Introduction to Plasma Measurements —Thermal Plasma—*

by Atsushi Kanzawa**

キーワード：プラズマ，計測，探針，カロリメトリック，熱流束

1. はじめに

プラズマの計測対象としては，各粒子の温度および密度，平均的流速，平衡性，空間電位などがあるが，プラズマは高温でしかも荷電粒子や各種の化学種が含まれているので，それらの計測には種々の工夫を要する。プラズマの計測方法は大きく二つに分けられる。一つはプラズマ中に測定用プローブ等を入れておこなう直接的な方法で，簡便で廉価であるが多かれ少なかれプラズマの場を乱す欠点がある。もう一つはプラズマから出る特有な光を利用したり，プラズマに電磁波や音波をあててその変化からプラズマ状態を知る間接的な方法で，場を乱すことが少ないが煩雑で高価である。ここでは前者の方法について，主として熱プラズマを対象に概説する。後者については次回で論じられる予定である。

直接的な方法には，プローブに出入する電流を測定する静電探針法，プラズマのエンタルピー流を測定するエンタルピープローブ，プラズマからの熱フラックスを測定する熱流束計などがあり，以下それらについて記述する。

2. 静電探針法

2.1 基礎的事項

プラズマ中に探針（例えば細い金属線）を入れプラズマ電位に対して正または負の電位を印加すると，電流が流出入する。この電流値はプラズマの状態に依存するので，電流値の測定結果からプラズマの温度や荷電粒子密度を知ることができる。これを静電探針法またはラングミュア探針法といい，古くからプラズマ診断の代表的なものの一つとして使用されている。

探針に印加した電圧と，それに流出入する電流の関係は一般的に図1のようになる。領域Ⅰは探針にある程度以上の大きさの負の電位を印加した場合で，イオンのみが探針にくるのでイオン電流領域と呼ばれる。このときのイオン（飽和）電流密度は

$$j_{is} = \frac{1}{4} n_i v_i e \quad (1)$$

で与えられる。領域Ⅲは探針に正の電位を印加した場合で，主として電子のみが探針にくるので電子電流領域と呼ばれる。このときの電子（飽和）電流密度は

$$j_{es} = \frac{1}{4} n_e v_e e \quad (2)$$

で与えられる。領域Ⅱは探針にわずかの負の電位を印加した場合で，イオンに加えて高エネルギーの電子が電界に逆らって探針にくる領域である。この領域での電流密度は

$$j = j_i + j_e = \frac{1}{4} \left(n_i v_i e - n_e v_e e \exp \left(\frac{e |V - V_p|}{K T_e} \right) \right) \quad (3)$$

で与えられる。これらの式において，粒子間の衝突が無視できること，電子のエネルギー分布はマクスウェル分布であることを仮定している。

特性曲線が領域ⅡとⅢの間で折れ曲がっているが，ここがプラズマ電位（ V_p ）に相当している。また，電流が0での電位をフロート電位（ V_f ）といい，この電位では探針にくる電子とイオンの数は同数である。

2.2 熱プラズマへの適用

静電探針法は低圧の無衝突型プラズマに対して用いられる方法であり，熱プラズマのような衝突支配型プラズマに適用する場合はその影響を考慮する必要がある。また多くの場合は探針を冷却する必要がある。そのときは探針表面上に温度境界層が形成される。したがって，探針に出入する電流値と境界層を考慮した解析解を併用して間接的に診断することになる^{1,2)}。

衝突支配型というのは，プラズマ中の平均自由行程が探針の大きさに比べて非常に小さい場合をいう。この状況においては，探針表面近傍の電位勾配の大きい領域（シース），温度や密度の変化する領域（境界層領域），およびその外の乱されていない領域（外部領域）が存在する。この場合，式(1)–(3)の右辺における温度および粒子密度はシース表面での値になる。なお電位勾配の大きい領域内で多くの衝突がある場合は，デバイの長さ相当の衝突が無視できる領域と，電位勾配がありしかも衝突がある領域（遷移域）に分けて考えることもある。

