GMA溶接における溶滴の温度計測

In-Situ Measurement of Metal Drop Temperature in GMA Short-Circuiting Welding

平田 好則*・恩田 雅彦**・永木 勇人***・黄地 尚義*
Yoshinori HIRATA, Masahiko ONDA, Hayato NAGAKI and Takayoshi OHJI

(Received April 2, 2004)

Temperatures of metal drop in GMA short-circuiting welding process were in-situ measured using newly developed instrument designed on the basis of two-color pyrometry, which consisted of optical lenses, interference filters for two colors and two sets of high sensitive CCD cameras with fast shutter. In order to avoid radiation from arc plasma, temperature measurement was carried out immediately after molten drop at electrode wire tip was contacted with weld pool and arc was extinguished. Welding current in arcing period was adjusted from 50 A to 250 A using experimental power source in Ar + 20%CO₂ mixture gas shielded GMA welding with mild steel wire of 1.2 mm in diameter. It is shown through in-situ measurement that average temperature of metal drop ranges from 2200 K to 2700 K, depending on level and period of arc current governing electrode wire melting.

Key Words: GMAW, Metal Drop Temperature, Thermal Radiation, Emissivity, Two-Color Pyrometry, Fume Generation

1. 緒言

GMA (ガスマetalアーク) 溶接は、高能率で溶接部品質を確保でき、ロボット化や自動化に適したプロセスであることなどから、製造各分野で広く利用されている。しかし、GMA溶接はスパッタ (火花) とヒューム (煙) の発生を伴い、作業環境や溶接品質を低下させる要因ともなっている。特に、ヒュームは人体に有害であり、抑制する観点から、溶接条件とヒューム発生量との関係などが調べられており、その発生を支配する因子のひとつとして溶滴温度が挙げられている¹⁾。また、溶滴温度は電極ワイヤの溶融速度にも影響を及ぼし、溶接電流やアーク電圧、シールドガスの種類によって変化するため、溶滴の加熱・移行機構を明らかにする上でも重要な因子である。

しかし、溶接中にワイヤ端に形成された溶滴の温度を直接計測することは難しく、これまでの計測例のほとんどは、複数個の溶滴をカロリーメータに捕集して保有熱量を求め、温度に換算したものである^{2,3,4)}。保有熱量から溶滴温度を推定するためには、ワイヤ端を離れた溶滴がカロリーメータに入るまでの熱損失を評価するとともに、温度に大

きく依存する比熱や放射率などの物性値が必要となり、精度や信頼性を確保するのが難しい。

溶接時のその場計測を行うためには光学的な手法を用いる必要があり、本研究では溶滴の熱放射光を計測し、温度に換算する放射測温法を適用することにした。放射測温法による溶滴温度の計測例としては、P. Villemainotによる実験結果⁵⁾がある。溶滴を写真撮影し、そのフィルム濃度から可視光域での放射光量を求め、温度に換算しているが、物体の放射率について十分考慮されていなく、計測精度が明らかでない。そこで、本研究では二色放射測温法の原理に基づいた計測装置を試作し、本計測法の妥当性について検討を行った上で、GMA溶接の短絡移行時における溶滴の温度測定に適用した。

2. 熱放射による温度計測

2.1 二色放射測温法の原理

物体が完全放射体 (黒体) の場合には、単色射出能 $E_{b\lambda}(\lambda, T)$ [W/m²] と熱力学温度 T [K] との関係はプランクの放射則によって表され、次式で与えられる^{6,7)}。

* 大阪大学大学院工学研究科 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

Osaka University, Graduate School of Engineering (2-1 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871, Japan)

** 大阪大学大学院生 (現在, 三菱重工(株))

Graduate Student, Osaka University (Present Address: Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)

*** 大阪大学大学院生 (現在, 高田機工(株))

Graduate Student, Osaka University (Present Address: Takadakiko Co., Ltd.)

