多少異なっている。すなわち、陰極側試材の溶融・飛散に比して陽極側のそれは約10%大きくなっている。しかし、この程度の極性効果では実用上問題はないと考えてよいであろう。

(5) ステンレス薄鋼板を対象としてコンデンサの並列挿入による溶接部欠陥形成におよぼす影響を検討した結果、コンデンサを挿入しない場合のみ、曲げ試験において接合面の一部に割れを生じることが多く、この場合破面に酸化物など介在物が認められる。これはアプセット寸前での大電流のフラッシングによって形成される端面の大きな凹凸によるものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 安藤, 仲田, 福井「鋼のフラッシュ溶接現象の研究(第3報)」溶学誌, 40 (1971) 137
- 2) H. Kilger: "Production Technique and Quality of Flash Welded Joints", W. J. 24 (1945), 413s
- 3) 安藤, 仲田, 杉本「鋼のフラッシュ溶接現象の研究(第2報)」溶学誌 40 (1971) 35
- 4) 安藤, 仲田, 福井「鋼のフラッシュ溶接現象の研究(第4報)」溶学誌, 40 (1971) 232
- 5) V. S. Sidiyakin and B. D. Drlov: "Flash-Butt Welding Thin-walled Components on D.C.", Weld. Prod. 1969, No. 9, 40.
- 6) 奥田, 稲田, 馬場, 原「矩形波電圧方式フラッシュ溶接機」溶接学会抵抗研委資料 RW-146-78 (1978), 三菱電機技報 52 (1978) 9
- 7) 安藤, 仲田, 杉本「鋼のフラッシュ溶接現象の研究(第1報)」溶学誌 39 (1970) 1084
- 8) 安藤, 長谷川「溶接アーク現象」第4版 p. 73, 85 (1970)産報

溶接プロセスのオンライン検出のための画像処理(第2報)*

—アーク光のスペクトル特性を考慮した画像の改善—

井 上 勝 敬**

Image Processing for On-Line Detection of Welding Process (Report 2)*

—Improvement of Image Quality by Incorporation of Spectrum of Arc—

by Katsunori Inoue**

It is possible to improve the visual information, which is obtained from the arc welding process, by taking the wavelength spectrum into consideration.

In the first stage of this paper, the spectrum of welding arc and molten pool is measured with a grating monochrometer. This measurement indicates that CO₂ arc, Ar arc and molten pool have their characteristic spectrum respectively.

The images of the arc welding process are improved and the configuration of the molten pool is relatively emphasized by selecting the image pickup device and the optical filter on the basis of the spectrum characteristics in the next.

The bead width and the penetration depth are measured by digital processing of these images in real time in the final stage and the results of measurement agree well with the actual bead width and penetration depth.

1. 緒 言

アーク溶接過程の進行箇所より得られる視覚情報は、溶接過程の自動制御のために、多くの有用な情報を提供することは、既に報告した^{1,2)}。この情報を撮像装置で

捕え、専用処理装置やディジタル・プロセッサで処理し、有用な情報を抽出する方式についても、既に報告した^{3,4)}。

この論文では、アーク光の波長スペクトル特性を考慮することによって、得られる視覚情報をより有用なものにする方式について報告する。

アーク溶接進行中に、撮像装置で溶融池を監視すれ

*原稿受付 昭和56年4月3日(昭和52, 55年度春季全国大会にて発表)

**正 員 大阪大学溶接工学研究所 Member, Welding Research Institute of Osaka University

ば、溶接過程の良否を判定するために有効な情報が得られるであろうことは、自明である。この場合、熔融池自体は発光しているが、アークの放出する光に比べると、そのふく射強度は数等低く、可視光領域で、撮像管などによる監視は困難な場合が多い。そこで、アークと熔融池の波長スペクトルの差違を利用して、近赤外光に感知する Si ビジコン撮像管と諸種の光学フィルタを用いて、熔融池を監視する試みが発表されている⁵⁾。しかし、この報告では、アーク光の波長スペクトルは実測されていず、単に、手溶接アークについて、過去に実測されたデータを引用しているにとどまっている。また、得られた画像について、自動制御を目的とした検出操作も行っていない。

本研究では、4 種類のカスシールド・アークについて、回析格子による分光測定を行い、この結果と、あわせて行った熔融池の分光測定結果より、撮像管と光学フィルタを選定することによって、熔融池像を相対的に強調し、その測定を容易にするための画像改善を実証している。次に、改善された画像に対して、既報の簡易型二値化画像処理装置^{3,4)}でデジタル処理を施し、熔融池形状を認識することによって、溶込み深さやビード幅など、溶接結果の品質にかかわる因子のオンライン測定の可能性を示している。これらは、アーク溶接過程自動制御の有効な手段となる。

