



小特集 数値シミュレーションによる熱プラズマ制御に関する研究の現状と展望

7. おわりに

田中 康規

金沢大学

(原稿提出：2011年4月29日)

近年、熱プラズマは、いわゆる熱源としての利用、高反応場あるいはそれらの複合場としての利用など、その応用範囲が広がっている。応用範囲の拡大とともに、熱プラズマの基礎現象の把握・解明が必要であり、さらに有効な熱プラズマ制御技術の確立が不可欠となる。この目的のために、様々な測定が行われている。一方、数値解析による熱プラズマの「場」の挙動を予測することも進められてきている。熱プラズマは、通常高気圧状態で成立するため、その数値シミュレーションにおいては、熱プラズマを連続モデルすなわち流体モデルで記述することが多い。その挙動も流体的な振る舞いとなる。本小特集では、近年の数値シミュレーション技術の向上に鑑み、熱プラズマをどのように制御するのかを数値解析から予測することについてまとめられている。以下、本小特集を総括し、今後の展望を述べる。

第2章では、熱プラズマのモデリングについて基礎的な視点から議論され、モデリングや現象把握の観点からも非常に有益な情報が言及されている。まず熱プラズマに対する連続モデルの妥当性の問題について言及されている。この問題に対してはクヌッセン数から検討でき、通常の熱プラズマプロセスにおいてはクヌッセン数が十分小さいことが得られ、連続モデルが適用しうることが述べられている。一方で、数ミクロン以下の微粒子が混在する系では、連続モデルの仮定が問題となる場合がある。この場合には、微粒子はラグランジアン系で別途取り扱い、連続モデルのプラズマと微粒子との相互作用を各方程式に取り入れることになる。熱プラズマにおける局所熱平衡の妥当性についても本章でまとめられている。熱プラズマにおける非平衡性としては、主に反応論的な非平衡性と熱的な非平衡性とに分けられる。反応論的平衡状態とは、熱プラズマ中のあらゆる箇所において、電離反応、再結合反応、解離反応、化学反応などのすべての反応が時々刻々、反応平衡状態に達しているものをいう。この場合、熱プラズマ内の各位置での組成状態は、その位置での圧力と温度のみによって決まる。しかしながら実際の熱プラズマにおいてははすべての反応がすべての箇所において反応平衡状態になっているとは限らず、対流・拡散の影響を大きく受ける場合がある。反応非平衡性を検討するにはダムケラー数で検討でき

る。熱的な非平衡性についても、大まかには電子が電界から単位時間単位体積あたりに得るパワー量と、電子が重粒子との衝突による単位時間単位体積あたりのパワー変換量との大小で決まる。熱プラズマにおいては電子温度と重粒子温度との差異を考慮しなければならない場合も出てくる。

熱プラズマの数値解析にあたっては比熱、熱伝導率、導電率といったいわゆる熱力学特性および輸送特性が必要となる。熱プラズマの特長として温度勾配が大きいことが挙げられる。わずか数mmの箇所に温度差が10000K程度あることも珍しくない。そのため、熱プラズマの熱力学特性、輸送特性の温度依存性を正確に得る必要がある。この場合、熱力学、輸送特性自身も数mmの空間で数桁異なることもありうる。このような非常に急激な物性勾配を伴うモデリングが必要となる。さらに最近では、固体との相互作用も問題となっている。例えば、溶接では電極や母材との熱的・力学的相互作用および母材からの金属が混入するモデルを取り上げている。また高周波(RF)熱プラズマの例として、熱プラズマ中におけるナノ粒子生成問題がある。ナノ粒子合成プロセス全体をモデル化するには、熱プラズマから原料への伝熱現象と蒸発過程、さらには蒸発蒸気からのナノ粒子核生成過程・成長過程の定式化が重要である。

第3章ではガス組成設計による熱プラズマの熱源特性制御に関して議論された。ここでは特に問題をTIG(Tungsten Inert Gas)溶接アークに絞り、各種ガスにおけるアーク特性を比較し、その特性を数値解析により把握することが行われている。熱プラズマシミュレーションの利点は、ガスの非常に多くの組み合わせに対して電極への入熱量、アーク温度、ガス流速場などを検討できることである。TIG溶接ではアーク放電によりタングステン陰極と母材となる陽極との間に熱プラズマを発生させ母材を熔融溶接する。この時、タングステン陰極が高温の酸素にさらされると急速に酸化し損耗する。このため、陰極は周囲からシールドガスを導入し保護される。このとき使用するシールドガスの種類によりアーク特性が大きく変わり、アークから電極あるいは母材への入熱量が大きく変化する。そのため、必要とされるアークの熱源特性に応じて最適なガス種

