だ。まず、放電形態タイプBに銀を蒸発させた場合の結果を Fig. 11 (a)に示す。銀蒸発前後の電圧上昇量は約50 Vであったが、電位分布には蒸発前後での変化がほとんど見られなかった。Fig. 11 (b)に、放電形態タイプCに銀を蒸発させた場合の結果を示す。銀蒸発前後の電圧上昇量は約20 Vであり、この時、電位分布には、陽極近傍 ($L=10$ mm) から陰極にかけて均等に約20 Vの蒸発前後の変化が見られる。以上より、銀を蒸発させた時の放電電圧の上昇分は、タイプBの場合には陰極降下に現われ、タイプCの場合には陽極降下に現われると言える。この理由は、銀を陽極側から蒸発させているために、タイプCのように圧力が高くなると平均自由行程が短くなって蒸発粒子が陽極近傍に集中してしまうためであると考えられる。すなわち、圧力が変化すると、蒸発粒子の放電への影響が陰極近傍から陽極側へ変遷すると推論できる。

4. 結 論

本研究では、プロセスプラズマとしての低真空直流グロー放電の形態を観察し、さらに、金属を蒸発させた時のグロー放電特性に与える蒸発粒子の影響について検討してきた。以下に、得られた主な成果を要約する。

(1) ヘリウム、アルゴン、水素、窒素における放電形態は、共に気体圧力や放電電流によって、発光部や暗部の分布状態が連続的に変化する。

(2) 放電形態の変化には、気体の種類によらない系統的な遷移過程が存在し、四つの放電形態(タイプA, B, C, D)に分類される。また、この放電形態の遷移境界は、気体のイオン化エネルギーや平均自由行程によって

支配される。

(3) プロセスプラズマとしての直流グロー放電の発光部や暗部の分布状態は、細径放電管のグロー放電において確認される発光部や暗部の分布状態と比べて異なる3次的な広がりを与える。

(4) アルゴングロー放電中にアルミニウム、スズ、銀を蒸発させた場合、アルミニウムの蒸発に対しては放電電流は上昇し、放電電圧は減少し、一方、スズや銀に対しては放電電流は減少し、放電電圧は上昇する。これより、金属の種類によって放電中でイオンとして存在する割合が異なるが、これらはイオン化エネルギーが1つの要因となって生じると考えられる。

(5) 金属を蒸発させた時の放電電流の変化量は、蒸発量が大きいほど多くなるが、初期気体圧力が高くなるほど放電状態に対する蒸発粒子の影響は少なくなる。

(6) 銀を陽極側から蒸発させた場合、放電電圧の上昇分は、タイプBの場合には陰極降下に現われ、タイプCの場合には陽極降下に現われる。グロープラズマ中での金属蒸発粒子の分布状態は初期気体圧力に大きく影響される。

(7) 初期圧力が高くなるにつれて、蒸発粒子の放電への影響が、陰極近傍から陽極側へと変遷する。

参 考 文 献

- 1) 難波, 毛利: イオン蒸着による銀薄膜, 応用物理, 45(1976), 1092.
- 2) 村山, 松本, 柏木: イオンプレーティング, 応用物理, 47(1978), 485.
- 3) 武田: 気体放電の基礎, 東明社 (1973), 91.

MAG 溶接中の溶落ち現象に伴うアーク音の計測*

井上 勝敬**, 高橋 康夫**, 張 津春***

Measurement of Arc Sound with Burn Through in MAG Welding*

by Katsunori Inoue**, Yasuo Takahashi** and Jin-chun Zhang***

The change in arc sound with burn through in MAG welding was measured, being related with the welding current. Also, we observed the change in arc morphology with the burn through by a CCD camera. The welding current was 300 A and the welding speed was 5 mm/s, that is, the welding was carried out only in the spray transfer region. We made holes in the workpiece with diameters of 4-9 mm in advance of welding and intentionally produced the burn through.

