- 度, 本誌36-10 (1967), 1117-1124
- 4) R. B. Bird, W. E. Stewart and E. N. Lighthoot; *Transport Phenomena*, 389-455, Wiley
- 5) 日本機械学会熱・熱力学部門委員会編; 伝熱工学資料改訂版, p. 217
- 6) TOULOKIAN 他; *SPECIFIC HEAT* (Vol. 4), *THERMAL RADIATIVE PROPERTIES* (Vol. 7) 他, *THERMO-PHYSICAL PROPERTIES OF MATTER*, PLENUM
- 7) 丸尾, 平田; 電流制御アーク溶接に関する研究, 第78回溶接法委資料 (1980)
- 8) 安藤, 長谷川; 溶接アーク現象, 産報
- 9) A. A. Erokhin; *The Temperature Field of the Liquid Metal Pool in Arc Heating*, *Svar. Proiz.*, No. 2 (1982), 16-17

薄板の局部フラッシュの発生状況について*

—フラッシュ溶接に関する研究 (第4報)—

田沼欣司**, 大橋修**

Local Flashing Phenomena of Metal Sheets*

—Study on Flash Welding: Part 4—

by Kinji Tanuma** and Osamu Ohashi**

In previous studies, the total flashing phenomena of the specimen to be welded have been discussed from the waveforms of flashing voltage and flashing current of the steel sheets.

The purpose of this study is to examine the flashing phenomena of limited part of the specimen to be welded. The materials used are of carbon steels, copper and aluminum sheets. The local flashing phenomena of the specimen to be welded are detected by the intensity of the light from the part through the slit of 1.2 mm width placed in 7 mm from the welds. The following results are obtained.

1. The local flashing is a discontinuous phenomenon, namely the flashing of several times occur at intervals of 1 or 2 ms after the flashing off of 10 up to 40 ms or 40 ms and over.
2. Such a periodical flashing is extensively in evidence during the flashing of low or medium carbon steel, copper and aluminum.
3. There is a secondary no load voltage that makes the maximum number of local flash times. The voltage is of about 6 volt in this experiment of low carbon steel sheet.
4. The mechanical properties of the welded joint of low carbon steel sheet can not attain to the excellent results under the conditions of the secondary no load voltage that makes the maximum number of local flash times.
5. There is risk of upsetting the several parts of the specimen after the flashing off of more than 10 ms, even if the carbon steel sheets are welded under the optimum welding conditions.

1. 緒言

フラッシュ溶接では、無数の金属の火花があたかも連続的に発生しているかのように観察されるが、実際には継続的かつ不規則であることが溶接部の高速度写真から明らかにされている。また、フラッシュの発生形態とその機構についても検討がなされている¹⁾。ところが、板のフラッシュ溶接部には断続的な欠陥がしばしば発生

し、この種の欠陥は不連続なフラッシュ発生と何んらかの関連性があるものと予想される。しかしながら、溶接部の限られた部分のフラッシュ現象は明らかにされていない。本研究は薄板のフラッシュ溶接の際の局部フラッシュの発生回数及びその頻度と溶接諸条件との関係を明らかにし、溶接部の欠陥の発生機構の解明のための基礎資料を得ることを目的とした。

2. 供試材及び実験方法

本実験の供試材には、冷間圧延鋼板 (SPCC) のほか、

*原稿受付 昭和58年8月1日 (昭和58年度春季全国大会にて発表)

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

Fig. 1 Detecting method of local flashing phenomena.

Fig. 2 Flashing current and collector current of photo transistor due to flash of all welds of SPCC without shelter 1. ($V_{20}=4.6$)
(a) All flashing time (b) Expansion of duration A

炭素鋼 (S45C), 銅及びアルミニウムの板材を用いた。溶接断面積は SPCC で $1.2\text{ mm} \times 66.5\text{ mm}$, その他の材料は $1.0\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ とした。主な溶接条件は第1報²⁾ とほぼ同様に選択した。すなわち, 単相交流による等加速度プラテン移動方式の溶接機を用い, 溶接用トランスには低内部インピーダンスであるタイプAを用いている。また, 全実験において初期電極間隔は 15 mm , フラッシュ代は片側当たり 2 mm とした。なお, プラテンの加速度は Fig. 9 を除き 1.0 mm/s^2 とし, 1次回路の開閉にはマグネットスイッチを使用した。

