰極電流が約 20 A 以上で最少ビーム径はほぼ一定値 1.0~0.9 mmφ となっている。

以上のことよりみて陰極電流によって最少ビーム径は変化し、ある適正電流値以上において最少ビーム径は一定値に達することがわかる。

以上のことは陰極より熱電子の放出は、陰極電流が低い範囲では放出量が少なく、グリッドバイアス電圧により強制的に広範囲の陰極面より引き出すためにビーム径が広くなり、絞れない傾向となる。しかし陰極電流が多いときは、わずかの陰極面からでも十分電流がとれるため、よく絞ることができるものと考えられる。

以後の実験では陰極電流は約 21 A を採用した。

5.2 加速電圧の影響

加速電圧を 50 kV でビーム電流を 10, 20 および 30

Fig. 7 Anode voltage vs. electron-beam diameter

Fig. 8 Anode voltage vs. minimum electron-beam diameter

mA とし、そのときのビーム径をおのおの絞り電圧を変化させ最小にしておき、つぎに加速電圧のみを低下させていくとビーム径はしだいに広がってくる。この状況を Fig. 7 に示す。ビーム径の広がる程度は大電流ほど大きい。

Fig. 7 において、加速電圧を低下させてビーム径が大きくなった場合に絞り電圧を変化させて、各加速電圧における最小ビーム径を求めてみると Fig. 8 の実線となる。Fig. 8 はビーム電流が 20 mA の場合であるが、電流値が異なったときもほぼ同様の傾向がみられる。最小ビーム径の測定方法は 5.1 と同じ方法を採用した。また同図中には 100% のビーム電流に相当する直径の外に、90% と 50% のビーム電流に相当する直径も併記した：しかしいずれも 100% のビーム直径と直線とは同傾向を示しており、ビーム径の絶対値が小さいのみの形である。興味あることは、90% と 50% のビーム電流に相当するビーム径は、100% のビーム径のほぼ 9 割と 5 割に相当している。

実測結果よりみると、加速電圧が高いほど、最小ビーム径が小さくなる。このことは一般にいわれていることを実証したことになる。

5.3 ビーム電流の影響

加速電圧 30 kV でビーム電流を 5 mA、40 kV と 50 kV で 10 mA の条件でビームを小さなビーム径にしておき、ビーム電流のみをバイアス電圧の変化により増加させると、ビーム径はしだいに大きくなる。この状況を Fig. 9 に示す。一般に加速電圧が低いほどビーム径の広がりが大きい。しかし 5.2 の加速電圧の変化によるビーム径の広がりに比しビーム電流の場合は広がりの

Fig. 9 Welding current vs. electron-beam diameter

Fig. 10 Welding current vs. minimum electron-beam diameter

傾向が少ないようである。

つぎに Fig. 9 において絞り電圧を変化させ、各ビーム電流値における最小ビーム径を求めると Fig. 10 のごとくなる。

同図にはビーム電流が 100% の場合の外、90% と 50% のときのビーム径も併記した。90% と 50% のビーム径は加速電圧の変化の場合と同様に 100% のビーム径のほぼ 9 割と 5 割に相当する。したがって 90% と 50% のビーム径は 100% の値がわかればほぼ推定できる。

実験結果よりみて、最少ビーム径はビーム電流の増加とともにいくぶん広がる。このことはビーム電流の増加とともに電子の相互反撥力が増加するために一般にビーム径は広がる傾向を持つといわれていることを実証するものである。

しかしビーム流の増加によるビーム径の広がり、実験範囲では加速電圧の影響より少ない。すなわち、最少ビーム径を小さくするには電流を減少させるより、加速電圧を上昇させるほうがよいようである。

