

# ティグ溶接におけるアークプラズマ及び溶融池現象に与える活性フラックスの影響

大阪大学接合科学研究所    ○田中 学, 清水孝恭, 寺崎秀紀, 牛尾誠夫  
 (株) 神戸製鋼所                    奥石房樹  
 ハルピン工業大学                    楊 春利

## Effects of activating flux both on arc plasma and on weld pool in TIG welding

by M. Tanaka, T. Shimizu, H. Terasaki, M. Ushio, F. Koshi-ishi and C.L. Yang

### 1. はじめに

活性フラックス（溶接促進剤）を母材表面に塗布し、ティグ溶接を行うと、板厚 6 mm のステンレス鋼を 1 パスで裏面まで溶かし込む深溶込み溶接が可能になる<sup>1)</sup>。これは通常のティグ溶接の約3倍の溶込み深さである。この溶込み深さを大幅に増加させる方法は、「A-TIG 溶接」または「活性化ティグ溶接」と呼ばれ、*the Paton Welding Institute* によって提案されたものである<sup>2)</sup>。しかしながら、この深溶込みメカニズムについては、種々の提案がなされているものの<sup>2-7)</sup> 未だ明確ではない。

そこで本研究では、活性フラックスを用いたティグ溶接における深溶込みメカニズムを明らかにする目的で、プラズマ分光計測法およびレーザ散乱計測法によるアークプラズマ診断、ならびに放射温度計を用いた溶融池表面温度の測定など、種々の計測法によってアーク溶接現象を通常のティグ溶接の場合と比較しながら観察したので、その結果について報告する。

### 2. 実験装置および実験方法

陰極には先端角 60°, 3.2 mm  $\phi$  の 2 % 酸化ランタン入りタングステン、母材としては、50 mm  $\times$  100 mm  $\times$  10 mm t の SUS304 ステンレス鋼を用い、アーク長 5 mm で下向きビードオンプレート溶接を行った。標準溶接条件は溶接速度 200 mm/min, 溶接電流 200 A であり、シールドガスとしてヘリウムを選定した（流量 30 l/min）。Fig. 1 に実験装置図を示し、Table 1 に使用したステンレス鋼の組成を示す。

活性フラックスを塗布する手順は、(1) 試験片表面をアセトンで洗浄する、(2) 活性フラックスを揮発性の溶剤（今回はアセトン）

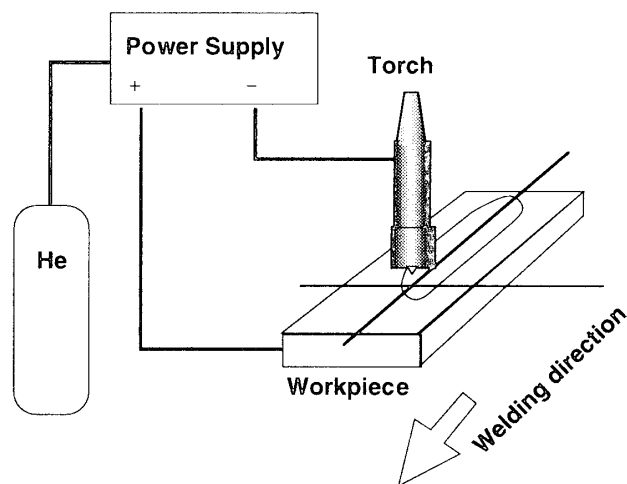


Fig. 1 Experimental setup.

Table 1 Chemical composition (mass %) of work piece.

|                      | C    | Si   | Mn   | P    | S     | Ni   | Cr    |
|----------------------|------|------|------|------|-------|------|-------|
| Work piece<br>SUS304 | 0.05 | 0.43 | 0.87 | 0.03 | 0.002 | 8.19 | 18.14 |

に溶き入れる、(3) 試験片表面に刷毛を用いて均質に塗布する、とした。そして、この活性フラックスを塗布した表面上に、通常の下向きビードオンプレートでティグ溶接を行った。今回、活性フラックスとしては $\text{TiO}_2$ を用いた。 $\text{TiO}_2$ を選定した理由としては市販の活性フラックス（例えば、Fastig SS-7）の主成分であり<sup>1,2)</sup>、 $\text{SiO}_2$ などと比較実験を行った結果、そのビード形状などから、深溶込みメカニズムの主要な部分を占めていると考えられたためである。

また、溶接後の試験片を、切断、研磨し、エッチングしたのちに断面形状を観察した。アーク撮影時は、水平方向と斜め方向から通常のカメラを用いて約4.6 f/sで連続撮影を行った。