溶接部の局部フラッシュは Fig. 1 に示すように被溶接材の表面から約 7 mm 離れた位置に設けた幅 1.2 mm , 長さ 8 mm のスリットから入射する光を 250 mm 離れた位置に設けた高感度, 高応答性 (立上り時間 $2\text{ }\mu\text{s}$) のフォトランジスタ (TDS 601, 東芝製) で検出した。本方法によると被溶接材の板幅方向の約 1.2 mm の部分のフラッシュ現象が観察できる。なお, 測定に当たり高温の金属粒子及び溶接部から放射される約 500 nm より長波長の光を減衰させる目的でブルーフィルタ (ニコン B

Fig. 3 Flashing current and collector current of photo transistor due to flashing metals only.

Fig. 4 Relation between temperature of W-wire and relative collector current of photo transistor.

8) を用いた。また, 飛散する金属粒子から測定器具を保護するために銅製のシールドのほか, 厚さ 1.0 mm の透明な板ガラスと2箇所エアーカーテンを用いた。このようにして得た電気的信号はフラッシング電圧及びフラッシング電流と共にデータレコーダ (周波数特性, DC ~ 20 kHz) に記録し解析した。

3. 実験結果及び考察

3.1 フォトランジスタによるフラッシュ現象の観察

Fig. 2 はシールド1を用いず, SPCC 板に垂直方向にフォトランジスタを設けたときの溶接部の全体からの放射光によるコレクタ電流 I_c (光電流ともいう) とフラッシング電流 I_f (2次電流) の代表的なオシログラムである。なお, 2次無負荷電圧は 4.6 V である。(a) は全フラッシング時間のもの, (b) はフラッシング過程末期のAで表示した期間の時間軸を拡大したものである。使用したフォトランジスタのコレクタ電流は, ある範囲内では物体からの放射エネルギーに比例する。また, 放射エネルギーはステファン・ボルツマンの法則として知

*Fig. 4 の縦軸の1が各オシログラムの縦軸の1目盛に当たる。

Fig. 5 Typical oscillogram of flashing current I_f and collector current i_c due to local flashing.

られているように、その物体の絶体温度の4乗に比例する³⁾ところから、光電流は溶接部の相対温度に対応していると考えられる。また、(b)の I_f と i_c の対比から明らかなように i_c のピークはほぼ I_f の急激な低下時期と対応しているところからフラッシュの発生を表していると考えて差支えない。Fig. 3は溶接部の端部から約10 mm離れた所でフラッシング中の飛散金属粒子のみをFig. 1の方法で測定した場合のオシログラムであり、光電流 i_c (スリットを用いた場合のコレクタ電流)にはほとんど変化が認められない。この結果はFig. 1の方法を用いると飛散金属粒子に実用上影響されことなく溶接部の局所の現象のみを検出できることを示している。

Fig. 4はフラッシュ過程の溶接部を想定し、直径1.2 mmのタングステン・ワイヤを用い、図中に示すようなスリットを通し約1.2 mm×1.2 mmのタングステンからの放射光によるフォトリサジスタの光電流 i_c^* とタングステンの温度との関係を求めたものであり、1400~2200℃の範囲においてはステファン・ボルツマンの法則にほぼ従っている。なお、温度測定には光温度計を用いた。そして、鋼の融点付近における光電流は約0.4であり、ほとんど無視できるほど小さく、本測定法によるとセルタ1のスリットから観察できる部分が溶断した時に発生するアーク及びその部分の加熱状況に関する情報が得られる。

3.2 局部フラッシュの発生状況

Fig. 5はSPCCのフラッシング電流 I_f と局部フラッシュに伴う光電流 i_c の典型的なオシログラムである。 I_f の変化から半サイクルの期間内に10回程度のフラッシュが発生していることが分かる。一方、 i_c には1回のピークとその後に緩やかな変化が認められるが、次の1サイクルの間にはほとんど変化は認められない。このピークは、その立上り時期が I_f の短絡相からフラッシュ

Fig. 6 Flashing current I_f and collector current i_c due to local flashing of SPCC. ($V_{20}=4.6$)

Fig. 7 Typical oscillograms shown various forms of local flashing.