2.2.1 電子温度

*原稿受付 平成7年12月20日

** 東京工業大学 Tokyo Inst. of Tech.

図1の領域IIにおいて、式(3)の対数プロットをするとその勾配から電子温度が求められる。ただしこれから求められる電子温度はシース表面のものである。しかし境界層内での衝突が弾性衝突のみ（電離や再結合などしない）とすると、電子の質量が小さいため衝突によるエネルギー損失はわずかとなり、シース表面の電子温度はプラズマの電子温度とほぼ等しいことが確かめられている。したがってこれからプラズマの電子温度が近似的に求められる。

2.2.2 フロート電位

測定により探針の電流-電圧曲線をプロットし、それから電流が0になるところの電位を求めるのが確実な方法である。またはイオンおよび電子の飽和電流密度を測定し、次式

$$V_f = \frac{kT_e}{2} \ln \frac{j_{is}}{j_{es}} \quad (4)$$

からも求めることができる。この式は、式(3)においてフロートの条件 $j=0$ とプラズマの条件 $n_i=n_e$ を入れて導いたものである。イオンおよび電子の飽和電流密度の比は実測から求めるか、次式

$$\frac{j_{is}}{j_{es}} = \frac{v_i}{v_e} = \frac{m_i T_e}{m_e T_i} \quad (5)$$

を用い、電子温度 T_e に上で求めたプラズマ電子温度を、イオン温度 T_i に探針表面温度を代入して、近似的に計算してもよい。

2.2.3 粒子密度

境界層内の粒子密度分布は両極性拡散に基づいた流体力学の成分保存式を用いて計算することができる。この場合境界層内は凍結状態を仮定し、粒子の電離や再結合は起こらないものとする。これによって求められた探針へのイオンフラックスはイオン飽和電流密度と等しいと考えてよい。イオンフラックスはプラズマのイオン粒子密度（電子粒子密度と等しい）に依存するので、測定で得られたイオン飽和電流密度と計算で求めたイオンフラックスが等しくなるようにプラズマでのイオン粒子密度を探せばよい。

3. エンタルピープローブ

3.1 方法

図2に水冷三重管エンタルピープローブを示す³⁾。プラズマ流の一部がプローブ中央部通路に入り、まわりに流す水で冷却される。冷却後のガスの温度と流量、および冷却水の流量と出入口の温度差を測定する。冷却水の温度上昇はプローブの外側を流れるプラズマから入る熱

図1 静電探針の電流-電圧特性

にも依るので、これを相殺するために、プラズマ流が入る通路を閉じたときについても冷却水の温度差測定をおこなう。この場合のプローブにおけるエネルギー収支式は

$$\dot{m}_g (h_p - h_0) = \dot{m}_c C_p (\Delta T_{\text{flow}} - \Delta T_{\text{no flow}}) \quad (6)$$

で与えられる。各測定値を式(6)に入れると、プラズマ流のエンタルピーが求められる。プラズマが熱平衡状態とすればこれからプラズマの温度が求められる。

この方法の長所は、構造が簡単で付属機器も少ないこと、次項で述べる熱流束計のように伝熱係数を必要としないことである。しかし、プラズマ流を入れたときと、入れないときの2回測定する必要があるので定常的な場に限られること、入れるガス流量を少なくすると誤差が大きくなること、などの欠点がある。特にプローブ外側を流れるプラズマから入る熱量が大きいため注意を要する。これによる誤差に関しては

$$\sigma = \frac{\Delta T_{\text{flow}} - \Delta T_{\text{no flow}}}{\Delta T_{\text{flow}}} \quad (7)$$

の値をプローブ感度と定義し、その見積もりを検討したものが⁴⁾。

3.2 測定例

エンタルピープローブによるアルゴンプラズマジェット温度分布の測定例を示す⁵⁾。プラズマジェット源のアーク放電の条件は、電流が450~600 A、放電電力が10~17 kW、アルゴンガス流量が24~48 l/minである。エンタルピープローブは微小移動装置に取り付けられていて、軸および半径方向の分布が求められるようになっている。結果の一例を図3に示す。プラズマジェットの等温線が比較的良好に求められていることがわかる。