Fig. 1 Spectral radiance of blackbody.

$$E_{b\lambda}(\lambda, T) = \pi L(\lambda, T) = \frac{2\pi c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (1)$$

ここで, $c_1 = 5.9548 \times 10^{-17} \text{ W} \cdot \text{m}^2$, $c_2 = 0.01488 \text{ m} \cdot \text{K}$, $L(\lambda, T)$: 単色放射強度(分光放射輝度) $[\text{W}/\text{sr} \cdot \text{m}^2]$ である。(1)式で表される各温度における波長と単色射出能の関係をFig. 1に示す。(1)式を全波長にわたって積分して全射出能 $E_b(T)$ を求めれば次式のステファン・ボルツマンの法則が得られる。

$$E_b(T) = \int_0^\infty E_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda = \frac{2}{15} \cdot \frac{\pi^5 c_1}{c_2} \cdot T^4 = \sigma T^4 \quad (2)$$

ここで, $\sigma = 5.6696 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{K}^{-4}$ である。全放射エネルギーを計測に利用する場合は、原理的にこの関係によって温度を測定する。また、単色射出能についても、Fig. 1に示すように温度とともに増加するので、特定の波長もしくは波長帯域の放射エネルギーを計測すれば、物体の温度を知ることができる。

しかし、通常の物体は黒体のような完全放射体ではないので、放射エネルギーの波長依存性はプランクの放射則で示されるものとは異なっている。すなわち、実際の物体の表面が発する熱放射エネルギーは同一温度の黒体が発するエネルギーよりも小さく、その単色射出能 $E_\lambda(\lambda, T)$ は次式で与えられる。

$$E_\lambda = \epsilon(\lambda, T) E_{b\lambda}(\lambda, T) \quad (3)$$

ここで, $E_{b\lambda}(\lambda, T)$ は黒体の単色射出能 $[\text{W}/\text{m}^2]$, $\epsilon(\lambda, T)$ は単色放射率 (0~1の範囲で黒体の場合, 1)である。放射率は一般に物体の材質や表面状態, 温度, 波長, 雰囲気等によって変化するため, 予め求めておく必要がある。対象の物体に対応する単色放射率 ϵ は実験的に求めるか, あるいは過去の文献値を適用するしかない。

二色放射测温法は, 放射率が未知の物体でも狭い波長帯域で単色放射率が一定と見なせる場合, 異なる2つの波長

の光を選択し, 各々の単色射出能の比から温度を求める方法である。すなわち, 温度 T の物体の単色放射率は波長によって異なるが, 2つの波長 λ_1 と λ_2 が近接していれば, $\epsilon(\lambda_1, T) = \epsilon(\lambda_2, T)$ と仮定することができるので, (1)(3)式を用いて次式による単色射出能の比から温度を求めることができる。

$$R_0(T) = \frac{\epsilon(\lambda_1, T) E_{b\lambda}(\lambda_1, T)}{\epsilon(\lambda_2, T) E_{b\lambda}(\lambda_2, T)} = \frac{E_{b\lambda}(\lambda_1, T)}{E_{b\lambda}(\lambda_2, T)} \quad (4)$$

しかし、実際の計測系では、特定の波長を選択するために干渉フィルターなどを用い、さらに種々のレンズやホルマルなどの光検出素子などから構成されている^{8,9)}。したがって、高温物体から射出された熱放射光はこれらを通して減衰し、光検出部に照射される。これらの光学要素はそれぞれが波長依存性を持つため、計測系全体の分光特性によって決まる関数を $F(\lambda)$ とすると、計測系を通して観測される放射照度 $E_{L-U}(\lambda, T)$ は、厳密には(5)式のように表さる。

$$E_{L-U}(\lambda, T) = \int_L^U \epsilon(\lambda, T) E_{b\lambda}(\lambda, T) F(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

ここで, L, U : 測定する波長帯域の上限及び下限で, 干渉フィルターの単色透過率に支配される。ここでも, 単色射出能の比と同様, 異なる2つの干渉フィルターの波長帯域で単色放射率は, $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \text{一定}$ とすると放射照度の比 $R(T)$ は, 次式のように表せる。

$$R(T) = \frac{\epsilon_1 \int_{L_1}^{U_1} E_{b\lambda}(\lambda, T) F_1(\lambda) d\lambda}{\epsilon_2 \int_{L_2}^{U_2} E_{b\lambda}(\lambda, T) F_2(\lambda) d\lambda} = \frac{\int_{L_1}^{U_1} E_{b\lambda}(\lambda, T) F_1(\lambda) d\lambda}{\int_{L_2}^{U_2} E_{b\lambda}(\lambda, T) F_2(\lambda) d\lambda} \quad (6)$$

Fig. 2 Experimental device of two-color pyrometry.