相に移行する時期、すなわち I_f が最大値から急速に低下する時期にほぼ一致しているところから短絡部が溶断した直後に発生した局部アークに起因するものと考えられる。そして、 I_f の変化から他の部分で引き続きフラッシュが発生していると考えられるけれども、 i_c にはピークが現われていないところから局部フラッシュは、この期間内に視野内で1度だけ発生したものと解釈できる。なお、ピーク後の緩やかな i_c の変化はアークによって急速に加熱された局所の温度変化に対応しているものと思われる。Fig. 4で観測したタングステン・ワイヤが溶接部の局部と等価であると考え、材料端部の温度は1800℃前後と推定できる。

Fig. 6は2次無負荷電圧が4.6 Vの場合のSPCCのフラッシング電流 I_f と局部フラッシュに伴う光電流 i_c を示したものである。Fig. 2(a)と比較し局部フラッ

Fig. 8 Effect of secondary no load voltage on frequency and average interval of local flash.

の発生回数は少なく、かつフラッシュ間隔が不規則である。Fig. 7 は2次無負荷電圧が3.4 Vと5.7 Vの場合のSPCCのフラッシング電流 I_f と局部フラッシュに伴う光電流 i_c の代表的なオシログラムである。 I_f については第1報で示したように、ある規則性が存在しているが、局部フラッシュの発生には明確な規則性は認められない。しかし、 i_c のピークは2, 3回続いて発生し、その後1サイクル程度の休止期間を有し、再び2, 3回続いて発生するという基本的な傾向が認められる。また、局部フラッシュには種々の形態が存在し、ピークの後に i_c が緩やかに減衰する場合(図中にAで示してある)や増加する場合(B)があり、更にピークのみの場合(C)やピークが認められない場合(D)などがある。以上のように局部フラッシュの発生は規則的なものでなく、極めて複雑であるところから局部フラッシュ現象や全体のフラッシュ現象は統計的に取扱うことが必要である。

3.3 局部フラッシュの発生回数

フラッシュ過程の後半は、その現象が比較的一定であることを第1報で述べた。この時期はアプセットに移行する時期であってフラッシュ溶接にとって非常に重要である。したがって、局部フラッシュの発生回数についてはフラッシュ過程の後半について検討した。Fig. 8 は2次無負荷電圧 V_{20} とSPCCの板幅の中心付近の局部フラッシュの1秒間当たりの発生回数との関係を示したもので、6 V付近で局部フラッシュの発生回数は最大になっている。また、板幅方向の両端の約3 mmの部分を除く、他の部分でも局部フラッシュの発生回数はほとんど変わらない。なお、フラッシュ発生回数はオシログラムの1目盛り以上の光電流 i_c の鋭いピークを計測したものである。Fig. 8の傾向は第1報で述べたように半サイクル内に全溶接部から発生するフラッシュの発生回数と V_{20} との傾向とよく類似している。また、4.6 Vにお

Fig. 9 Effect of platen acceleration on frequency and average interval of local flash.

るS45Cの局部フラッシュの発生回数を比較のため図中に示したが、SPCCとほとんど同じである。図中の破線は平均のフラッシュ間隔を示したもので6 V付近では10 msに1回の割合でフラッシュが発生していることになり、低電圧の条件ほど平均のフラッシュ間隔が大きくなる傾向をもっている。ところで、SPCCのフラッシュ溶接継手の機械的性質は V_{20} が低いほど向上する⁹⁾。したがって、本実験の結果はフラッシュの発生回数が溶接継手の品質を決定する重要な要因でないことを示す点で注目すべきである。また、 V_{20} が6 V付近でフラッシュの発生回数を最大にする理由は明らかでないが、フラッシュの発生回数以外に、フラッシング電流の実効値、最大値、短絡相の期間と電力、被溶接材料の吸収熱量、継手の品質などに対する2次無負荷電圧の影響力が6 V付近でいずれも不連続的に変化している^{2,4,5)}ことも注目すべき現象である。

