



Title	アークプラズマの非平衡性を考慮したガスメタルアーク溶接プロセスの数値シミュレーションモデルの開発
Author(s)	江田, 賢司
Citation	大阪大学, 2022, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/88044">https://doi.org/10.18910/88044</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## 論文内容の要旨

氏 名 ( 江田賢司 )	
論文題名	アークプラズマの非平衡性を考慮したガスメタルアーク溶接プロセスの数値シミュレーションモデルの開発
論文内容の要旨	
<p>ガスメタルアーク (GMA) 溶接は、電極と母材の間に生成したアークプラズマを熱源とするアーク溶接法の一つで、幅広い製造分野で用いられている。GMA溶接では、母材と同等の材料でできた溶接ワイヤを電極とするが、溶接中にはアークプラズマ、溶接ワイヤが溶融してできた溶滴、母材に形成された溶融池が複雑に相互作用している。特に、加熱された溶滴からは大量の金属蒸気が発生し、アーク中に混入することでアークの特性を大きく変化させる。また、溶滴はワイヤから離脱してアーク中を飛行し溶融池へと移行するが、これによる電極形状の変化はアークに大きな影響を与える。このような複雑な物理現象を理解するために、これまでに数多くの数値シミュレーションモデルが報告されてきたが、すべてのGMA溶接プロセスモデルでアークプラズマの局所熱平衡を仮定している。これは、アークプラズマ中では局所的に化学反応が平衡し (電離平衡)、全ての粒子の温度が等しいとする仮定であるが、同じアーク溶接法の一つで、電極にタングステンを用いるティグ溶接では、電極・母材の近傍やアークの外縁部で電子温度が重粒子温度より高い非平衡状態であることが実験計測で明らかになっている。しかし、GMA溶接での計測結果はなく、GMA溶接における非平衡性がどのように観測されるか、それが何に支配されるかは明らかでない。また、溶込みを左右する電極や母材への入熱は、その近傍の非平衡性が顕著な領域での粒子の温度や数密度で決定されるため、溶込みをモデルで精度よく再現するためには、アークプラズマの非平衡性を考慮する必要がある。そのため、ティグ溶接プロセスに対しては非平衡性を考慮したモデル (非平衡モデル) が報告されているが、ティグ溶接では融点が高く溶接中にほとんど溶融しないタングステン電極を用いることから、金属蒸気と電極の溶融・変形はどちらも考慮されていない。</p> <p>そこで、本研究の目的は、アークプラズマの非平衡性を考慮したGMA溶接プロセスの数値シミュレーションモデルの開発と、GMA溶接におけるアークプラズマの非平衡性を支配する要因の解明とした。そのために、これまでのGMA溶接プロセスモデルにはない、電子温度と重粒子温度の2温度の計算と、電離平衡を仮定しない電子・原子・イオンの数密度の計算を行った。さらに、これまでのティグ溶接プロセスの非平衡モデルでは考慮されていない金属蒸気と電極の溶融・変形を考慮した。</p> <p>まずは、アークプラズマの局所熱平衡を仮定したモデルの妥当性の評価と課題の抽出を行った。局所熱平衡モデルはGMA溶接プロセスを定性的には再現するものの、過去の実験計測結果に比べて計算された溶滴の温度が高い可能性が考えられた。溶滴の温度を大きく左右する溶滴表面への入熱分布は、電流密度に大きく依存しているため、非平衡性の観測が予想される溶滴近傍における電流密度分布が、アークプラズマの非平衡性を考慮して計算したものでないことが原因であると考えた。</p> <p>次に、段階的に電極の溶融・変形は考慮せずにアークプラズマのみを計算する非平衡モデルを構築し、GMA溶接における非平衡性を電極・母材の近傍とアーク外縁部で確認した。また、鉄蒸気濃度の高いアーク中心部では放射損失が増大して温度が局所的に低下しても鉄種の電離レートが高いために十分な電子が得られて熱平衡状態となること、鉄種の電離レートのみ仮想的に減少させた場合に電子温度が低い熱非平衡状態となること、鉄種の放射強度も減少させると再び熱平衡状態となることから、混入する金属蒸気の電離レートと放射強度のバランスがGMA溶接におけるアークプラズマの非平衡性を左右することが明らかとなった。</p> <p>最後に、電極の溶融・変形を考慮した非平衡モデルに発展させ、これを考慮した上でも非平衡計算が可能であることを確認した。また、局所熱平衡を仮定した計算結果と比較し、非平衡性の考慮によって電極近傍でより高い位置にまで電子が多く分布し、電極近傍で電流経路が拡大することが分かった。同時に、溶滴の温度上昇は緩やかになった。電極近傍のより高い位置での電子の分布は、局所熱平衡モデルでは考慮されない電子・イオンの拡散が原因であると分かり、非平衡モデルでは局所熱平衡モデルでは表現できなかった場所での荷電粒子の存在を表現できることが明らかになった。</p>	

