

日本溶接協会 2022 年度 「次世代を担う研究者助成事業」 成果報告

赤外線放射プラズマ診断法およびラングミュアプローブ法を用いた疑似火星大気中におけるGTA溶接の電子密度計測

正箱 信一郎
香川高等専門学校

1 はじめに

米国のバラク・オバマ大統領は、2030年代を目標に火星の有人探査計画を発表し、火星有人探査の基礎研究が進められている。火星は地球と比べて低圧で、気圧が600~1,000Paに変動することなどから、構造物の気密性を保つためには構造物材料間を密閉する溶接技術が必要と考える。火星への輸送コストを考慮¹⁾すると、構造物の金属材料には軽量なアルミニウム合金が使用され、地球大気同様に溶接には交流GTA (Gas Tungsten Arc) 溶接が用いられることが予想される。

著者ら²⁾は真空チャンバ内に擬似的に再現した、火星大気中にて溶接実験を行い、火星大気中において、交流GTA溶接が適用できる可能性があると報告した。しかしアーク放電現象の詳細は明らかにできておらず、火星大気中で溶接をコントロールするためには、火星環境でのアークの特性やメカニズムを知る必要がある。青山ら³⁾の研究により疑似火星大気中でIR法(赤外線プラズマ診断法)での電子密度分布の概略が計測可能であったが、測定値が正しいものであるか確認できていない。

2 研究方法

本研究はラングミュアプローブ法を用い、アーク放電の指標のひとつである電子密度の測定を行った。今回の研究では交流GTAに比べて測定が容易な、直流GTAを対象とした電子密度測定システムを構築し、IR法での計測結果³⁾と比較。それぞれの測定方法について、疑似火星大気中でのアークの測定に対する有効性を調査し

た。両測定法ともに、地球大気圧中のアーク放電に対しては、測定に用いられた実績が多くある。

火星大気は地球大気の約10分の1の大気圧かつ95%以上がCO₂であるため、真空チャンバを減圧し工業用CO₂ガスを15L/minで導入して、圧力を1,000Paに保つことで火星大気を擬似した。チャンバ内に設置したトーチからは少量(3L/min)のアルゴンガスをシールドガスとして流出させた。本実験で用いたプローブ先端の概略図を図1に、実験装置の概略図を図2に示す。

プローブにはタングステンワイヤを用い、アルミナ絶縁管にて先端のみが露出するようにした。またプローブはモータを用い周速度940mm/sで回転させ、アーク軸に対して垂直方向に通過するようにした。これらによりプローブがアーク放電により損傷することを防いだ。また、モータはXZステージとともに構成されているため、プローブ位置を任意に設定できる。

プローブには発振器によって、1kHzの三角波をプローブ電圧として印加し、三角波の半周期ごとのプローブ電圧(V₃)とプローブ電流(V₂)の関係(プローブ特性)を用いて、プローブ理論によって電子密度を算出した。発信機の周期とプローブの週速度の関係より、0.47mmおきにプローブ特性が得られるため、アークの分布範囲が10mmであるとするプローブ1スイングで、約20点の測定が可能である。

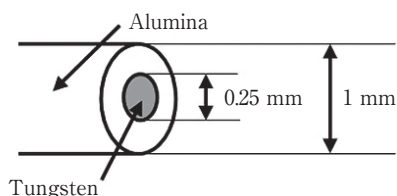


図1 Probe used in this experiment.

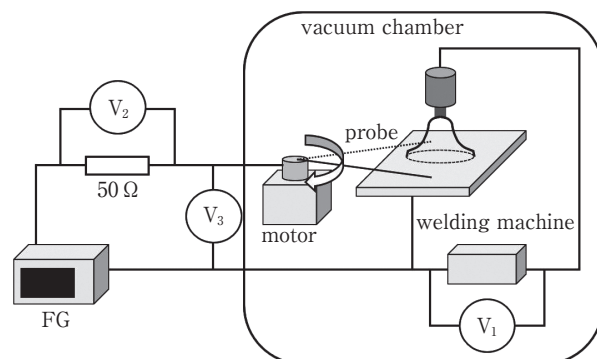


図2 Experimental equipment for probe measurement.

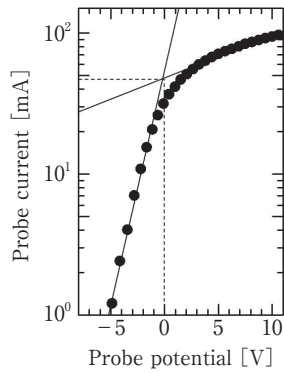


図3 Example of probe characteristic.