また高電圧低電流方式のほうが低電圧大電流方式より最小ビーム径は小さくなることが予想される。すなわち、穴あけなどの微細物の加工には高電圧低電流方式が

Fig. 11 Focusing voltage vs. electron-beam diameter

Fig. 12 Anode voltage vs. focusing voltage at constant electron-beam diameter

有利であることが実証される。

5.4 絞り電圧の影響

ビーム流の直径を直接制御する因子はレンズの絞り電圧である。

Fig. 11 は最小ビーム径の絞り電圧の前後において、絞り電圧を変化させるとビーム径がいかなる変化を示すかを示したものである。左図は加速電圧を 50 kV と一定にしたとき、右図はビーム電流を 20 mA と一定にしたときであるが、いずれも絞り電圧が 1 V 変化するとビーム径は 0.1~0.5 mm 程度変化していることがわかる。

つぎに加速電圧およびビーム電流を変化した場合においてもビーム径を一定に保つために必要な絞り電圧の変化をみると Fig. 12, 13 のごとくなる。すなわち加速電圧およびビーム電流が増加するにしたがいビーム径を一定に保つためには絞り電圧を高くする。すなわちレンズ

Fig. 13 Welding current vs. focusing voltage at constant electron-beam diameter

の絞りを多くかけねばならないことがわかる。この理由は加速電圧が増加すると電子の運動速度が速くなるため、外部よりこのビーム径を絞るためには高電圧の絞りにより始めて同一のビーム径に絞ることができるようになるものと考えられる。またビーム電流が増加すると電子の反撥力が多く働きビーム流は広がろうとするため、高電圧の絞りが必要となるものと考えられる。しかしビーム電流の変化の場合は加速電圧の場合より絞り電圧の変化は少ない傾向にある。

6. 電子ビーム流の絞りに関する 計算値と実測値の比較

電子ビーム流の集束化は電子同志の静電的な反撥力と電流現象的な吸引力との合成力によって定まると考えられる。ビーム半径を r (cm) としてこの合成力を求めた結果では²⁾、

$$F = \frac{ne^2}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{v} \cdot \frac{1}{r} \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \dots\dots\dots(1)$$

ただし

n : 電子の数/秒

c : 光速 (3×10^8 m/sec)

v : 電子ビームの速度 (m/sec)

となり、電子の速度が光速以下では反撥力が強いのでビーム径はしだいに大きくなる。しかし高電圧で加速するほうが速度が大となるから合成力は小さくなってビーム自体での集中化は比較的容易である。以上の理論的な計算値と前記の Fig. 7~10 の結果とは定性的に一致している。

また絞りレンズによって絞った場合に到達しう最小

ビーム流の半径についてはつぎの関係が計算上より求められている²⁾

$$\frac{r_{\min}}{r_0} = e^{-3.30 \times 10^{-5} \times \frac{V_L}{I} \times \sqrt{V}} \dots\dots\dots(2)$$

ただし

r_0 : ビーム流の最初の半径 (m)

$r_{\min}$: 到達しうる最小ビーム径 (m)

V_L : ビーム流に与える収斂力 (V)

I : ビーム電流 (A)

V : ビーム加速電圧 (V)

式(2)が実際の特性と一致するかどうかを検討した。

Fig. 14 は式(2)において V と V_L を一定とし $r_{\min}/r_0$ と I の関係を実測したものである。実測値は実線で示してあり、破線は式(2)より計算したものを併記した。破線の内、右の2本は実測値の実線とほぼ同一

Fig. 14 Electron-beam current vs. $r_{\min}/r_0$

Fig. 15 Anode voltage vs. $r_{\min}/r_0$

の $r_{\min}/r_0$ を与えるときのビーム電流の計算から求めた曲線である。左の2本は、ビーム電流が実測値の範囲内にあるときの計算による $r_{\min}/r_0$ である。実測値と計算値では、同一 $r_{\min}/r_0$ に対するビーム電流の比は約6~10倍の開きがある。また同一ビーム電流での $r_{\min}/r_0$ では実際のビーム流は計算値の約 10^5 倍も広い。すなわち実際のビーム径は計算値よりかなり大きくなっている。しかしビーム流径の広がり傾向は計算値と定性的に類似しているとみられる。

