アドホック研究会報告

プラズマを用いる熱加工プロセスの現象とそのモデル化*

田 中 学**

Approach to Numerical Modeling of Materials Processing System by Thermal Plasma*

by TANAKA Manabu**

キーワード 熱プラズマ, 熱加工, プロセス, 陰極現象, 陽極加熱, モデル, 数値解析

1. はじめに

熱プラズマの高いエネルギーを利用した熱加工プロセスは、溶接・接合から廃棄物処理に至る広い範囲にわたって利用されている。最近の目覚ましい計測技術やシミュレーション技術の進歩により、熱源となるプラズマから材料にわたる加工プロセス全体をモデル化し、その数値解析シミュレーションを試みる研究が見られるようになってきた¹⁻³⁾。それらの試みは未だ産業応用に直接役立てられるレベルに至っているとは言えないが、その視点は近い将来の熱加工システムのあり方を示唆していると言える。しかしながら、密度、熱伝導度、電気伝導度など物性値が桁違いに異なる高温のプラズマと材料が混相するプロセス全体をモデル化するためには、それらの相互作用を避けて通ることはできない。プラズマと材料の相互作用の多くは電極現象を含むため、数ミクロンからナノ・オーダーに及ぶ電気シース、1万度に達する高温プラズマから高々沸点程度の材料表面に至る温度境界層など、極めて狭い領域に強い電界や数千度に及ぶ温度勾配が存在し^{4, 5)}、それらを正面からモデル化することは難しい。

アドホック研究会本研究会「プラズマを用いる熱加工プロセスの現象とそのモデル化」では、溶接、溶射、CVD、廃棄物処理など多岐にわたる「プラズマを用いる熱加工プロセス」に関わる研究者を溶接学会ばかりでなく他学会からも広く集め、種々のプロセスにおいて生じる様々な現象を整理し、それぞれのプロセスをモデル化するためには、それらの現象をどこまで理解し、どのように取り扱えばよいのか、という点の情報交換を行うとともに、プラズマから材料にわたるプロセスの統一モデ

ル化の可能性を探ることを目的として、平成14年4月1日より平成15年3月31日までの1年間活動した。

委員は、著者を主査とし、溶接学会より平岡和雄（物質・材料研究機構）、中村照美（物質・材料研究機構）、平田好則（大阪大学）、宮坂史和（大阪大学）の各委員、日本鉄鋼協会より武田紘一（秋田県立大学）委員、電気学会より足立和郎（電力中央研究所）、古川静枝（電力中央研究所）の各委員、応用物理学会より崎山智司（山口大学）委員、機械学会より佐藤岳彦（東北大学）委員、化学工学会より渡辺隆行（東京工業大学）委員、照明学会より池内 満（ウシオ電機）委員の合計12名により構成され、他分野の幅広い視点から上述のプラズマ熱加工プロセスに関わる議論を展開した。

2. 陰 極 現 象

十分に制御され、安定に存在し得る熱プラズマの発生には、主にアーク放電や誘導結合型高周波放電が利用されるが⁶⁾、熱加工プロセスには、制御性に優れ低コストであるアーク放電が主として利用されている⁶⁾。アーク放電は、陰極－陽極両電極間で発生させる有極放電であり、電極やその近傍の現象が放電の形成現象やその安定性に基本的な役割を演じる⁶⁾。特に電子の放出源とも言える陰極は、強い電磁ピンチ効果に象徴されるように、生成される熱プラズマの温度、密度、流れなど、その状態を支配していると言っても過言ではない⁷⁾。

陰極で生じる現象をエネルギーバランスという切り口で整理すれば次式のように表される^{8, 9)}。

$$q_K = \frac{J_i}{e} \left(\frac{3}{2} k_B T + (\varepsilon_i - \phi_K) + eV_K \right) - J_e \phi_K - \kappa \nabla T + U_{arc} - U_K \quad (1)$$