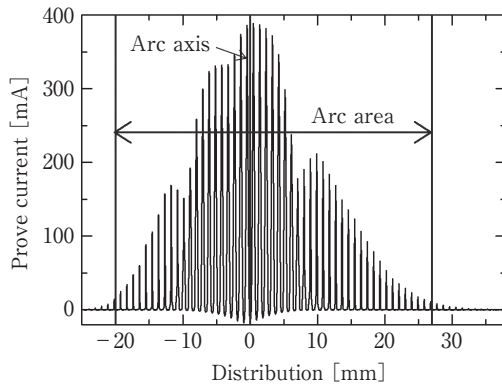


図4 Probe current distribution.

測定で得られた疑似火星大気中におけるGTAのプローブ特性の一例を、図3に示す。プローブ理論に従い図中の折れ曲がり点の値を利用して電子密度を算出すると、電子密度 $n_e = 4.95 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ が得られる。

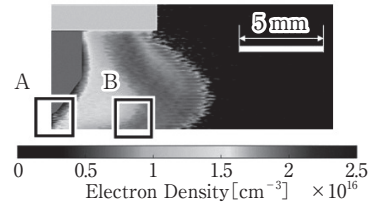
3 主な研究成果

ラングミュアプローブ法を用いて測定した、プローブ電流の測定値を図4に示す。横軸はアークの分布方向で、プローブ電流値が最大の場所がアーク軸である。プローブ電流値が大きいほど電子密度が高いこととなる。

図4よりアークの分布範囲は50mm程度であることが確認でき、地球大気中の通常のGTAに比べて分布範囲が広いことがわかった。また、今回の測定ではプローブ1スイングで、アーク中の約100箇所測定が可能であった。グラフの概形を見るに、アーク軸付近とその周辺部で分布の傾向が異なることがわかった。

プローブ測定で得られた2点の電子密度を、IR法での測定結果と比較したものを表1に示す。実験条件はアーク電流を100A、アーク長を5mmとし、プローブは母材より2.5mmの高さを移動するように設定した。

電子密度をIR法と比較した結果、詳細な値は異なるものの、オーダー値は同等な値となった。測定原理の違う2種類の方法で測定し、近い値が得られたことから、



method	Electron Density [cm ⁻³]		Electron Temperature [K]
	IR	Langmuir probe	Langmuir probe
A	2.4×10^{16}	3.86×10^{16}	14000
B	1.3×10^{16}	2.23×10^{16}	12000

表1 Comparison of measured electron density by Langmuir probe and IR method.

それぞれの方法ともに疑似火星大気中でのアークの測定にも有効であると考えられる。IR法での測定結果では、アークの分布範囲がアーク軸から外方向に10mm程度であると読み取れるが、プローブ法を用いた結果(図4)からは、さらに広範囲に分布していることがわかる。比較したIR法では、256諧調の画像輝度を利用していることから、アークの発光が弱い部分に対する感度はないが、画像処理が容易であること、一方でプローブ法はIR法に比べて、感度が高いが電子密度の算出行程の自動化が難しい等、それぞれの測定方法に利点と欠点があることがわかった。

4 おわりに

今回はラングミュアプローブ法を用いて、低圧、CO₂雰囲気中の疑似火星大気中におけるGTAの計測を試みた。IR法での計測結果と比較することで、両計測方法が疑似火星大気におけるアークの計測にも利用できることが確認できた。今後は計測点を増やすことや、アークの発生条件を変化させること等を行いながら、計測実験を実施する。

今回計測をしたのは直流GTAであるが、アルミニウムを溶接することを考えると、交流GTAについても計測してその特徴を理解する必要がある。IR法では交流GTAの計測も可能であったが³⁾、ラングミュアプローブ法の場合、アークの極性が入れ替わる際にプローブ特性がどのような振る舞いを示すか等、未知の部分がある。実験装置や方法を工夫しながらさらに詳細な実験を行い、疑似火星大気中でのアークの特徴を明らかにする。

参考文献

- 1) NATIONAL GEOGRAPHIC “動き出す火星移住計画” National Geographic, 22-11 (2016), 32-61.
- 2) 正箱ら, “溶接学会論文集” 39-3(2021), 151-157.
- 3) AOYAMA et.al. IIW Doc. XII-2528-2022