3.3 流速および組成測定

上のエンタルピープローブを用いて、流速および組成も測定することができる^{6-9,11)}。エンタルピープローブの通路を閉じるとピトー管として使用することができ、動圧測定から流速が求められる。また流入したガスを分析することにより組成を知ることができる。図4に示したのはその測定方法の一例である⁹⁾。

3.3.1 流速測定（ピトー管）

ピトー管は通常の流速測定によく用いられ、流速は動圧（全圧と静圧の差）から次式

$$u = \sqrt{\frac{2(P_{st} - P_p)}{\rho_p}} \quad (8)$$

によって求められる。分母の密度を与えるために温度が必要である。この方法は簡便であること、動圧測定の誤差が流速に対して1/2になることなどの利点がある。ただしこれをプラズマに適用する場合はいくつかの問題点

図2 水冷三重管エンタルピープローブ

図3 エンタルピープローブによる温度測定結果の一例

図4 エンタルピープローブによる温度、流速、組成の測定

がある。一番大きいのは、プラズマとピトー管表面との間に大きな温度差ができることである。多くの場合熱から保護するために水冷したピトー管を用いるためである。この温度差の影響を考慮した計算がある⁶⁾。衝突流れを考慮して計算したもので、その結果を図5に示す。この図の縦軸の f は次式

$$u = \sqrt{\frac{2(P_{st} - P_p)}{\rho_p}} f \quad (9)$$

で示される補正係数で、横軸はプローブ表面温度と外部流温度との比である。プローブ温度が外部流温度より高い場合の方が f による誤差が大きいたことが分かる。

この他に粘性の影響や高速の影響がある。通常の熱プラズマ流の測定には、この影響は小さいとしてよい。またピトー管を振り子に取り付け、プラズマ流を横切って掃引させ一回の測定で動圧分布を求める方法もある。この場合は水冷する必要がない利点がある¹⁰⁾。

3.3.2 組成測定

エンタルピープローブに流入するプラズマガスの一部をサンプリングし、それを分析することによってプラズマの組成を知ることができる。図4の例ではガスの熱伝導率が組成に依存することを利用して求めている。一例として、アルゴンプラズマジェットを空气中に噴出させたとき、アルゴンの組成が空気との混入によってどう減少していくかをこの方法で測定したものがあ。その結果を図6に示す¹¹⁾。アルゴンガスの流量が大きくなると流れが乱流になり空気との混入が大きくなって、アルゴン組成がより早く減少することがわかる。

3.4 水冷六重管熱量計

外側のプラズマから入る熱を防ぐために、図7に示したような水冷六重管の熱量計もある³⁾。これだと測定部

図5 ピトー管の温度差補正係数

図6 エンタルピープローブによるアルゴン組成の測定結果

には外から熱が入らないので1回の測定で済み

$$\dot{m}_g (h_p - h_o) = \dot{m}_c C_p \Delta T_{flow} \quad (10)$$

の式からエンタルピーを求めることができる。しかし構造上外径が大きくなるのが欠点である。

4. 熱流束計

伝熱係数がわかっている場合は

$$q = h(T_p - T_w) \quad (11)$$

から、熱流束を測定することによりプラズマ温度が求められる。一例として、直径0.5~1 mmの銅球に熱電対を接続し、この銅球をプラズマ中で掃引して銅球の温度上昇から熱流束を求めたものがある(図8)^{12,13)}。伝熱係数を求めるのに通常の球に関する関係式

$$Nu = 2.0 + 0.6 P_r^{1/3} R_e^{1/2} \quad (12)$$

を用いている。ただしこの式は物性値が一定の場合のものであり、プラズマに用いる場合は物性変化を考慮する必要がある。多くの場合は、プラズマ温度と銅球温度の平均温度に相当する物性値を用いて計算する。またレイノルズ数を求めるのに流速が必要であるが、これには上述の水冷ピトー管などを併用する。このようにして求めたプラズマジェットの温度分布を図9に示す。

熱流束計としては、内部温度がほぼ一样になる物体をプラズマ中におきその物体の温度変化を測定していくもの(非定常法、上の例はこれ)、冷却した物体をプラズマ中におき冷却水の温度上昇を測定して求めるもの(定常法)¹⁴⁾、物体の片面をプラズマに接するように物体内