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( 江 田 賢 司 )			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教授	佐野 智一
	副 査	教授	浜口 智志
	副 査	教授	田中 学
	副 査	准教授	荻野 陽輔

## 論文審査の結果の要旨

本研究では、ガスメタルアーク溶接プロセスにおいて電極形状が変化し、鉄蒸気が混入するアークプラズマの非平衡性を決定する因子を解明するために、アークプラズマの非平衡性を考慮したガスメタルアーク溶接プロセスの数値シミュレーションモデルを開発している。

第1章では、研究背景を述べている。特に、溶接結果を左右する母材とワイヤ電極への入熱は、アークプラズマの非平衡性が顕著なそれらの近傍領域で決定されることが知られるが、ガスメタルアーク溶接における非平衡性の計測結果がないこと、非平衡性を考慮した数値シミュレーションモデルが報告されていないことを指摘し、非平衡性を考慮したモデル化の重要性を説いている。

第2章では、アークプラズマの局所熱平衡を仮定したモデルの説明をしている。また、モデルの流動場の計算精度を確認している。

第3章では、第2章で説明したアークプラズマの局所熱平衡を仮定したモデルの妥当性を評価するために、実験結果との比較を行っている。局所熱平衡を仮定したモデルは、電流値やシールドガス成分の変化による溶滴移行形態の変化を定性的には再現するものの、溶滴の温度が内部まで沸点に達していることから、過去の計測結果を根拠に溶滴温度が実際より高く計算されている可能性を指摘している。また、その原因は入熱を左右する溶滴近傍の電流密度分布が、その領域でのアークプラズマの非平衡性を反映したものでないことであると推測している。

第4章では、アークプラズマの非平衡性を考慮したモデルの説明を行っている。電子温度と重粒子温度の乖離を表現するために、電子と重粒子の2つのエネルギー保存式を導入している。また、電離平衡を仮定せずに各化学種の数密度変化を計算するために、プラズマ中での電離・再結合反応や拡散に基づく各重粒子の質量保存式を導入した。ここでは、段階的に溶接ワイヤ、溶滴、母材の形状と温度を固定した状態での計算を行っている。結果として、まずは非平衡計算においても鉄蒸気の効果が十分に再現されたことを示している。また、混入する金属蒸気の化学反応レートと放射強度を変更して計算を行うことにより、金属蒸気の電離レートと放射強度のバランスがアークプラズマの非平衡性を左右することを明らかにしている。

第5章では、第4章で説明したモデルを電極の溶融と変形を考慮したモデルへと発展させている。非平衡性を考慮することで、溶滴より上部でのアークプラズマの電気伝導率が上昇し、溶滴より上部からも電流がアークプラズマ中に流れることを明らかにしている。この原因は、濃度勾配に起因する拡散によってアークプラズマ中の電子と Ar イオンが溶滴より上部へ輸送され、電子数密度が上昇するためであると明らかにしており、これは電離平衡を仮定せずに個別の化学種の数密度の変化を計算したために表現できたことを強調している。ま

た、非平衡性の考慮によって溶滴温度の低下と溶滴径の拡大が見られ、非平衡性の考慮の有無が溶滴の計算結果にも影響することを明らかにした。

以上のように、本論文はこれまで明らかでなかったガスメタルアーク溶接プロセスにおけるアークプラズマの非平衡性を数値シミュレーションモデルで再現し、それを決定する因子を明らかにすることで、アーク溶接物理の解明とガスメタルアーク溶接の数値シミュレーションモデルの発展に大きく貢献している。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。