2. アーク光のスペクトル特性

2.1 いろいろな波長域でのアーク、熔融池の像

スペクトル測定に先立って、各種の干渉フィルタを用いて、アークと熔融池を側方から写真撮影した。得られた像の例を Fig. 1 に示す。使用フィルムと干渉フィルタの透過波長値は各写真に附記してある。長波長域の像ほど、熔融池が明確になっていて、特に、900 nm まで感度を有する赤外線フィルムと、740 nm 以上の波長の光のみを透過する SC 74 フィルタを用いた像 (a) では、熔融池は明りょうに見られる。このことを定量的に検討するため、アーク光のスペクトル測定を行った。

2.2 アーク光と熔融池のスペクトル測定

アーク光のスペクトル測定は Fig. 2 の配置で行った。分光器は日本ジャーナルアッシュ製 0.25 MI エバート型 (JE-25 E 型) 回析格子タイプで、測定波長範囲は 0~940 nm、分解能は、100 nm のスリットを用いた場合、0.5 nm とされている。光電子増倍管は浜松テレビ (株) 製 R 406 サイドオン型で、この管は約 750 nm 近辺に感度のピークを有し、波長領域 400~1,100 nm の光に感知する。

測定の対象としたアークは、CO₂ アーク、Ar (MIG

Fig. 1 Images of arc and molten pool in various wavelength.

Fig. 2 Schematic arrangement for spectroscopic measurement.

および TIG) アーク、Ar+CO₂ (50%) である。電極は MIG アーク、CO₂ アーク、Ar+CO₂ アークでは $\phi=16$ mm のワイヤ (MG-50 神戸鋼製) TIG アークでは W+ThO₂ (1%) の棒を用い、ノズルは銅製、セラミック製の二種類を用いた。母板としては SS-41 材を用い、また、TIG アークでは水冷銅板も併用した。各アークに

について、スペクトル測定位置は、電極直下の最高輝度部を選んだ。溶融池からのふく射光の測定は、スリット(100 nm 幅)によりアーク光をささぎる方法、アーク消弧直後短時間内に測定する方法の二法について比較し、前者については漏えいするアーク光の影響、後者については冷却に伴う温度低下による誤差を補正した。光電子増倍管の出力は、増幅後、データ・レコーダに記録した。時系列信号となっている波長スペクトル・データを再生し、測定波長域 450~940 nm を490等分して、1 nmを一区間とし、各区間毎に、256点をサンプリングしてAD変換し、デジタル量とした後、平均値を求め、この平均値を各区間の代表値とした。各代表値に対して、使用した光電子増倍管 R 406 の波長感度特性に対する補正を施した。CO₂ アーク、Ar+CO₂ アークでは、アーク発生点変動し、分光器のスリットを通過する光量も時間的に一定ではないので、測定範囲内の任意波長 λ に対して、次式を満足する n 個の波長スペクトルの実験データの平均値 $\overline{S_n(\lambda)}$ を求め、スペクトルの時間平均を表わすものとした。

$$|S_n(\lambda) - S_{n-1}(\lambda)| < \epsilon \quad \dots\dots(1)$$

ここで ϵ は許容誤差である。 n は5とすれば十分であった。MIG アーク、TIG アークについては、発生点の変動がなく、再現性の良いデータが得られるので、平均処理は必要としなかった。

2.3 スペクトル測定結果

測定したアーク光スペクトルの例を Fig. 3 に示す。図中、(a) は CO₂ アーク、(b) は Ar+CO₂ アーク、(c) は MIG アーク、(d) は TIG アークのもので、(a)、(b) では、可視光短波長域の成分は、可視光長波長域から近赤外域にかけての成分より相対強度は大であるが、(c)、(d) では 700 nm~900 nm の波長領域にも、幾本か線スペクトルのピークが見られる。(c)、(d) は Ar アークであり、Fig. 4 (a) に示す Ar の特性スペクトル⁶⁾の 700 nm~900 nm の部分とは、良い対応を示すことが分かる。同図 (b) には Fe の特性スペクトル⁶⁾を示すが、Fig. 3 (a)、(b)、(c) の 500 nm 近辺の強度分布とは一致する部分もある。

Fig. 5 (a) には、溶融池ふく射光のスペクトルを示す。これは連続スペクトルであり、赤外部へかけて、強度が増加している。これを黒体ふく射におけるウィーン

$$\rho(\lambda) = \frac{C_1}{\lambda^5} e^{-C_2/\lambda T} \quad \dots\dots(2)$$

(C_1 , C_2 は定数, T は絶対温度を表わす。)

より求めた、同図 (b) の曲線と比較すると、傾向的には良く一致していることが見られる。Fig. 3 (a)、(b) と Fig. 5(a) から、例えば Fig. 1(a) における赤外部の像で

(a) Spectrum of CO₂ arc.