ここで、 J_i 、 J_e はそれぞれイオン電流および電子電流、 e は電気素量、 ε_i はガス分子の電離エネルギー、 ϕ_K は陰極材料の仕事関数、 V_K は陰極降下電圧、 κ はガス（プラズマ）の熱伝導度、 U_{arc} はアークプラズマからの放射エネル

*原稿受付 平成16年4月20日

**正 員 大阪大学接合科学研究所 Member, JWRI, Osaka University

ギー入力, U_K は陰極材料の放射エネルギー損失である。

以下, アルゴン雰囲気中のガス・タングステン・アーク (GTA) を想定して (1) 式についてもう少し詳しく整理する。まず, 右辺第一項はイオンによる陰極加熱を意味している。陰極降下によって eV_K のエネルギーをもらって加速されたイオンが陰極表面で衝突し, 運動エネルギー $3k_B T/2$ と合わせて陰極に与える。さらに陰極表面に到達したイオンは陰極内部の電子と再結合をしてその分のエネルギー ($\varepsilon_i - \phi_K$) も陰極に与えることになる。アルゴンプラズマでは, ε_i は 15.76 eV, タングステン電極であるとする ϕ_K は 4.5 eV であるので ($\varepsilon_i - \phi_K$) は 11.26 eV となる。さらに, 陰極表面のプラズマ温度を 3000 K 程度と考えると $3k_B T/2$ は約 0.3 eV, 陰極降下電圧を 3 V¹⁰⁾ とし, アーク電流に対するイオン電流の寄与を 7% と仮定すると, 200 A の GTA におけるイオンによる陰極加熱は,

$$\frac{I_i}{e} \left(\frac{3}{2} k_B T + (\varepsilon_i - \phi_K) + eV_K \right) = 200 \times 0.07 (0.3 + 11.26 + 3) = 203.84 \text{ W} \quad (2)$$

となる。一方, 電子が陰極より放出される際に陰極材料の仕事関数分のポテンシャルエネルギーを奪い, 陰極を冷却する。これが $J_e \phi_K$ に相当する。同様に 200 A のアルゴン GTA を想定すると, イオン電流とのバランス (アーク電流 = イオン電流 + 電子電流) を考慮してアーク電流に対する電子電流の寄与を 93% と仮定すれば,

$$J_e \phi_K = 200 \times 0.93 \times 4.5 = 837.0 \text{ W} \quad (3)$$

になる。また, U_{arc} は 20 W 程度¹¹⁾, U_K は 5 W 程度¹²⁾ とすると, (1), (2), (3) 式よりアークプラズマからの熱伝導による陰極加熱は

$$-K \nabla T = 618.16 \text{ W} \quad (4)$$

であることが見積もられる。

これらのエネルギーバランスによって GTA のタングステン電極は, タングステンの融点 (3680 K) に近い温度で熱陰極として機能し, アーク電流を十分にまかなう熱電子を放出させている⁶⁾。温度 T の陰極表面から単位面積, 単位時間あたり放出される熱電子による電流密度は, 次のリチャードソン・ダッシュマンの式で与えられる¹³⁾。

$$J_e = A \cdot T^2 \exp \left(-\frac{\phi_{Ke}}{k_B T} \right) \quad (5)$$

ここで, A ($\text{A}/\text{cm}^2 \text{K}^2$) は陰極材料に依存する定数で実験により与えられる。 ϕ_{Ke} は陰極材料の実効仕事関数である。リチャードソン・ダッシュマンの式が示唆するところは, 温度が高く仕事関数が低いほど熱電子放出電流密度が大きくなることである。したがって, アーク放電の電極としては, 融点が高く仕事関数の低い材料が適していると言えよう。実際にタングstenは高融点金属であるが, さらにタングsten電極には, 一般的に, 電子エミッターとして 2% 程度の酸化トリウム (ThO_2) や酸化ランタン (La_2O_3) 等が添加されており, 純タングsten金属に比べて低い実効仕事関数で作動するように工夫されている¹⁴⁾。いまタングsten電極の作動温度 T が 3000 K であるとし, A を $60 \text{ A}/\text{cm}^2 \text{K}^2$ ⁸⁾, 実効仕事関数 ϕ_{Ke} を 2.7 eV¹⁵⁾