Two types of burn through were observed. One of them was the stagnation type in which molten metal temporally stands on the hole before the burn through. In the other, the molten metal does not stagnate. In the stagnation type, the arc sound instantly becomes low immediately before the burn through and increases suddenly at the same time when the burn through occurs.

Key Words: Arc Sound, Burn Through, MAG welding, Welding Current, Molten Metal, FFT.

1. 緒 言

アーク溶接過程から、その過程と密接に関係する情報

を抽出することは、溶接進行状況の監視や制御を行う上で必要かつ重要な課題である。有益な情報の一つに、アーク溶接中に発生する音響信号(以下、アーク音と呼ぶ)があげられる。これは、溶接アーク現象と密接に関係し、溶接状況を監視する際、モニタリングの対象として、その可能性が検討されている¹⁻³⁾。溶接電流が変動するとアーク音もそれに連動し変化する。また、溶接対象物にホールや断差があるとそれらに対応した特徴あるアーク音

*原稿受付 平成4年11月17日 平成4年度秋季全国大会で発表

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

*** 大阪大学大学院 Graduate Student, Osaka Univ.

変化が計測される¹⁻²⁾。そのようなアーク音の変化はアーク形態の動的変化に対応して生じるものと考えられる。溶落が生じる場合もアーク形態が変化すると考えられるので、それに伴ってアーク音も特徴ある変化を来すことが期待される。そこで、本研究では、MAGアーク溶接過程中に生じる異常現象の一つである“溶落ち”現象とアーク音との関係を明らかにし、アーク音によって溶落ちの検知が可能であるかを検討する。また、溶落ち現象とアーク形態の動的変化を観察し、さらに、アーク音と溶接電流との関係を考慮する。

2. 実験方法

溶接法は、20%CO₂のMAGアーク溶接であり、サイリスタ制御の直流定電圧特性電源を採用した。使用したワイヤーは、その径が1.2 mmの軟鋼用ソリッドワイヤーである。ワイヤー供給速度215 mm/s、溶接速度5 mm/s、突き出し長25 mm、ガス流量20 l/min、溶接電流300 Aのスプレー移行域の条件において、ワイピングなしで溶接を実行した。試料は、幅120 mm、厚さ16 mmの軟鋼板で、角度75度のV開先(ルート長:1 mm以下)をその溶接面に施した。溶接に先だって、溶接開始点から20 cmの所に、予め溶接線上に、断面が円形の穴を開け、その位置で溶落ちが生じるように配慮した。溶落ちは、穴の位置での溶融金属の表面張力がアーク圧力とその重力の和に耐えられなくなったとき生じると考えられる。穴の直径が大きくなるにしたがい表面張力による支持力*は小さくなるので、穴の直径によって溶落ち状況は影響されることが期待される。そこで、本研究では、穴の直径を4, 6.5, 9 mmφと変えて実験を行い、溶落ちの違いを比較した。後で述べるように、4 mmφの穴では、溶落ちが起こらなかった。

Fig. 1に、溶接装置と計測システムの概略図を示す。アーク音の計測には、無指向性エレクトレットコンデンサーマイクロホン(20 Hz~9.2 kHzまで相対感度一定)を使用した。アーク音の計測には、文献¹⁻³⁾からこの周波数範囲で十分と判断した。マイクロホンは、図に見るように、溶接方向に向けて穴の位置から見て仰角45°の位置

Fig. 1 Schematic illustration of the system for measuring arc sound and welding current.