(b) Spectrum of Ar+CO₂ arc.

(c) Spectrum of MIG arc.

(d) Spectrum of TIG arc.

Fig. 3 Spectrum of welding arcs.

は、Fig. 1(c)~(f) などに比べて、アーク光が相対的に減光されて、溶融池像が強調されることが理解できる。

(a) Characteristic spectrum of Ar.

(b) Characteristic spectrum of Fe.

Fig. 4 Characteristic spectrum.

3. 光学フィルタによる画像の改善

2. の結果より CO_2 アーク, $\text{Ar}+\text{CO}_2$ アークでは, 600~700 nm 以上の波長光のみを通過させるフィルタを, この波長域に感度を有する撮像管に装着すれば, 溶融池が相対的に強調された像を得ることができると予想される. Fig. 6 には, 最も一般的に利用されている Sb_2S_3 ビジコンと, 近赤外部にも感度を有する Si ビジコンの感度特性⁷⁾を相対値で表わしてある. CO_2 アークなどに対しては, 800 nm 近くまで感度を有する Sb_2S_3 ビジコンでも, 適当なフィルタを用いれば, 溶融池の強調は可能である. Fig. 7 はこのことを示すもので, CO_2 アークによるすみ肉溶接時に得られた画像に対して, Sb_2S_3 ビジコンを使用して, (a) は近赤外領域までフラットな減光特性を有する ND フィルタを装着

(a) Spectrum of radiation from molten pool.

(b) Spectrum of blackbody radiation calculated from Wien's radiation law.

Fig. 5

Fig. 6 Spectral sensitivity of pickup tubes.

した場合, (b) は SC 74 フィルタ (前述) を用いた場合であり, 両者の差は明白である. しかし, Si ビジコンを用いて赤外線像を検知すれば, 溶融池像はより一層明確になる. Fig. 8 はこの例で, CO_2 アークによる I 型開先継手溶接の際, (b) は, 900 nm より長波長の光を通過させる IR 90 フィルタを Si ビジコンに装着した場合で, 溶融池の後方まで観察することができる.

一方, Ar アークでは, 近赤外部の Ar の特性スペクトルを避けるようなバンド・パス・フィルタ (干渉フィルタ) の使用が適当である. Fig. 9 はこれを示すもので, MIG アーク溶接の際, Si ビジコンを用い, (a) ND フィルタ, (b) SC 74 フィルタ, (c) $880 \pm 10 \text{ nm}$ のバンド・パス・フィルタを用いた例である. (a) ではアーク

(a) Image with ND filter attaching to Sb_2S_3 vidicon. (b) Image with SC 74 filter attaching to Sb_2S_3 vidicon.

Fig. 7 Images obtained during fillet welding of CO_2 arc.

(a) Image with ND filter attaching to Si vidicon. (b) Image with IR 90 filter attaching to Si vidicon.

Fig. 8 Images obtained during square groove welding of CO_2 arc.

(a) Image with ND filter attaching to Si vidicon. (b) Image with SC 74 filter attaching to Si vidicon. (c) Image with BPF 88 filter attaching to Si vidicon.

Fig. 9 Images obtained during fillet welding of Ar MIG arc.

像のみしか見られないが, (c) では溶融部もかなり明瞭に見られる.

4. 二値化画像処理による母材溶融状態の検出

4.1 溶融池形状検出のためのしきい値の設定

3. で示したように, 光学フィルタリング処理された画像においても, 溶融池部分はアーク発生部に比べて, その輝度は低い. したがって, 既報の二値化デジタル処理法^{3,4)}により, 溶融池形状を正確に認識するためには, 二値化のためのしきい値設定が重要になる. Fig. 10

Fig. 10 Binary image and threshold value.

はこのことを説明するためのもので, 同図 (a) の画像に対して, しきい値を変化させて二値化したときの, 明部データの数をプロットして (b) に示した. 図において, 横軸は設定しきい値を16進数で表示してある. しきい値を0から徐々に増加させてゆくと, 最初, 明部データ数は急激に減少し, 次に, ややフラットな部分が存在する ((b) 図中の A 点). この部分は (c) に見られるように, 溶融池形状によく対応している. CO_2 アーク, Ar アークなど, 他の多くの画像についても, 明部データ急変点よりやや上方にしきい値を設定すれば, 二値化画像

の明部像は溶融池像とよく対応することを確認した。

4.2 ビード幅の測定

ビード幅の検出は溶融池幅を測定することにより行う。このためのアルゴリズムは、しきい値の設定を 4・1 で述べた方法で行う以外、既報⁴⁾ アーク溶接部直視による開先部のリアルタイム測定アルゴリズムと、ほぼ同様である。Fig. 11 にビード幅リアルタイム測定結果の例を挙げる。これは、CO₂ アークによる I 型開先継手最上層の溶接時に得られた同図左の像に対して、溶融池幅 e~f と共に、開先幅 a~b、ワイヤ位置 c~d も同時に測定している。a, b, c, d が測定できることで、従来発表されている溶融池幅の光学的測定法⁸⁾ より是多機能である。出力は約 70 ms 毎に得られるので、諸々の自動制御を行うには十分な処理速度である。Fig. 12 には、画像処理により測定したビード幅（溶融池幅と対応するものとする；横軸）と、溶接終了後、現実のビードから測定したビード幅（縦軸）との関係を示すが、極めて良

Fig. 11 The test result of real time detection.