Fig. 9はプラテンの加速度を変化させた場合の結果である。フラッシング時間は加速度に依存するため、フラッシュ代が1.0 mmを経過した後の期間の局部フラッシュの発生回数を求めた。すなわち、測定期間は加速度1.0 mm/s²の場合は1.0秒間、4.0 mm/s²の場合は0.5秒間である。加速度の増大によって局部フラッシュの発生回数及びその間隔は減少している。これは単位時間に飛散させる金属の量が加速度に比例して増し、エネルギー密度が低下するため、あたかも2次無負荷電圧の低下と同様の現象になっていることによるものと考えられる。Fig. 10は板幅を変化させた場合の結果であり、40 mm前後のとき局部フラッシュの発生回数が最大になっている。この最大になる板幅は2次無負荷電圧に依存し、高電圧ほど板幅の大きい方に移行する傾向を有している。以上の結果から、小形の試験材を用いて大形の試

験材のフラッシュ現象を予測することは極めて困難であることが分かる。

3.4 局部フラッシュの発生間隔とその頻度

局部フラッシュの発生の時間的变化は Fig. 7 の通り規則的でなく、一般に数回続いてフラッシュが発生し、その後 10~20 ms の休止期間が現われる。このフラッシュの休止期間（以下、フラッシュ間隔という）には被溶接材の端部は大気によって汚染される危険性を有している。Fig. 11 はフラッシュ過程後半の 1 秒間に存在したフラッシュ間隔を 5 段階に区分し、2 次無負荷電圧ごとに示したものである。フラッシュ間隔が 2.5 ms 未満の比

Fig. 10 Effect of width of specimen on frequency and average interval of local flash.

Fig. 11 Effect of secondary no load voltage on number and duration of flashing off at local part per one second in late latter stage.

較的連続したフラッシュが各電圧とも全体の 30~40% を占めている反面、20~40 ms の間隔の粗いフラッシュが 15~20% を占め、更に 40 ms 以上の場合も各電圧下で存在している。そして 2.5 ms 未満のフラッシュ間隔の数は 5.7 V の場合に最も多く、3.4 V 及び 8.3 V ではそれぞれ 1/4 及び 3/5 程度に減少している。これに対し 40 ms 以上のものは 5.7 V 付近で最低になっている。

2 次無負荷電圧が 5.2 V と 7.1 V、あるいは 4.0 V と 8.3 V の場合のように局部フラッシュの発生回数や頻度がほぼ等しくなることがあるが、両者のフラッシュ現象は次のような理由から異なるものと思われる。被溶接材の端部が理想の場合を考えると接触部に投入される電力は電圧の 2 乗に比例し、接触部が溶断に要する時間は高電圧ほど短時間となることから、電圧が異なると端部の加熱現象に差があると考えるのが妥当であろう。事実、2 次無負荷電圧が約 6 V 以上の範囲ではフラッシュ相に依存した発熱が主であるのに対し、約 6 V 以下では短絡相に依存する割合が増大している⁵⁾。そして、フラッシュの発生している時間であるフラッシュ相の全時間に占める割合が、第 1 報で示したように 5~6 V で最大になり、その前後で小さいことから低電圧と高電圧とで局部フラッシュの発生頻度が等しくなる場合が生じたものとする。ところで、2 次無負荷電圧を低下させるとフラッシュが連続して発生するようになると一般に考えられている。この考えは、本実験においては約 6 V 以上の高電圧範囲において成立するが、低電圧範囲では正反対となることが明らかである。

次に、フラッシュ発生後、ある一定期間フラッシュが休止したままアプセットされる可能性について考察する。まず、ある局部がフラッシュ発生後、40 ms 経過しアプセットされる確率を Fig. 11 の結果から求める。フラッシュ間隔が 40 ms 以上のものは全て 50 ms であったと仮定すると、3.4 V では 9 回存在し、その総和は 450 ms となり、この時間内にアプセットされる確率は測定時間が 1 秒間であるところから 0.45 となる。一方、40 ms 経過後にアプセットされる確率は 0.2 である。したがっ

Table 1 Upsetting probability under conditions of flashing off.