*隙間(穴)が円形である場合、 $(2\sigma/r)$ の圧力が上方へ働く。ただし、 σ は表面張力、 r は表面曲率である。 $r > (d/2)$ 、 d は穴の直径である。

に取り付けた^{**}。アーク音と同時にアーク電流も計測した[†]。

計測した信号は一旦データレコーダ(TEAC RD-101T)に保存し、デジタル信号解析に供した。サンプリング周波数 f_s は、主に48 kHzとした。このデータレコーダは f_s を48 kHzにすると20 kHzまでの波形の復元が保証されている。電流・音計測と同時に、背後からキセノンランプで照らし、CCDカメラにより溶接中のアークの変化と溶落ち時の溶融金属の移動の様子を撮影し、ビデオレコーダ(VTR)に収録した(キセノンランプはFig. 1においてちょうどトーチの真後ろに位置する)。画像と電流・音信号とを対応させるため穴10 mm手前にトーチ中央(ワイヤー)が差し掛かった時点でトリガ信号を電流に重畳した。さらに、穴の位置の真横・板上部に針を立てておき、画像上でマーカの役目を果たすように工夫し、溶落ちとアーク柱の位置関係を把握できるようにした。

3. 実験結果および考察

Fig. 2に、アーク音と溶接電流の計測結果を示す。前もって作製した穴の位置を横棒で図中に示している。矢印kは電流に重畳させたトリガ信号を示している。これは、穴10 mm手前にトーチ中央(ワイヤー)が差し掛かった時点で相当する。(a)図のように溶落ちが生じない穴4 mmの場合では、平均溶接電流はほぼ一定であるが、溶落ちが生じる(b)と(c)とでは、電流が一度低下することがわかる。矢印aで示した時刻では、まだ正常ビードが形成されているが、矢印bの所から、非定常な溶融池移動が見られるようになる。後で述べるように、φ6.5 mmの(b)図では、矢印bからcまでは、溶落ちが見られず、cの時点で一度に溶落ちが生じる。穴径がφ9 mmの(c)では、b~cの間でも溶落ちが見られ、cの時点で溶落ちが終了する。

穴径がφ6.5 mmの場合、穴上部の溶融金属はその表面張力によって支えられ、ある程度は滞留するが、アーク中央部が穴中央に差し掛かると、アーク圧力の影響が大きくなり、また、アーク加熱による溶融池そのものの粘性係数や表面張力の低下も加わり、釣り合いが崩れ、その結果、溶落ちが生じたものと考えられる。一方、φ9 mmの穴径では、表面張力によって持ち応えることがもともと出来ず、溶融池が穴に達したら徐々に溶落ちが生じたと推察できる。以後、前者を滞留型溶落ち、後者を非滞留型溶落ちと呼ぶことにする。非滞留型溶落ちに対するアーク音変化は、滞留型に比べて再現性に乏しかった。

アーク音振幅は、常に変動しているが、滞留型溶落ち(φ6.5 mmの穴)の場合、溶落ちと同時に(cの時点で)その振幅が大きくなる。その後、平均溶接電流がもとの状態に回復するまで、アーク音の大きさは何度となく変動する。また、Fig. 2(b)及び(c)において、溶落ち直後から、

**カメラとマイクロホンはトーチとともに移動する。ただし、溶接進行方向に関して直角に(前方から)撮像した場合は、カメラは固定した。

†トーチ/母材間電圧の変動は期待したより小さく、また、溶落ちに伴う突き出し長の変化等の影響により、アーク電圧の正確な値は計測出来なかった。これらの理由により、本研究では、アーク音とアーク電圧については検討しないが、このアーク電圧も溶接時の種々の異常現象を検知する上で重要な計測対象と考えられる。

Fig. 2 Change in welding current and arc sound waves with time. (a) $\phi 4$ mm without burn through, (b) $\phi 6.5$ mm (the stagnation type in which molten metal temporarily stands on the hole) and (c) $\phi 9$ mm (the unstagnation type).