Fig. 15 は式(2)において I と V_L を一定とし

$r_{\min}/r_0$ と V の関係を実測したものである。実測値は Fig. 14 と同様の実線で示している。破線の内、左 2 本は実線と同一 $r_{\min}/r_0$ に対する計算値で、右 2 本は実線と同一加速電圧に対する計算値を示す。

実際のビーム流での加速電圧の影響は $\sqrt{V}$ よりむしろ V に逆比例する。しかし式 (2) も、Fig. 15 の右の破線ではほぼ実線と同じ傾向を示すことよりみて、加速電圧も定性的にはほぼ式 (2) の傾向を満足するものと思われる。

実測値のビーム径は理論値に比しかなり広い。これは陰極および電子銃内部の構造や、ビームの収差などに起因しているものと考えられる。

7. 結 言

電子ビーム溶接において熱源となる電子ビームの種々な特徴および性質につき著者らの製作した装置を使用し研究を行ない理論式による計算値と比較を行なったがその結果、つぎの結論を得た。

(1) 溶接の電子ビーム流の濃度はほぼ正規分布をしており、正規分布曲線によりこの濃度を代表させることができる。

(2) 電子ビーム流の形は焦点の上下はほぼ対称形をなしており、その形状は一定の絞り角を持った逆梯形を示す。

(3) 陰極電流によって、到達しうる最小ビーム径は変化し、ある適正電流値以上において最小ビーム径は最低となり安定化する。したがって陰極電流は適正值につ

ねに一定に保たねばならない。この適正電流値は 0.5 mmφ の Y 型タングステンの陰極では約 20 A 以上である。

(4) 到達最小ビーム径は加速電圧が高いほど小さくなる。また最小ビーム径はビーム電流が少いほど小さくなる。このことから高電圧低電流方式は低電圧大電流方式より最小ビーム径は小さくなることが予想される。

ビーム電流が 100% の場合の最小ビーム径を測定すれば、ビーム電流が 90% と 50% の場合の最小ビーム径はほぼ推定できる。すなわち 100% のビーム径の 9 割または 5 割がほぼ 90% と 50% のビーム径に相当する。

(5) 一定のビーム径を保つためのレンズの絞り電圧は加速電圧が高いほど、またビーム電流が多いほど高くしなければならない。

(6) 電子ビームの絞りに関する理論値と実測値では、最小ビーム径に対する絶対値にかなりの開きはあるが、加速電圧、ビーム電流および絞り電圧に対する傾向はほぼ一致している。

(7) 電子ビーム溶接においては、溶接電流、加速電圧および溶接速度のほかにつねに試料表面上の電子ビーム流の直径に注意しなければならない。

最後に本研究を行なうにあたり、終始協力をいただいた鈴木雅則氏と装置の製作にあたった日本電子機に対し厚く感謝する。

参 考 文 献

- 1) 鈴木、橋本、松田：溶接学会誌
- 2) 菅田：エンジニア 6, 2, 1960, 1~2

次 号 予 告

講 義

☆高張力鋼の硫化物腐食割れに関する研究 西栗太 村栖谷 修慎雅 明吾博

資 料

☆現場におけるパイプラインの炭酸ガスアーク溶接の実用 寺田 誠

論文および報告

☆高張力鋼の溶接熱影響部に及ぼす冷却途中の加工の影響 (第 1 報) {金 今 沢 野 正 敬 午 治

☆電子ビーム溶接におけるビードの形成とその材質的影響 {鈴 橋 木 本 春 達 義 哉 久 松 田 福

☆ポンド・フラックスによるサブマージドアーク溶接の研究 (第 3 報) {一 海 俊 景 渡 辺 文 則

☆低圧式ガス溶接切断吹管の性能に関する研究 (第 1 報) {大 西 政 巖 水 野 武 夫 彦 林 政 武 彦

☆フラッシュ現象の高速度写真による研究 {佐 藤 次 彦 山 口 武 男