### 3. 実験結果および考察

Fig. 2にカメラで撮影したアーク写真を示す。通常のティグ溶接の場合、熔融池からの金属蒸気と考えられる青い色を示すプラズマによってアーク下部全体が覆われている様子が、水平方向および斜め方向ともに観察される。一方、活性フラックスを用いたティグ溶接の場合、水平方向の画像では、この青い色をしたプラズマ領域がアーク下方中央部分に集中している様子がみられる。また、斜め方向の画像から、熔融池の中心部に陽極点のようなものが形成されていることが見受けられる。

このように、Fig. 2は、通常のティグ溶接と活性フラックスを用いたティグ溶接では、プラズマの分布に違いがあることを示唆している。そこで、プラズマ分光計測によってその分布を調べた。その結果をFig. 3に示す。Fig. 2において金属蒸気を主体としたプラズマであると考えられる青い色をした領域は、Fe, Crの金属原子の線スペクトル強度が非常に強い領域とほぼ一致することから、メタルプラズマであると考えられる。

さて、Heのガスプラズマの分布は、Fig. 3に示されるように、通常のティグ溶接および活性フラックスを用いたティグ溶接ともにほぼ同様であることが分かる。しかしながら、メタルプラズマの分布は異なっており、通常のティグ溶接の場合には、アーク下部全体にわたって分布しているのに対して、

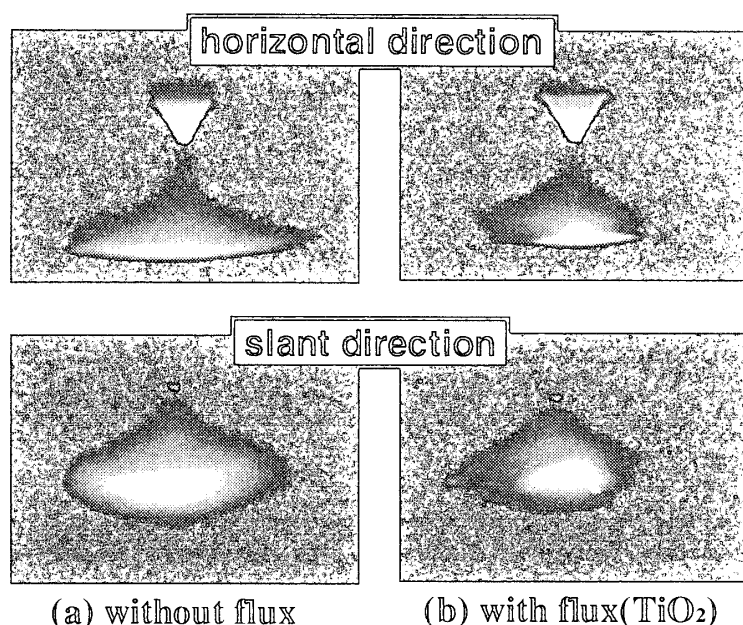


Fig. 2 Photos of arc with and without flux.