とすると, (5) 式より熱電子放出電流密度 J_e は $1.6 \times 10^4 \text{ A}/\text{cm}^2$ と見積もられる。熱陰極アークの陰極電流密度は $10^2 \sim 10^4 \text{ A}/\text{cm}^2$ のオーダーであると考えられており¹³⁾, 実際に, 牛尾はアルゴン GTA におけるタングsten電極での電流密度が $1.2 \times 10^4 \sim 1.6 \times 10^4 \text{ A}/\text{cm}^2$ であることを実験的に示している¹⁶⁾。アーク電流が 200 A であるとするれば, これらの電流密度の条件では, タングsten電極とアークプラズマが 1 mm^2 程度の面積で接していることになる。

3. プロセスモデル化のキーポイント

プラズマ熱加工プロセスのモデル化のキーポイントの一つは, 以上の陰極現象をどのように取り扱うかである。図 1 は, 本研究会委員の古川と著者の双方により, アーク電流 200 A, アーク長 5 mm の大気圧アルゴンガス・タングsten・アークで水冷銅陽極を加熱した場合の数値計算結果を比較したものである^{1, 3)}。双方ともプラズマに電磁流体近似を適用し, 質量保存式, 運動量保存式 (ナビエ・ストークス方程式), エネルギー保存式, 電流保存式, オームの法則, マクスウェル方程式をそれぞれ連立してコントロールボリューム法 (SIMPLE 解法)¹⁷⁾ によって繰り返し計算した収束解である。用いた支配方程式や主な仮定はほぼ同じであるが, 双方の温度場には明らかな違いが見られる。すなわち, アークプラズマおよび陽極の最高到達温度が, 古川の場合に 19000 K と 800 K であるが, 著者の場合には 21000 K と 1200 K に達している。

この違いは主にタングsten陰極における境界条件の取り扱いの違いに起因している。古川はタングsten陰極の温度を一様に 3000 K で固定し, 陰極先端部におけるアーク電流密度を過去の研究成果に基づいて次式のように与えた。

$$j = j_{max} \exp(-ar) \quad (6)$$

ここで, j_{max} および a は定数であり, それぞれ $j_{max} = 7.31 \times$

図 1 大気圧アルゴンガス・タングsten・アークによる陽極加熱を想定した数値計算結果 (アーク電流: 200 A, アーク長: 5 mm) ^{1, 3)}

図2 陰極先端部における半径方向のアーカ電流密度分布

図3 アルゴンの発光スペクトル観察により測定されたアーカプラズマ温度分布（アーカ電流：200 A、アーカ長：5 mm）¹⁸

10^3 A/cm^2 , $\alpha = 1.655$ である。なお、 r はアーカ中心軸から半径方向への距離（mm）である。一方、著者はアーカ電流 200 A をタングステン陰極先端部（先端部より 30 mm）において一様に与えることを境界条件とし、(1) 式のエネルギーバランスを比較的忠実に考慮に入れて、アーカ・陰極系も同様に繰り返し計算により解いている。図2は陰極先端部における半径方向のアーカ電流密度分布を示したものである。縦軸を対数で表しているのが、古川の場合は電流密度が半径方向に直線的に低下しているが、著者の場合は、(1) 式で表すエネルギーバランスの結果、アーカ電流が中心部に集中し、半径方向 3 mm 付近で急激に電流密度が低下していることがわかる。また、この場合の最高電流密度は $1.8 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ であり、前項で示した牛尾の実験値¹⁶⁾に近い。この陰極近傍におけるアーカ電流分布の違いがアーカプラズマ内のジュール加熱に違いをもたらし、アーカ中心部に電流が集中している著者の計算においてプラズマの最高到達温度が高くなり、ひいては陽極の到達温度も高くなったと言えよう。