大きな振幅の変化を来す鋸歯状波がいくつか見られる。このような鋸歯状波はアークが大きく変動した時のみ出現する。このようなアーク変動はアーク圧力の急激な変化を意味しているので、鋸歯状波もアーク圧力の急激な変化に起因するものと考えられる¹¹⁾。なお、溶落ち後、平均電流が元にもどると(図の時刻15 sの位置)アーク形態も正常にもどる(溶融池状態が準定常状態に達したかどうかは定かではないが、外観からはほぼ回復しているようであった)。

MAG 溶接では開先の隙間が9 mm 以上になることは希であり、よく見られる溶落ち現象は滞留型溶落ち($\phi 6.5$ mm のもの)に属すと考えられる。本報告では、主に $\phi 6.5$ mm に対する溶落ち現象とアーク音変化について検討する。

Fig. 3 は、滞留型(穴型6.5 mm)溶落ちを伴う溶接過程の観察結果である。撮影結果の再生画像では溶融池の様子も観察できるが、ビデオプリンタに出力すると、この部分の像は、図に見られるように、不鮮明になる。溶

Fig. 3 Welding arc morphology obtained by a CCD camera when the arc moves through a hole of $\phi 6.5$ mm. The hole was made on the welding line in advance. (a)–(d) correspond to the positions a to d in Fig. 2 (b), respectively. (a) Normal arc welding on the way to the hole. The molten pool is in a quasi-steady state, (b) When the molten metal stands on the hole, (c) When the burn through is produced, (d) Immediately after the welding arc passes through the hole.

Fig. 4 Schematic illustration of a burn through phenomenon. Figures (a), (b), (c) and (d) correspond to the photos a, b, c, and d in Fig. 3, respectively.

融池像はビデオ信号、数フレーム分の情報で認識されるためと考えられる。そこで、再生画像の目視によって得た溶融池の動きを概略図として写真の右側に示した。(a)は正常溶接時の写真で、(b)は、穴の上部に溶融金属が溜り始めたときの映像である。このとき、まだ溶落ちが生じていない。(c)は溶落ちが生じているときのもので、(d)は溶融金属がすべて溶落ちた後の映像である。この一連の過程の観察から、断面の様子を推測して概略すると、Fig. 4 のようになる。図(a)~(d)は、Fig. 3 の(a)~(d)に各々対応している。また、それぞれの時刻は、Fig. 2 (b)の矢印 a ~ d で示した時点に相当する。これらの観察から二つ

¹¹⁾このような鋸歯状波の正確な計測にはDC域まで感度を有する圧力センサーが必要になる。本研究では、音圧測定範囲を可聴音に限定しているので、鋸歯状波に見られる圧力変動の正確な検討はしていない。

Fig. 5 Photos of the front welding arc taken in the welding direction. (a) Normal welding situation, (b) when the molten metal stands on the hole (see the figure b of Fig. 2(b)), (c) The moment the burn through occurs (c of Fig. 2(b)). The hole diameter is 6.5 mm.

の特徴ある事実が明らかになった。既に示唆したように、一つは、溶融金属が穴の上で溜り、アークが穴直上付近に来ると、一度に溶け落ちることである。他の一つは、溶落ちと同時にアークが一度緊縮するということである。Fig. 5 に示すように、溶接方向前方から撮像すると、アークの緊縮の様子がよくわかる。Fig. 5 の写真で、(a)～(c)は Fig. 4 の概略図(a)～(c)にそれぞれ対応している。写真(c)に見られるように、溶落ち時にアークが一度緊縮するのがわかる。また、同様の観察から、アークが穴に近づいていくと突き出し長が長くなり、溶落ち時に、アークの上端部分が 5 mm ほど下がるように見える。すな

Fig. 6 Welding current and arc sound waves when the burn through occurs. The hole diameter is 6.5 mm. The burn through for the hole of $\phi 6.5$ mm suddenly occurs at the position c (or c_2).

Fig. 7 Welding current and arc sound waves enlarged with respect to the time. (a) At the position a of Fig. 2(b), (b) At the position c of Fig. 2(b) or Fig. 6, (c) At the position d of Fig. 2(b).