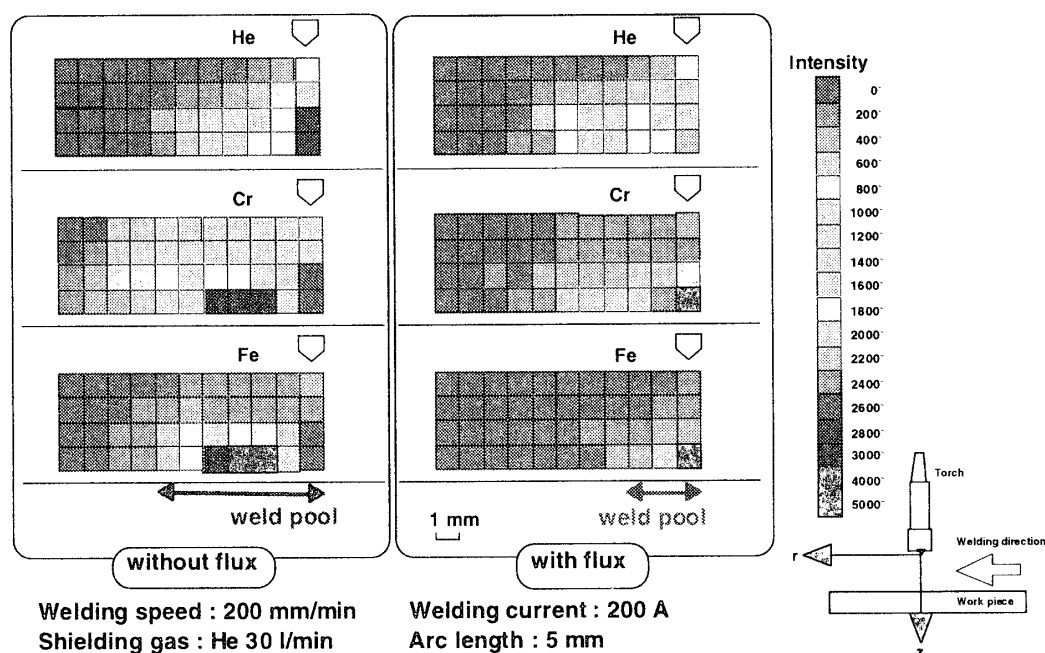


Fig. 3 Spectroscopic analysis of arc plasma with and without flux.

活性フラックスを用いたティグ溶接の場合にはアーク下方中心部に集中的に存在している。これらは、Fig. 2 での写真撮影結果と非常によく一致している。

次に、このようなメタルプラズマの分布の違いが、アークプラズマの状態にどのような違いを生じさせているのかを検討する目的で、レーザ散乱計測法（トムソン散乱法）を利用した電子温度分布の測定を行った。Fig. 4 にその結果を示す。なお、比較のために水冷銅陽極を用いた純ヘリウムのティグアークの場合も合わせて示してある<sup>8)</sup>。通常のティグ溶接の場合、電子温度はアーク下部全体にわたって水冷銅陽極の場合に比べて明らかに低下している。この領域は Fig. 2 および Fig. 3 で示されたメタルプラズマの領域とほぼ一致しており、メタルプラズマが生じることで電子温度が低下することを示している。一方、活性フラックスを用いたティグ溶接の場合、アーク中心部の電子温度が低下しており、やはりこの部分もメタルプラズマの領域とほぼ一致している。このメタルプラズマ領域における電子温度の低下は、金属原子の電離エネルギーがヘリウム原子のそれに比べて非常に小さいため、

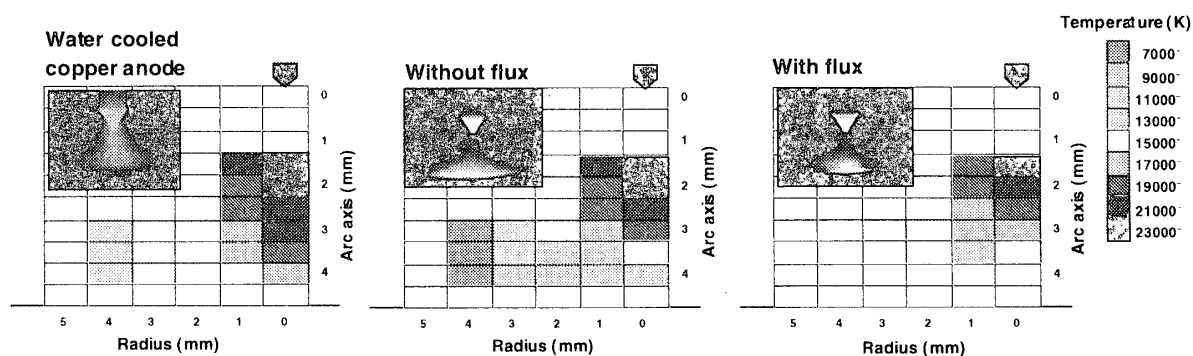


Fig. 4 Electron temperature distributions with and without flux.

アークプラズマ中において電離され易く、プラズマの電気伝導度を増加させてプラズマ中の電場（電界強度）を小さくさせた結果であると推察される。電気伝導度の高い領域にアーク電流の経路が形成されるものと考えられることから、メタルプラズマの分布とアーク電流経路とは密接な関係があるものと推察される。すなわち、通常のティグ溶接では電流経路が溶融池全体に広がるのに対し、活性フラックスを用いたティグ溶接では電流経路が溶融池の中心部に集中すると考えられる。Fig. 2において、通常のティグ溶接の場合に明確に見られなかった陽極点（アーク）が、活性フラックスを用いたティグ溶接の場合に見られるようになる理由の1つとして、上述の電流経路の変化が考えられる。