Fig. 3 Spectral response of CCD sensor.

2.2 試作計測装置

本研究で試作した二色計測装置の光学系の概略をFig. 2に示す。対物レンズから入射した高温物体からの画像(熱放射光)をプリズムによって2つに分割し、それぞれの光路においてリレーレンズを介して結像位置が調整される。そして、それぞれが異なる2つの波長の干渉フィルター(中心波長590.2nmと689nm)を通過して、2つのCCDカメラ(NAC製:Flash Cam)の素子表面で結像し、画像として記録される。使用した干渉フィルターの透過率の波長依存性は、中心波長の透過率と半値幅のデータを用いてガウス分布で近似している。

CCDカメラに関してはFig. 3に示す感度特性を持ち、400~1060nmの波長領域で動作する。また、このカメラは露光時間を1 μ s~1msの範囲内で変えて撮影することが可能で、静止画像として1枚分を内蔵フレームメモリに蓄えることができる。CCDカメラのシャッタータイミングを与えるトリガーパルスの発生には、パーソナルコンピュータ(富士通製:FMV SIV207)とDA変換器を用い、2つのカメラの同期撮影を行っている。

CCDカメラで撮影した画像は、画像処理ボード(CYBERTEK製:CT-3000A)を用いてデジタル画像データに変換している。画像処理では、輝度信号を10ビット(1024階調)の出力データ(相対輝度)に変換する。なお、データの取り込みの際は1画面(768画素×493画素)の中から適宜選択し、100画素×100画素をパーソナルコンピュー

Fig. 4 Arrangement of measurement system for temperature calibration with blackbody furnace.

タに取り込んでいる。

2.3 計測装置の校正

放射温度計は通常、黒体炉によって校正が行われる。本研究においても校正用標準光源として試作した黒体炉(以後これを黒体炉と呼ぶ)を使用した。Fig. 4に黒体炉を用いた校正方法の概略を示す。図のように、黒体炉から発せられる放射エネルギーを実験で用いる計測系で測定し、黒体の相対輝度を求め、その相対輝度と熱電対が示す温度とを対応させた。

実験では対物レンズ(COSMICAR製:TELEVISION LENS 75mm)の絞りを4とし、中間リング10mmを使用し、CCDカメラのゲインを固定した。露光時間を変えて黒体炉を撮影した時の計測結果の一例をFig. 5に示す。図は黒体炉の温度を1673Kに設定したときの結果である。図(a)は露光時間と黒体炉の相対輝度の関係を示しており、図中の○、●はそれぞれ中心波長689nmと590.2nmの干渉フィルターを透過してきた放射光の相対輝度を示している。露光時間を長くするとともに、光量が増加するので相対輝度が高くなる。図(b)は、図(a)に示される2つの干渉フィルターを通過した放射光の相対輝度の比(590.2nm/689nm)をとって整理したものである。図から、露光時間が200~300 μ sを超えると露光時間によらず相対輝度比はほぼ一定値を示すことが分かる。露光時間が短い領域で値が若干大きくなっているが、これは光量が低下すると相対輝度比をとったときに誤差が大きくなるためであり、実験ではレンズの絞りやNDフィルター、露光時間、カメラゲインなどによって、カメラ出力の相対輝度が100~800となるよう調整している。

本研究で用いている黒体炉は、温度を1720K程度までしか上昇させることができず、上記の校正もその範囲内の計測となる。しかし、計測対象としている溶滴の温度は、2500K程度あるいはそれ以上であることも考えられる。したがって、精度の高い校正曲線を得るためにはより高温での校正を行う必要がある。プラズマ焼結装置(SPS)は、セラミックスや耐熱金属等の主として粉末材料を真空あるいはアルゴン雰囲気中のチャンバー内で加圧し、グラファイ

Fig. 5 Relationship between exposure time and CCD output. (1673K)

Fig. 6 Relationship between temperature and intensity ratio.