わち、溶落ち時には、アーク長が短くなり、その分、突き出し長が長くなることが推察される。

Fig. 6 は Fig. 2(b)の時点 c の近傍の時間軸(横軸)に関する拡大図である。この図に見られるように、アーク音(の振幅)は、溶落ち直前で小さくなり(c_1 点)、溶落ちが観察された c の直後に一度、大きくなることがわかる。Fig. 7 は、その場合の波形の違いと変化を詳細に示したもので、(a)図は、Fig. 2(b)の a (正常時)に、(b)図は、Fig. 6 の c の近傍(溶落ち時)に、それぞれ、対応している。(b)図のアーク音の波形について、右寄り中央部に大きな

Fig. 8 FFT analyses of arc sound waves for the hole of $\phi 6.5$ mm (stagnation type burn through). (a) When a normal welding situation is established (Mark a of Fig. 2 (b)), (b) Immediately before the burn through occurs.

ピークがみられるが、これは、Fig. 6 の c_2 で示したピークに相当するものである。また、(c)図は、Fig. 2 (b)における溶落ち後の d の部分に対応しているため、そのアーク音振幅は、比較的小さくなっている。しかし、Fig. 2 (b)および(c)で示されるように、溶落ちから溶融池が再形成される期間では、アーク音は大きく変動する。したがって、溶落ち後は、常に、Fig. 7 (c)のような波形を呈するとは限らない。

Fig. 8 は、正常溶接時(a)と溶落ち直前(b)のアーク音のFFT 解析結果である。これらのスペクトル曲線は、3点平均化処理^{*}を施して得た図である。二つの解析結果の比較から、溶落ち直前で、いくつかの周波数成分が欠如していることがわかる。さらに、0～8 kHz の周波数帯域に関して、(a)の正常時では、相対強度は、常に-40 dBを上回っているが、(b)では、-40 dBを下回っている。実際に、溶落ち瞬間でアーク音が小さく(低く)なるように聞こえる。 $\phi 6.5$ mm の穴の場合、溶融溜りが穴上部で形成され、それがアーク圧力の負荷によって、一気に溶落ちる。この様な滞留型溶落ちでは、アーク形態は、Fig. 5 に示したように急速に緊縮していき、溶落ちが完了する。アークが緊縮しかけたときは、すでに溶落ちが開始し、それに連動して、Fig. 8 (b)に示すアーク音のスペクトルが計測される、すなわち、アーク音の変動は、このようにアークの緊縮膨張に連動すると考えられる。とくに、Fig. 9 に見られるように、溶落ち後は溶融池の欠如によ

Fig. 9 Fluctuation of welding arc after the burn through is produced. The hole diameter is 6.5 mm. The time progresses in alphabetical order.

り、アーク形態の変動は著しい。したがって、アーク音も頻繁に変化するようになる。なお、Fig. 9 は、溶落ち直後から 5 秒間で生じたアーク形態の変化を示す写真である。

最後に、非滞留型溶落ちについても簡単に検討しておく。Fig. 10 に、 $\phi 9$ mm の穴に対するアーク音と溶接電流の変化を示す。矢印 b から c にかけて溶落ちが生じ、c では溶落ちが完了する。この場合、溶落ち中溶融池の変動に伴いアーク長が変動し溶接電流も大きく変動してしまう。さらに、c の直後に、アーク音に大なピークが見られる。c の手前の FFT 結果と正常時の結果とを比較すると、Fig. 11 のようになる。(a)図が正常時のアーク音に対する FFT 結果であり、(b)図が Fig. 10 の矢印 c の

^{*} 偶発的なパワー変動を回避するため、サンプリング周波数 48 kHz で計測した 2^{18} (4096) 個のデジタル信号 (時間として約 85 ms) の FFT 結果を、周波数の小さい点から順に 3 点づつ (パワー値を) 平均化することによって図示している。ただし、図示する周波数域は 0～8 kHz に限定した。結果として、スペクトルの差異がより明確になった。なお、計測期間 (85 ms) とマイクロホンの感度特性から、20 Hz 以下のスペクトルは無視している。

Fig. 10 Change in welding current and arc sound waves with time for a hole of $\phi 9.0$ mm.