Duration of flashing off (ms)	Secondary no load voltage (V)						
	3.4	4.0	4.6	5.2	5.7	7.1	8.3
10 ≤	0.60	0.50	0.53	0.47	0.46	0.47	0.52
20 ≤	0.37	0.22	0.26	0.20	0.21	0.21	0.27
40 ≤	0.09	0.02	0.04	0.01	0.02	0.02	0.05

Material; SPCC

Platen acceleration; 1.0 mm/s²

Fig. 12 Collector current i_c due to local flashing of various materials

て、3.4 V で局部がフラッシュ発生後 40 ms 以上経過しアプセットされる確率は 0.09 となる。なお、板幅方向の局部のフラッシュ発生確率が同じ程度の確からしさであると考え、先に求めた 0.09 の値は、全板幅の 9% に相当する部分が 40 ms 以上の間、フラッシュが休止した状態でアプセットされることを意味していることになる。更に、10 ms 以上 20 ms 未満のフラッシュ間隔は全て 15 ms であり、20 ms 以上 40 ms 未満のものは全て 30 ms であったと仮定すると、各 2 次無負荷電圧におけるそれぞれの確率は Table 1 の通りとなる。この結果は、各 2 次無負荷電圧による溶接部の約半分に当たる部分はフラッシュが 10 ms 以上休止した状態でアプセットされる可能性を有していることを示している。

3.5 鋼、銅及びアルミニウムの局部フラッシュ現象

材質の大きく異なる場合の局部フラッシュの発生状況を比較した。Fig. 12 は 2 次無負荷電圧が 4.6 V の場合の S45C、銅及びアルミニウムの局部フラッシュに伴う光電流 i_c のオシログラムである。なお、SPCC は S45C とほぼ類似であり省略した。各材料とも 10~20 ms ごとに 2, 3 回続いてフラッシュが発生していることから、物性が大きく異なる材料の局部フラッシュの発生機構はほぼ類似であると考えられる。ところで、棒棒のアーク溶接の際の短絡と溶断の発生機構は材料中の炭素の有無によって著しく異なることが指摘されている⁶⁾。鋼の局部フラッシュが 2, 3 回続いて発生することが、アーク溶接の場合のように炭素に起因すると考えると銅やアルミニウムの場合に矛盾する。したがって、連続して生じる局部フラッシュは材料中の炭素に起因するものでなく、次のように考えるのが妥当であろう。フラッシング中の被溶接材の端部は材質やフラッシュ条件によって異なるが、溶融金属で覆われているものと思われる。例えば、S45C の場合には 100 μ m 前後の溶融金属層が存在している⁵⁾。このような端部はフラッシュが発生すると金属粒子の飛散による体積の減少のほか、飛散による反力に

よって局部的に凹みが生じるが、溶融面の振動現象に伴って次の瞬間に隆起し、再び接触が起こりフラッシュが発生する。このような現象を 2, 3 回繰返すと端部には大きな凹みが生じ、プラテンの移動又は近傍からの溶融金属の流入などによる短絡が起こるまでフラッシュは休止するものと考えられる。以上のように無負荷電圧が約 100 V のアーク溶接と 5 V 前後のフラッシュ溶接とでは材料端部の短絡と溶断の発生機構が異なるものと思われる。

4. 結 言

薄鋼板の板幅方向の約 1.2 mm の部分のフラッシュ発生現象をフォトトランジスタを利用する方法で検出し、局部フラッシュの発生回数、発生頻度と溶接諸条件との関連性を検討したほか、銅及びアルミニウムの局部フラッシュ現象との対比を行い、次のような結論を得た。

(1) フラッシング電流波形からはフラッシュが比較的連続的に発生しているように見える場合でも、溶接部の任意の局部フラッシュの発生は不連続、かつ明確な規則性をもたない。しかし、局部フラッシュは 1~2 ms の間隔で数回発生した後、10~20 ms あるいは 40 ms を超えるフラッシュ休止期間を経て、再び発生するという周期性を有している。この周期性は本実験範囲の全ての 2 次無負荷電圧の下で存在している。

(2) 低炭素鋼、中炭素鋼、銅及びアルミニウムの薄板の局部フラッシュの発生パターンはほぼ類似である。

(3) 一定時間内の局部フラッシュの発生回数は、ある 2 次無負荷電圧の条件下で最大になる。本実験による冷間圧延鋼板では 6 V 前後で局部フラッシュの発生回数が最大になる。また、局部フラッシュの発生回数はプラテンの加速度や材料の寸法によっても影響される。