トなどの発熱体や材料に電流を流して加熱し、焼結させるもので、校正用の熱源として利用することにした。発熱体として使用した材料はグラファイト ($\phi 10 \times 30$) で、チャンバー内を真空にして昇温した。また、温度はあらかじめグラファイトを用いて校正されている赤外線放射温度計 (グラファイトの放射率 $\epsilon = 0.9$) により計測した。黒体炉による校正と同様、プラズマ焼結装置から発せられる放射エネルギーを計測系で測定し、求めた相対輝度と赤外線放射温度計が示す温度とを対応させた。

以上のように求めた光量比を用いて、(6) 式から相対輝度比曲線を求めた結果を Fig. 6 に示す。図中のプロット点は試作黒体炉とプラズマ焼結装置による実験結果である。実験値の方が若干大きい値を示しているが、計算 (実線) とほぼ一致していることが分かる。なお、実験結果のなかで黒体炉によるものが計算値との誤差がもっとも大きくなっているが、その理由としては、試作黒体炉の熱電対による温度モニター点と熱放射計測点の位置的ずれが他の方法よりも大きいことが影響しているものと考えている。

3. 実験装置および実験方法

Fig. 7 に示すような電流波形制御溶接モデルに対応する

Fig. 7 Schematic explanation of bridging transfer process controlled by current waveform.

デジタル制御溶接電源を試作し、アーク電流 I_a とその通電時間 T_a をそれぞれ個別に設定して、ワイヤ溶融や溶滴サイズの影響を調べた。試作した溶接電源はGMA溶接装置、アナログトランジスタ制御電源及びデジタルコントローラから構成されている。Fig. 8 に試作電源による実際のマグ溶接時の電流・電圧波形を示す。

実験では、主として $\text{Ar} + 20\% \text{CO}_2$ の混合ガスをシールドガスとして用い、溶接ワイヤに直径 1.2mm の軟鋼ワイヤ、試験材に軟鋼板 3.2mm 厚を用いた。また、溶接速度は 800mm/min、母材-チップ間距離は 20mm とした。実験装置の配置を Fig. 9 に示す。

短絡直後の溶滴画像を撮影するためには、短絡した瞬間にカメラシャッターのトリガ信号を出力して撮影する必要がある。実験ではアーク電圧が 15V 以下になった瞬間にトリガ信号を出力している。その際、アークが消弧しても数 10 μs はアークプラズマが残存している可能性があるため、さらに 200 μs の遅れ時間を設定してプラズマの残光の影響を逃れている。

4. 溶滴の温度計測

4.1 温度分布

Fig. 10 は、試作計測装置により撮影した溶滴の CCD カ

Fig. 8 Current and voltage waveform in current controlled MAG welding.

Fig. 9 Experimental setup for observation of metal transfer in GMA short-circuiting welding process.

メラ画像と相対輝度分布を示している。この時の溶接条件はアーク電流 $I_a=200\text{A}$ 、アーク電流通電時間 $T_a=50\text{ms}$ である。撮影条件は対物レンズの絞り16、露光時間 $300\mu\text{s}$ 、NDフィルターは使用していない。Fig. 10(A)-(a)は、中心波長 590.2nm の干渉フィルターを透過した放射光の相対輝度分布を示しており、図(B)-(a)は、中心波長 689nm の干渉フィルターを透過した放射光の相対輝度分布を示している。

次に、この2つの相対輝度分布に画像処理を施して、輝度比分布を作成した結果をFig. 11(a)に示す。さらに、Fig. 6に示した校正曲線を用いて、輝度比分布から温度分布を

推定した結果をFig. 11(b)に示す。図(b)から、溶滴中央部では $2300\sim 2500\text{K}$ 程度を示しており、左右の外縁部を除いてほぼ様な温度分布となっていることが分かる。溶滴の外縁部左側では $2900\sim 3100\text{K}$ とやや高い値を示しており、実際にこの部分の温度が高い可能性もあるが、計測系の問題であると考えている。すなわち、奥行きのある物体を撮影する場合、光学系の被写界深度によって結像面上での照度(相対輝度)が変化するが、左右のCCDカメラの設定が同じ状態であれば問題ない。しかし、実際には微妙に両者の焦点位置がずれている可能性もあり、このような外縁部での誤差が大きくなるものと考えられる。また、周辺部は輝度が急激に変化するとおり、左右の画像を重ね合わせるときに生じる画像処理精度の問題等も原因であると考えられ、今後の検討課題としている。