Fig. 11 FFT analyses of the arc sound when the burn through occurs for the hole of $\phi 9.0$ mm (unstagnation type burn through). (a) Normal welding situation, (b) Immediately before the position c of Fig. 10.

近傍の結果である。アーク音の波形だけを見る限り、このピーク直前のアーク音信号は、 $\phi 6.5$ mm に対する Fig. 6 の c_1 近傍の信号ほど顕著ではないが、FFT 結果を考慮すると、 c 近傍の結果(b)は、Fig. 8 (b)の結果に類似していることが分かる。したがって、滞留型、非滞留型を問わず、溶落ち時（非滞留型では、溶落ち終了）直前に、特徴あるアーク音が発生すると結論できる。本研究では、他のアーク現象に伴うアーク雑音をできる

だけ避ける目的で、ウィーピングなしの溶接（スプレー移行域）を実行した。その結果、雑音が十分小さい場合は、溶落ちに伴うアーク音信号は検知可能と考えられる。しかし、実際の溶接過程における溶落ちを検知するには、溶接過程中的アーク形態変化とアーク音の関係をさらに研究する必要がある。また、他の溶接過程に伴うアーク音^{1,2)}と溶落ちに伴うアーク音との相違点を明確にする必要もあろう。

4. 結 論

MAG 溶接における溶落ち現象に伴うアーク音と電流波形を計測し、それらの変化の特徴を検討してきた。さらに、CCD カメラにより、その際のアーク形態変化を観察した。ただし、今回は、他の雑音をできるだけ除き、溶落ち現象とアーク音・電流波形の関係を検討するにとどめている。本研究で明らかになった主な事柄を列挙する。

- (1) 溶落ちは、穴の大きさに依存し、その形態は大きく二つに大別される。一つは、溶融金属が穴上部で一端溜る滞留型溶落ちであり、 $\phi 6.5$ mm の穴に対して見られた。他の一つは、 $\phi 9$ mm の穴のように開先の隙間が大きいと見られ、溶湯溜りを示さない非滞留型溶落ちである。
- (2) 滞留型溶落ちの場合、アークが穴中央部に来た瞬間に溶落ちが生じ、溶落ち直前にアーク音は特徴ある信号を発生する。
- (3) 非滞留型溶落ちでは、穴上部で溶融池が溜ることなく溶落ちが生じるため、滞留型で見られる明瞭な信号は発生しない。しかし、FFT 分析を行うと、溶落ち完了直前のアーク音は、滞留型溶落ちに於ける溶落ち直前のアーク音信号に類似していることが分かった。
- (4) また、非滞留型溶落ちでは、溶落ち時に溶接電流波形が大きく変化することが分かった。
- (5) 溶落ち後、溶融池の欠如に伴いアーク形態が大きく変動する。それに伴って、アーク音は変動する。ビデオ観察から、アーク音の変動はアークの緊縮膨張に起因することがわかった。
- (6) 他の現象に伴う雑音が十分小さい場合、溶落ちに伴うアーク音は計測可能である。この場合、溶落ちはアーク音と溶接電流によって検知が可能と考えられる。

参 考 文 献

- 1) 荒田, 丸尾, 井上, 二俣, 棟: 溶接アーク音に関する研究(第一報), 本誌, 47(7), (1978) 432-440.
- 2) 二俣, 棟, 井上, 丸尾, 荒田: TIG 溶接アーク音特性に及ぼす電流波形の影響(I)及び(II), 本誌, 49(1), (1980) 39-45及び50(12), (1981) 1187-1190.
- 3) 同上著者: アーク音の溶接プロセス検出への適用, 溶論集, 1(3), (1983) 305-310.