(4) 冷間圧延鋼板のフラッシュ溶接継手の機械的性質が最良になる 2 次無負荷電圧とフラッシュの発生回数が最大になる 2 次無負荷電圧とは明らかに異なる。

(5) 溶接部の局部は、フラッシュ発生後、10 ms 程度にわたりフラッシュが休止した状態でアプセットされる可能性はかなり高い。冷間圧延鋼板の本実験範囲において局部がフラッシュ発生後、10 ms 以上のフラッシュ休止期間の後にアプセットされる確率は約 1/2、また 20 ms 以上となる確率は 1/3~1/5 となる。

最後に、本研究の遂行に当たり有益な御助言を賜った芝浦工業大学、橋本達哉教授並びに株式会社電元社製作所、小保方貞夫次長に対し深甚の謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 安藤、仲田、杉本；鋼のフラッシュ溶接現象の研究（第 1 報）、本誌、39（1970）、1084-1098。同（第 2 報）、本誌 40（1971）、35-53。

- 2) 田沼, 橋本; フラッシュ溶接に関する研究 (第1報), 本誌, 51 (1981), 417-422
- 3) 色彩科学協会編; 色彩科学ハンドブック, 南江堂 (1968), 2
- 4) 田沼, 大橋; フラッシュ溶接に関する研究 (第2報), 本誌, 51 (1981), 850-855
- 5) 田沼, 大橋, 小保方, 長谷川; フラッシュ溶接に関する研究 (第3報), 本誌, 1 (1983), 289-295
- 6) 安藤, 長谷川; 溶接アーク現象, 産報, (1970), 188

鋼の CO₂ アークスポット溶接 (第3報)*

—継手の特性に及ぼす板間隙の影響—

小 野 英 彦**

CO₂ Arc Spot Welding in Steel (Rept. III)*

—Effect of gap on weld joint characteristics—

by Hidehiko Ono**

In the previous paper, empirical formulas that estimate shear tensile force of spot weld and dimensions of nugget cross-section from both welding conditions (welding current, arc voltage, arc time) and upper plate thickness were obtained for CO₂ arc spot welds in steel. These empirical formulas are valid when the gap between upper plate and lower plate is zero. However, in practice, some gap will exist in the weld joint because the force applied to press the plates together is weak.

In this paper, in order to study how the gap affects shear tensile force of weld joint and dimensions of nugget, arc spot weld joints were made using different gaps and the nugget dimensions and shear tensile force were measured. These experimental results were compared with values estimated using the empirical formulas, and the maximum gap width that could be allowed in practice was obtained.

The results are summarized as follows;

- 1) When the gap exceeds 1 mm, button dia. decreases with increasing gap width.
- 2) Nugget dia. increases with increasing gap width.
- 3) Shear tensile force of weld joint increases with increasing gap width. However, when the gap becomes wide and a hole appears in the center of the button, it decreases suddenly.
- 4) The relationship between the practically allowable gap width and the upper plate thickness has been shown graphically.

1. ま え お き

前報¹⁾において、鋼の CO₂ アークスポット溶接における、ボタン径、溶込み深さ、ナゲット径ならびに継手の剪断引張り強さを溶接条件（溶接電流、アーク電圧、アークタイム）と上板厚から推定する実験式を求めた。これらの実験式は、重ね板間隙がないものとして求めたものである。しかし、アークスポット溶接は溶接時の加圧力が弱いいため、実際の継手では何がしかの板間隙があるものと思われる。

そこで、本研究では重ね板の間隙が、ボタン径、溶込み深さ、ナゲット径ならびに継手の剪断引張り強さにどのような影響を及ぼすかを明らかにするため、重ね板間隙を変化させてアークスポット溶接し、各部の寸法と継手の剪断引張り強さを実測した。そして、前報¹⁾で求めた実験式による推定値と実測値の比較を行うとともに、実用上の板間隙の許容限界値を求めた。

2. 実験方法および供試材料

実験に用いた溶接機は、市販の三相全波整流形直流定電圧溶接機に、アークタイムを制御するタイマを取り付けて用いた。上下板厚隙の設定は、Fig. 1 に示すように

*原稿受付 昭和58年8月10日 (昭和57年度秋季全国大会にて発表)

**正 員 日本車輦製造 (株) Member, Nippon Sharyo Seizo Kaisha, Ltd.