Fig. 12 Comparison of measured bead width by image processing with bead width measured on actual bead.

い対応が得られている。

(a) Definition in TV image.

(b) Definition in schematic illustration.

Fig. 13 Definition of shoulder, arc and bottom positions.

(a) Flowchart for measuring penetration depth by detecting shoulder position and arc position.

(b) Flowchart for measuring penetration depth by detecting shoulder position and bottom position.

Fig. 14 Algorithm for measuring penetration depth.

(a) Comparison of distance between shoulder position and arc position with penetration depth.

(b) Comparison of distance between shoulder position and bottom position with penetration depth.

Fig. 15 Comparison of measured penetration depth by image processing with penetration depth measured on cross section of bead.

4.3 溶込み深さの測定

Fig. 13 は Y 型開先継手の CO₂ アーク溶接の際得られる画像であるが、図示のように、ショルダ位置、アーク位置、ボトム位置を定義する。これらの各位置は、Fig. 13(b) の模式図に示した各位置に、それぞれ対応しているものと考えられる。溶接進行中のこのような像に対して、Fig. 14 に示したような手順で、ショルダ位置とアーク位置又はボトム位置を検出し、両者の差を取って、溶込み深さに対応する量とする。なお、アーク位置、ボトム位置は、二値化した画像について、明部最下

端の位置を求めて、それぞれの位置とする。ショルダ位置の検出は既報⁷⁾の開先幅の測定の場合と同様して、明部の屈曲部を求めることによって行う。同図 (a) はショルダ位置とアーク位置を求める場合のもので、ショルダ位置の検出時とアーク位置の検出時では、設定しきい値を変更している。この変更には、Fig. 10 に示した特性を利用している。同図 (b) は、(a) 図の最初のパラメータ決定ルーチンの部分で、ショルダ位置とボトム位置の両方を決定し、差を求めている。Fig. 15 には、溶接後の溶融部断面形状より求めた溶込み深さと、ショルダ位置、アーク位置の差 ((a) 図)、又はショルダ位置、ボトム位置の差 ((b) 図) の関係を示している。両者とも、Fig. 12 ほどではないが、かなりよい対応を示している。二値化デジタル画像処理によって、ショルダ位置、アーク位置の差を求める場合、約 170 ms 毎に出力が得られ、ショルダ位置、ボトム位置の差を求める場合は約 30 ms 毎に出力が得られる。なお、Ar アークについても、4.2、4.3 と同様の結果が得られることを確認した。

5. 結 言

この論文は以下のように要約される。

- (a) 4 種類のアーク光と溶融池のスペクトル測定の結果、それぞれ特徴のあるスペクトル・プロファイルを示すことを確認した。
- (b) 上記の測定結果を利用して、撮像管と光学フィルタを選定すれば、溶接過程進行箇所から、溶融池を強調した画像が得られることを示した。
- (c) 上記の画像を既報の簡易型二値化画像処理で処理することにより、ビード幅、溶込み深さのリアルタイム測定が可能であることを示した。

参 考 文 献

- 1) 荒田、井上；アーク熱源の自動制御化溶接に関する基礎的研究（第1報）、本誌、48-7 (1979)、493s-498s
- 2) 荒田、井上；アーク熱源の自動制御化溶接に関する基礎的研究（第2報）、本誌 48-7 (1979)、695s-700s.
- 3) 荒田、井上；溶接自動制御系におけるパターン計測と処理へのコンピュータの応用、本誌、46-3 (1977)、127s-134s.
- 4) 井上；溶接プロセスのオンライン検出のための画像処理（第1報）、本誌、49-7 (1980)、609s-613s.
- 5) T. Itoh, T. Hagiwara, S. Hasebe, S. Kitaguchi and S. Takei; Study on Remote Control System of Visible Arc Welding by Monitoring with I.T.V., The 2nd Int. Sympo. of JWS(1975), [I] Session 3, 171s-176s.
- 6) M.I.T.; Wavelength Tables, The M.I.T. Press (1969).
- 7) 日立電子(株)提供資料より
- 8) A.R. Vroman and H. Brandt; Feedback Control of GTA Welding Using Puddle Width Measurement, Weld. J., 55-9 (1977), 742s-749s.