図3は、アルゴンの発光スペクトルを観察することに

図4 アーク中心軸における空間電位分布とプラズマ温度分布（アーカ電流：200 A、アーカ長：5 mm）。

より測定された同条件におけるプラズマ温度分布を示したものである¹⁸⁾。プラズマの最高到達温度が 22000 K に達しており、また、各等温線のプロファイルが著者の計算結果に比較的よく一致していることがわかる。

図4は、著者の計算によるアーカ中心軸における空間電位分布とプラズマ温度分布を示したものである。陰極近傍には 100 V/mm の電界強度に達する陰極降下とともに、約 0.3 mm の空間に 18000 K に及ぶ大きな温度勾配が存在することを定量的に教えてくれる。このモデルには電気シースは考慮されておらず、アーカ・陰極系を正面からモデル化したものとは言えないが、陰極先端のごく近傍における高い電流密度と低い電気伝導度というプラズマの状態が単純なオームの法則によっても比較的リーズナブルな結果を与えてくれる、ことを示している。

4. おわりに

以上のように、プラズマから材料にわたる熱加工プロセス全体のモデル化において、電子の放出源とも言える陰極現象の取り扱いが極めて重要であり、その取り扱い方によってプラズマから材料への熱・物質輸送が違ったものとなり、結果的に、予測したい材料で生じる現象が異なった様相を呈することになる。陰極現象をより厳密にモデル化するためには、単純な電磁流体ではなくプラズマとして電子とイオンを別々に取り扱い、電子、イオン、中性粒子による相互の衝突、それに関わる電離と再結合、さらには陰極近傍に形成される空間電荷などがモデルに考慮されなければならない¹⁹⁾。著者のモデルは、そのような複雑な計算を避けてエネルギーバランスに着目した単純化モデルであるが、ティグ溶接プロセスを対象とした場合には比較的有効であった、と言えよう²⁰⁾。

古川のモデルは、実は、米国ミネソタ大学の Pfender のグループによるコードがオリジナルであり、1983 年より改良を加えられてきたものである²¹⁾。Pfender らは溶射、タンディッシュ加熱、あるいは宇宙ロケットの大気圏再突入の模擬など、プラズマジェットを対象としたモデルであり、様々なアプリケーションにおけるプラズマトー

チの幾何学的配置や雰囲気ガスに対応できるように汎用性を重視したものである。一方、著者のモデルは、オーストラリア CSIRO の Lowke のグループによるコードがオリジナルであり、1985 年より改良を加えられてきたものである²²⁾。Lowke らは CRCs プログラムに支援されて主に溶接を対象としてきた²³⁾。図 1 のような条件で両者を比較した場合は、背景的に著者に分が良かったと言うことであろう。ただ、アークプラズマで世界的に著名な 2 グループをオリジンとしたそれぞれのコードを比較しながら、他分野の幅広い視点からプラズマ熱加工プロセスのモデル化に関して議論できるという刺激的な機会を与えられたのは、アドホック研究会のもっとも素晴らしい意義であったと思う。