図7 水冷九重管エンタルピープローブ

図8 熱流束の測定

図9 熱流束計による温度測定結果の一例

部の温度分布を測定して求めるもの（定常・非定常両方）などがある。

5. おわりに

プラズマの直接的測定方法について、主に熱プラズマを対象にその概要を述べた。これらの測定方法はどれをとってみてもそれぞれについて問題点やノウハウがあり、また新しい測定方法や測定技術も日進月歩で研究開発されている。最近ではエレクトロニクスやレーザーなどの活用が盛んで、精度も上り、簡便さも増し、これまで

測定できなかったものが測れるようになった。また、プロセス中でのリアルタイムでの測定も一部可能になり、材料プラズマにとって不可欠の測定技術がさらに進められるものと思われる。

記号

C_p : 定圧比熱	V : 電位
e : 単位電荷	v : 一次平均速度
f : ピトー管補正係数 (式 (9))	x : アルゴン組成の分率
h : エンタルピー (式 (6), (10))	z : 軸方向
伝熱係数 (式 (11))	ρ : 密度
I : アーク放電電流	σ : エンタルピープローブ感度 (式 (7))
j : 電流密度	<添え字>
k : ボルツマン定数	c : 冷却水
m : 粒子質量	e : 電子
$\dot{m}$: 質量流量	f : フロート
Nu : ヌッセルト数	g : ガス
n : 粒子密度	i : イオン
Pr : プラントル数	o : 出口
p : 圧力	p : プラズマ
q : 熱流束	s : 飽和
Re : レイノルズ数	st : 淀み点
r : 半径方向	w : プローブ表面温度
T : 温度	flow : プラズマ流を導入する
ΔT : 冷却水の温度差	no flow : プラズマ流を導入しない
u : 流速	∞ : 外部

文 献

- 1) J. Grey and P. F. Jacobs: Cooled Electrostatic Probe, AIAAJ., 5-1 (1967), 84-90
- 2) 神沢：高圧プラズマ流での探針電流，機械の研究，21-9 (1969), 1241-1246
- 3) Eckert, E. R. G and Goldstein, R. J.: Measurements in Heat Transfer 2nd ed, McGraw-Hill (1976), 337
- 4) J. Gery: Sensitivity Analysis for the Calorimetric Probe, Rev. Sci. Instrum., 34-8 (1963), 857-859
- 5) A. Capetti and E. Pfender: Probe Measurements in Argon Plasma Jets Operated in Ambient Argon, Plasma Chem. Plasma Process., 9-2 (1989), 329-341
- 6) J. Mostaghini and E. Pfender: On the Use of Water-Cooled Enthalpy Probes for Velocity Measurements in Thermal Plasma Flows, ISPC-11, 1 (1993), 321-326
- 7) S. Katta, J. A. Lewis and W. H. Gauvin: A Plasma Calorimetric Probe, Rev. Sci. Instrum., 44-10 (1973), 1519-1523
- 8) W. D. Swank, J. R. Fincke and D. C. Haggard: Modular Enthalpy Probe and Gas Analyzer for Thermal Plasma Measurements, Rev. Sci. Instrum., 64-1 (1993), 56-62
- 9) J. Grey, P. F. Jacobs and M. P. Sherman: Calorimetric Probe for Measurement of Extremely High Temperature, Rev. Sci. Instrum. 33-7 (1962), 738-741
- 10) P. Lj. Stefanovic, P. B. Pavlovic and S. N. Oka: Dynamic Method of Flying Pitot Probe for Diagnostic of Thermal Plasma Free Jets, ISPC-10, 1 (1991), 1.2, 1-5
- 11) M. Brossa and E. Pfender: Probe measurements in Thermal Plasma Jets, Plasma Chem. Plasma Process., 8-1 (1988), 75-90
- 12) 神沢 淳：熱電対による高温プラズマ流の温度の推定，化学工学，37-5 (1973), 533-535
- 13) 渡辺隆行，本多卓也，神沢 淳：吹き出し流によるプラズマ流の絞り，化学工学論文集，141 (1988), 1-7
- 14) 大宮 衛，神沢 淳：プラズマ伝熱におけるジュール熱の影響，化学工学論文集，2-1 (1976), 47-52