

超高温プラズマに関する 3次元電磁熱流体シミュレーション技術

岩尾 徹 (いわお とおる) 任 振威 (Ren Zhenwei) 根本 雄介 (ねもと ゆうすけ)
鈴木 祐揮 (すずき ゆうき) 高木 真宏 (たかぎ まさひろ) 森下 穂香 (もりした ほのか)

東京都市大学 理工学部 電気電子通信工学科 大電流エネルギー DX 研究室

要約 超高温プラズマの一種であるアークプラズマは、溶接や表面処理など産業分野で広く利用されている。一方で、遮断器や電気鉄道では電力の安定供給や安定輸送の実現のため、速やかなアークプラズマの消弧手法や電極の溶融現象の解明が求められている。近年ではコンピュータの計算能力の向上や計算手法の発展により、溶融池や非平衡、放射によるアブレーション、真空陰極点の移動、電極開離に伴う放電現象などの数値解析が可能になった。本稿では、上記のテーマに関する超高温プラズマの3次元電磁熱流体シミュレーション技術のトレンドや現状を紹介する。

1. はじめに

超高温プラズマの一種であるアークプラズマ技術は、溶接や表面処理といった産業分野で広く利用されており、私たちの生活には欠かせない技術となっている。一方で、遮断器や電気鉄道においては、電力の安定供給や安定輸送のため、速やかなアークプラズマの消弧手法や、電極の溶融現象の解明が求められている。

近年、コンピュータの計算能力の向上や計算手法の発展とともに、アークプラズマに関する各現象を解明するために、実験だけでなく、シミュレーションでの解析も行われている。シミュレーションの特徴として、実験でコントロールや測定できないパラメーターが検証でき、理論的に現象解明が可能であるという点がある。また、シミュレーション結果の可視化によって、定性的かつ各物理量を定量的に解析することが可能となる。

以上の背景の下、本稿では、超高温プラズマに関する3次元電磁熱流体シミュレーション技術について、トレンドや現状を紹介する。具体的には、3章では溶接アークにおける溶融池や非平衡の数値解析、4章では交流遮断器における放射によるアブレーションの数値解析、5章では真空アークにおける移動陰極点の数値計算、6章では電極開離に伴う放電現象の数値計算について述べる。

2. アークシミュレーションの基礎

アーク（ガス領域）と陰極と陽極を統合した3次元電磁熱流体シミュレーションが開発されている。大気圧下でのアーク放電では平均自由行程が短いことから、空間中の電子、重粒子などの衝突が十分に行われているとみなすことができる。このため、エネルギー授受が十分に行われていることから、電子温度と重粒子温度などの各粒子間の温度は等しくなっている。このように、電子温度と重粒子温度が等しく、粒子のエネルギーがMaxwell分布、粒子の励起状態がBoltzmann分布、並びに粒子密度が反応平衡組成になるとき、局所熱平衡状態（LTE）であることが仮定できる。局所熱平衡状態の場合、アーク放電を電磁熱流体として扱うことができる。このため、電磁熱流体として近似することで、厳密な粒子の振る舞いを考慮せずに微分方程式を解くことが可能となり、シミュレーションにより、アーク放電の特性が解析可能となる。用いる支配方程式は時間項、拡散項、対流項、生成項を考慮した微分方程式を離散化して計算される。実際に用いる支配方程式では、質量保存式、運動量保存式、エネルギー保存式、電流連続の式、オームの法則、マクスウェル・アンペールの式、金属蒸気の移流拡散方程式が用いられている。