なお、ティグアークを用いて、ステンレス鋼などの薄板溶融池の裏面側を計測し、固液界面(溶融線)の計測値と融点との差異を比較したところ、最大 50K 程度であったことから、撮影対象が平面状の形状をしている場合、計測誤差は 50K 以内と考えている。

4.2 電流波形が溶滴温度に及ぼす影響

ここでは電流波形が短絡時の溶滴温度にどのような影響を及ぼすかについて述べる。そのためには、各溶接パラメータと溶滴温度の関係を整理することが必要となるが、本研究では以下のように平均温度を定義して溶滴温度の評価値として用いる。

それぞれの波長(λ_1, λ_2)の干渉フィルターを通して観測される放射照度(輝度)の積分平均を次式のように表現する。

$$\begin{aligned}\bar{E}_1 &= \frac{1}{A} \int_A \epsilon(\lambda_1, T) \cdot T(\lambda_1, T) \cdot F_1(\lambda_1, T) dA \\ &= \epsilon(\lambda_1, \bar{T}) \cdot E(\lambda_1, \bar{T})\end{aligned}\quad (7)$$

(a) Relative luminescence of metal drop surface

(b) CCD image of metal drop

(A) Left position [590.2nm]

(a) Relative luminescence of metal drop surface

(b) CCD image of metal drop

(B) Right position [689nm]

Fig. 10 CCD image and relative luminescence of metal drop surface in GMA short-circuiting welding process. (Ar+20%CO₂ mixture gas shield, mild steel wire: 1.2mm in dia., $I_a=200A$, $T_a=50ms$)

$$\begin{aligned}\bar{E}_2 &= \frac{1}{A} \int_A \epsilon(\lambda_2, T) \cdot T(\lambda_2, T) \cdot F_1(\lambda_2, T) dA \\ &= \epsilon(\lambda_2, \bar{T}) \cdot E(\lambda_2, \bar{T})\end{aligned}\quad (8)$$

すなわち、輝度の積分平均が平均温度 $\bar{T}$ の点光源を観測したときの輝度に等しいと定義する。この時、 $\lambda_1 \equiv \lambda_2$ であるから、

$$\epsilon(\lambda_1, \bar{T}) = \epsilon(\lambda_2, \bar{T}) \quad (9)$$

したがって、2つの干渉フィルターで観測される平均輝度

の比は (10) 式で表され、この $\bar{T}$ を本研究における平均温度と定義する。

$$\frac{\bar{E}_1}{\bar{E}_2} = \frac{E(\lambda_1, \bar{T})}{E(\lambda_2, \bar{T})} \quad (10)$$

実際の平均温度算出の処理では、それぞれの中心波長 (590.2nmと689nm) の干渉フィルターを透過してCCD素子上に結像した溶滴画像に、デジタル処理を施して相対輝度を積分し、その比 (590.2nm/689nm) を求めて、校正曲線から温度を換算する。この時、溶滴画像に溶融池やスパッ

(a) Relative luminescence ratio of metal drop surface

(b) Temperature distribution of metal drop surface

Fig. 11 Relative luminescence ratio and temperature distribution of metal drop surface. (Ar + 20%CO₂ mixture gas shield, mild steel wire: 1.2mm in dia., $I_a = 200A$, $T_a = 50ms$)

タ等が映っている場合は、溶滴画像のみの相対輝度を取り出して積分する。

まず、アーク電流 I_a が溶滴温度に及ぼす影響について実験的に調べた。アーク電流通電時間 T_a を50msに固定して、アーク電流を50~250Aの範囲で変化させて溶滴温度(平均温度)の計測を行った。その際、ワイヤ送給速度は設定電流に対して安定した周期的な短絡移行溶接となるように適当な値に設定した。また、ベース期間 T_b の長さが溶滴温度に影響を及ぼしていることが考えられるため、ベース期

Fig. 12 Relationship between arc current and drop temperature.

Fig. 13 Relationship between arc time and mean drop temperature.