以上で示されたようなアークプラズマの分布の違いが生じる大きな原因として、溶融池表面の温度分布が考えられよう。そこで放射温度計を用いて溶融池表面の温度測定を行った。Fig. 5にその結果を示す。通常のティグ溶接の場合、電極直下（中心）から半径方向6 mmまで緩やかな温度勾配である。一方、活性フラックスを用いたティグ溶接の場合、中心では約2350 Kを示し、通常のティグ溶接の場合よりも高い温度であるが、半径方向1.5 mm付近で逆転し、通常のティグ溶接の温度より下回る。このように、活性フラックスを用いた場合の方が通常の場合に比べて温度勾配が非常に大きい。なお、半径方向2 mm付近から5 mmにかけて再び温度が上昇して温度のピークが見られるが、これは溶融池エッジ部に存在するフラックスがアークによって直接的に過熱された結果であると考えている。

#### 4. おわりに

以上の実験結果に基づいて、以下のような深溶込みのメカニズムが推察される。

通常のティグ溶接の場合、溶融池内の対流は外向きであり、アークからの入熱はこの流れに沿って表面全体に伝わり、表面温度が比較的勾配の緩やかなものとなる。こういった緩やかな温度分布が結果的に表面全体にわたって広がるメタルプラズマの分布を導き、陽極ルート部の拡大につながったと考えられる。

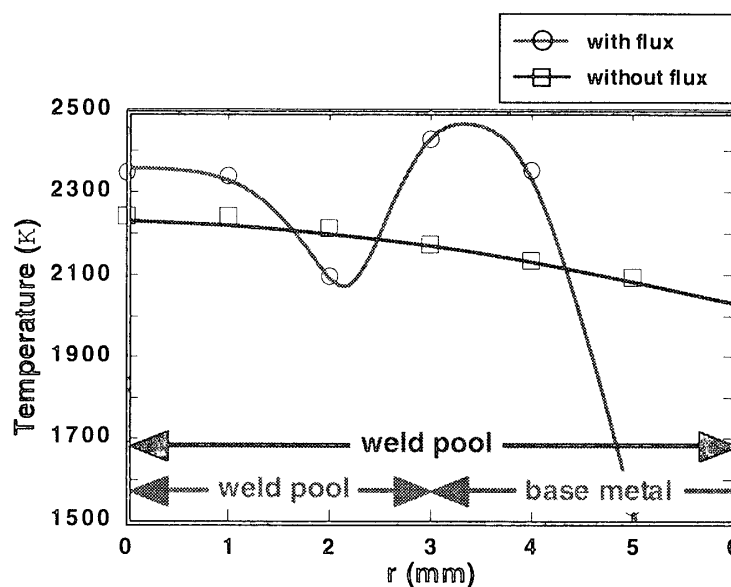


Fig. 5 Surface temperature of weld pool with and without flux.

一方、活性フラックスに含まれる表面活性元素（酸素）による表面張力の変化によって溶融池内の対流が通常の外向きの流れから内向きの流れに逆転し、アークからの入熱がこの流れに沿って深さ方向に伝わるため、表面温度の勾配は大きくなる。この急峻な温度分布が結果的に中心部においてのみ見られるメタルプラズマの局所的な分布を導き、明瞭な陽極ルート部（陽極点）の発生につながったと考えられる。

最終的にはこのような流れの違いが溶け込み深さの変化を生じさせている、と推察される。なお、陽極ルート部（陽極点）が溶融地表面におけるアーク電流経路であると考ええると、活性フラックスを用いたティグ溶接を行うことでその経路が狭まり、それが電磁力（ローレンツ力）の増加を導き、溶融池に下向きの流れを与え、表面張力による内向き対流との相乗効果で溶込み深さの増大を導いていると考えられる。

## 参考文献

- 1) 豊田, 松林, 鴨, 三宅: 溶接学会アーク物理研究委員会資料, ア物 -99-1065 (1999).
- 2) W. Lucas, D. Howse, M.M. Savitsky and I.V. Kovalenko: IIW Doc.XII-1448-96 (1996).
- 3) M.M. Savitskii and G.I. Leskov: Avt. Svarka, No.9 (1980), pp.17-22.
- 4) S.A. David, T. DebRoy and J.M. Vitek: MRS Bulletin, Vol.19, No.1 (1994), pp.29-35.
- 5) 黄地, 三宅, 田村, 井上, 西口: 溶接学会論文集, Vol.8, No.1 (1990), pp.54-58.
- 6) 平田, 小川, 高, 本田: 溶接学会論文集, Vol.17, No.3 (1999), pp.387-396.
- 7) 中村, 野木: 溶接学会全国大会講演概要, No.63 (1998), pp.18-19.
- 8) 牛尾, 田中, 寺崎: 溶接学会アーク物理研究委員会資料, ア物 -99-1060 (1999).