7. Postface

TANAKA Yasunori

author's e-mail: tanaka@ec.t.kanazawa-u.ac.jp

が選択される。近年では、シールドガスとして最も一般的に用いられるアルゴンをはじめ、アルゴン-ヘリウム混合ガスあるいはアルゴン-水素の混合ガス、アルゴン-窒素混合ガスが検討されている。この場合様々な混合割合のシールドガスに対して、アークの数値解析を行い、電極および母材への入熱量、アーク特性を予測して、設計に役立てている。

第4章では熱プラズマ放射特性の制御に関してまとめられている。熱プラズマはその温度が数万 K に及ぶため放射パワーが非常に大きい。そのため熱プラズマのパワー損失の主要項となりうる。これは熱プラズマ自身の温度場を正確に求めるためには熱プラズマの放射場を正確に求める必要があることを示している。さらに熱プラズマの放射場は、熱プラズマ自身による光の吸収を考慮する必要がある。熱プラズマの放射場は、光の周波数によって異なるため、理論的には無限の周波数分割に対して放射場を計算することになり現実的ではない。そこで、様々なモデリング手法が提案されている。本章ではまず、放射特性の基礎となる線スペクトル、連続スペクトルの放射特性について述べられている。さらに吸収係数の計算方法について紹介されている。本章の後半は、吸収を考慮したアークのシミュレーションについて言及されている。特に近年は金属蒸気混入による放射ロスの増大がアーク温度予測に与える影響が問題となっていることが紹介されている。

第5章では、特にアークプラズマに外部から磁場を印加し、それにより積極的にアークプラズマの形態を制御することに言及されている。アークプラズマに外部磁場を印加するとローレンツ力により力を受け、それにより挙動が変化する、あるいは形状が変化する。本章では、特に永久磁石によるカスプ型磁場をアークプラズマに印加し、アークプラズマの断面形状を楕円にする手法について述べられている。この手法により、溶接線方向に沿ってアークプラズマの緊縮作用を得られ、溶け込みが深い溶接が得られる。このような磁場制御を設計する上でもアークプラズマの数値解析が欠かせない存在となる。特に形状が軸対称でないことから、三次元的な取り扱いが必要となるのが特徴の一つである。アークプラズマの熱流体解析とともに永久磁石による三次元磁場の扱いについても言及されている。

第6章では熱プラズマの非平衡特性の制御に関して述べられている。熱プラズマの非平衡性を考慮すべきかどうかは第2章で言及されている。一方で、高気圧高温プラズマの領域において積極的に非平衡性を向上させ、それを材料プロセスなどに利用することが検討されている。この場

合、非平衡性を導入した熱プラズマモデリングが必要となる。ここでは電力用遮断器内のスイッチングアークに対する反応非平衡問題の取り扱いや、材料プロセス用誘導熱プラズマでの反応論的非平衡性、熱的非平衡性を導入したモデルを紹介している。

さらに、アークプラズマが再発弧する問題もある。例えば非移行トーチアークでは陽極点が常に動きまわり、アークの再発弧を繰り返している。遮断器においてはアークプラズマが消滅後に、電極間には過渡回復電圧が印加される。この場合、温度 3000 K 程度の高温ガスの絶縁特性を予測する数値解析技術が必要となる。これに対しては、電子のエネルギー分布関数をマクスウェル分布とせず、ボルツマン方程式を解くことが必要になり、実験結果との比較も行っている。

熱プラズマモデリングは発展を続けている。今後は次のような問題が残されていると考えられる：

三次元問題：近年の汎用数値解析ソフトの発展とともに解決されつつある。

乱流問題：熱プラズマにおいては流速が非常に速い空間と遅い空間が存在しており、かつ用途によっては超音速となる。そのため非常に広いレイノルズ数を有する場合がある。この問題に適用しうる乱流モデルの開発とその適用、妥当性の検討が必要である。近年では、圧縮性流体に適用できる LES 乱流モデルも開発されている。

多相問題：固体-液体-気体-熱プラズマの四つの相が同時に存在する形の取り扱い問題である。この相の取り扱いには材料の状態方程式が必要である。さらにその表面において化学反応が生じる場合があり、非常に複雑な系となる。

放射場問題：放射場の扱いは近年も発展している。従来は一樣温度場を仮定し吸収を考慮した Net emission coefficient 法 (NEC 法) が使用されていた。近年は、Method of Partial characteristics 法 (MPC 法) や、光の波長分割を有限数で取り扱う手法など (P1, DOM 法などを含む) が開発されている。

非平衡問題：熱プラズマにおける反応場の取り扱いの正確さは、使用する反応速度係数の正確さに大きく影響される。反応速度係数は実験的に求められているが、通常はその温度適用範囲は、熱プラズマの温度をカバーし切れていない。そのため、反応速度係数の温度依存性を外挿して使用している場合がほとんどである。

正確な熱プラズマ反応場の予測のためには以上の発展がキーとなる可能性が高い。