本研究会の成果は、より多くの溶接学会員との交流も兼ねて、平成14年11月21日と22日の二日間にわたり、本会溶接アーク物理研究委員会および日本鉄鋼協会ノーベルプロセッシングフォーラム「プラズマの化学的応用」研究グループとの3者で開催した合同研究会においてさらに議論された。活発に交わされた質疑応答を通じて、プラズマを用いる熱加工プロセスのモデル化の現状と問題点が浮き彫りにされた。それらは合同研究会参加者の新しい知見として共有されるとともに、本研究会の委員にとっては次のステップとしての研究課題となった。末筆ながらアドホック研究会「プラズマを用いる熱加工プロセスの現象とそのモデル化」に対して支援していただいた溶接学会、および様々な面でご支援をいただいた関係者の方々に心からお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 古川, 天川, 足立: 移行形アークプラズマから水冷銅陽極への伝熱量に関する数値解析, 電気学会論文誌 A, 120 (2000), pp. 701-707.
- 2) 佐藤, ソロネンコ, 西山: 数値シミュレーションによるセラミックス溶射プロセスの評価, 溶射, 40 (2003), pp. 9-13.
- 3) M. Tanaka, H. Terasaki, M. Ushio and J. J. Lowke: A unified numerical modeling of stationary tungsten-inert-gas welding process, Metall. Trans. A, 33 A (2002), pp. 2043-2052.
- 4) M. I. Boulos, P. Fauchais and E. Pfender: Thermal Plasmas, Plenum Press, New York, (1994).
- 5) 日本鉄鋼協会熱プラズマプロセッシング研究部会編 (監修/牛尾): 熱プラズマ材料プロセッシングの基礎と応用, 信山社サイテック, (1996).
- 6) 牛尾: アーク放電とその利用, 鉄と鋼, 73 (1987), pp. 1309-1315.
- 7) M. Tanaka and M. Ushio: Plasma state in free-burning argon arc and its effect on anode heat transfer, J. Phys. D: Appl. Phys., 32 (1999), pp. 1153-1162.
- 8) M. N. Hirsh and H. J. Oskam: Gaseous Electronics, Academic Press, New York, (1978), Chapter 5 "Electric Arcs and Arc Gas Heaters" by E. Pfender.
- 9) J. F. Lancaster: 溶接アークの物理 (溶接学会溶接アーク物理研究委員会訳), 溶接学会, (1990).
- 10) M. Ushio, D. Fan and M. Tanaka: A method of estimating the space-charge voltage drop for thermionic arc cathodes, J. Phys. D: Appl. Phys., 27 (1994), pp. 561-566.
- 11) M. Ushio, D. Fan and M. Tanaka: Contribution of arc plasma radiation energy to electrodes, Trans. JWRI, Osaka University, 22 (1993), pp. 201-207.
- 12) L. E. Cram: A model of the cathode of a thermionic arc, J. Phys. D: Appl. Phys., 16 (1983), pp. 1643-1650.
- 13) 黄地: 溶接・接合プロセスの基礎, 産報出版, (1996).
- 14) 牛尾, 松田: 最近のタングステン電極, 溶接技術, 35 (1987), pp. 78-81.
- 15) 田中, 牛尾, 池内, 影林: TIG アークにおける陰極作動中タングステン電極の仕事関数の測定, 溶接学会溶接アーク物理研究委員会資料, ア物-03-1194 (2003).
- 16) M. Ushio, A. A. Sadek and F. Matsuda: Comparison of temperature and work function measurements obtained with different GTA electrodes, Plasma Chem. & Plasma Process., 11 (1991), pp. 81-101.
- 17) スハス・パタンカー: コンピュータによる熱移動と流れの数値解析, 森北出版, (1985).
- 18) G. N. Haddad and A. J. D. Farmer: Temperature determinations in a free-burning arc: I. Experimental techniques and results in argon, J. Phys. D: Appl. Phys., 17 (1984), pp. 1189-1196.
- 19) M. S. Benilov and M. D. Cunha: Heating of refractory cathodes by high-pressure arc plasmas I, J. Phys. D: Appl. Phys., 35 (2002), pp. 1736-1750.
- 20) 田中: アークプラズマの基礎現象, 溶接学会誌, 73 (2004), pp. 113-118.
- 21) K. C. Hsu, K. Etemadi and E. Pfender: Study of the free-burning high-intensity argon arc, J. Appl. Phys., 54 (1983), pp. 1293-1301.
- 22) P. Kovitya and J. J. Lowke: Two-dimensional analysis of free burning arcs in argon, J. Phys. D: Appl. Phys., 18 (1985), pp. 53-70.
- 23) 田中: オーストラリア CSIRO 滞在記, 溶接学会誌, 71 (2002), pp. 36-38.