間は30ms前後となるようにワイヤ送給速度を設定した。実験結果を**Fig. 12**に示す。図より、アーク電流が高くなるほど溶滴温度は高くなる傾向がうかがえる。MAG溶接の溶滴移行は250~280A以上の高電流になると、溶滴サイズがワイヤ径よりも小さくなるスプレー移行となり、アーク電流通電時間内にワイヤ端から離脱して移行してしまうため、それ以上の電流域での実験は行えなかった。

次に、アーク電流 I_a を200Aに固定して、アーク電流通電時間 T_a を5~130msの範囲で変化させて、アーク電流時間が溶滴温度に及ぼす影響について調べた。実験結果を**Fig. 13**に示す。図から、アーク電流を一定とした場合は、アーク電流が流れている時間が長いほど溶滴温度が高くなる傾向を示すことが分かる。

最後に、同じ大きさの溶滴を対象として、ワイヤ溶融時の電流波形が異なる場合、すなわち、アーク電流や通電時間が異なる場合に、溶滴温度にどのように影響するかを検討した。実験における溶接パラメータの設定値を**Table 1**に示し、実験結果を**Fig. 14**に示す。図に示すように、電流波形は各条件で異なるが、溶滴サイズはほぼ2.3mmに制御されている。一方、溶滴温度については、アーク電流が大

Table 1 Welding variables used for temperature measurement of molten drop formed in specific size of $Z_p=2.3\text{mm}$.

Sample	1	2	3	4	5
Arc current [A]	50	100	150	200	250
Arc time [ms]	204	102	68	51	41
Wire feeding Rate [mm/min]	60.9	76.3	87.9	103.4	134.3

Fig. 14 Relationship between arc current and mean drop temperature in constant drop size of $Z_p=2.3\text{mm}$.

きくなるほど高くなることが分かる。したがって、同じ溶融量の場合、電流値が大きいほど短時間で溶融できるが温度は高くなるといえる。

5. 結言

本研究では、二色放射測温法を用いて $\text{Ar}+20\%\text{CO}_2$ 混合ガスシールドのGMA溶接における溶滴温度のその場計測を行い、溶滴の温度分布を推定するとともに、電流波形が溶滴温度に及ぼす影響について調べた。本研究で得られた結果を以下に要約する。

- (1) 二色放射測温法による溶滴の温度分布を推定した結果、アーク電流200A、アーク電流通電時間50msの条件で計測を行った場合、溶滴中央部では2300～2500K程度であり、ほぼ一様な温度分布となっている。
- (2) 電流波形が溶滴温度に及ぼす影響について調べた結果、アーク電流値を一定とした場合は通電時間が長いほど

溶滴温度は高くなり、アーク電流通電時間を一定とすると電流値が大きいほど溶滴温度は高くなることが分かった。(3) 溶滴サイズが一定になるように、アーク電流とその通電時間を調整して溶滴温度の計測を行った結果、アーク電流が大きいほど溶滴温度は高くなることが分かった。

引用文献

- 1) M. Kobayashi, et al.: "Some Considerations about Formation Mechanism of Welding Fumes", Weld. in the World, **16**-11/12 (1978) 238.
- 2) 小沢, 森田: "溶融金属の平均熱量の測定", 溶接学会誌, **32**-2 (1963) 130-137.
- 3) 安藤, 西口, 福田: "MIG溶接における移行粒子の保有熱量・温度", 溶接学会誌, **36**-10 (1967) 1117-1124.
- 4) 丸尾, 平田, 野田: "パルスMIG溶接における溶滴の保有熱量と温度", 溶接学会論文集, **2**-4 (1984) 573-578.
- 5) P. Villeminot, "Soudage MIG sous argon d'acier doux, étude thermique de la partie terminal, température de transfert", Soudage & Techniques Connexes, **21**-9/10 (1967) 367-380.
- 6) C. Kittel, H. Kroemer: Thermal Physics, 2nd Ed., W. H. Freeman and Company (1980).
- 7) 大中, 高城ほか: 輸送現象論, 大阪大学出版会 (2003).
- 8) Y. Okazaki, Y. Uehara and T. Yoshida: "In-situ Measurement of Particle Flattening And Solidification Processes During Plasma Spray Deposition", Proceedings of ICHMT Symposium Molecular And Microscale Heat Transfer in Materials Processing And Other Application, **2** (Dec 1-4, 1996) 205-213.
- 9) 平田, 小澤ほか: "溶射粒子の温度・速度の同時計測", 高温学会誌, **25**-Suppl (1999) 232-238.
- 10) R. B. Bird, W. E. Stewart and E. N. Lighthoot: Transport Phenomena, John Wiley & Sons, inc. (1960)