電磁プラズマ加速アークジェットセラミック コーティングへの応用*

田原 弘一**, 安井 利明***, 加賀谷洋一***, 吉川 孝雄***

Application of a Magneto-Plasma-Dynamic Arcjet to Ceramic Coatings*

by Hirokazu Tahara**, Toshiaki Yasui***, Yoichi Kagaya*** and Takao Yoshikawa***

A magneto-plasma-dynamic (MPD) arcjet generator, in which plasma generated is accelerated by the electromagnetic interaction between the discharge current and the magnetic field induced by it, is a simple, efficient, and reliable device suitable for material processing. A quasi-steady MPD arcjet was studied to examine fundamental operational characteristics and plasma features. The MPD arcjet was operated for discharge currents of 3-25 kA with working gases of Ar, H₂, N₂ and NH₃. Three different discharge modes of diffuse, spot and gross erosion existed in the MPD arc, and a qualitative explanation of their nature was presented. As a result, the MPD arcjet was found to produce high-velocity, high-temperature, high-density, large-area plasmas. For applications of MPD arcjets to ceramic coatings, an ablation-type MPD arcjet with a cathode covered with ceramic materials was developed. In 100-shot operations for Ar at 5-10 kA, the ablation rates of the ceramic covers ranged from 1.1 to 7.5 mg/shot. The MPD plasma spraying showed that a dense uniform ceramic film with above 1200 Vickers hardness was deposited. From the XPS spectra, the peak area ratio of Si/Al for the coating film almost equaled that for the raw ceramic material, and the valence numbers of Al and Si did not change. Consequently, the MPD arcjet was found to have a high potential for material processing.

Key Words: Magneto-plasma-dynamic arcjet, electromagnetic acceleration, quasi-steady operation, high plasma velocity, high plasma density, high plasma temperature, ceramic coating, rigid film, X-ray photoelectron spectroscopy

1. ま え が き

電磁プラズマ加速 (Magneto-Plasma-Dynamic: MPD) アークジェットは通常の熱プラズマジェットと同様の同軸電極構造を持ち、プラズマ加速機として古くから各種理工学実験に用いられ、近年では将来の宇宙用推進機として注目を集めてきた¹⁻⁴⁾。MPD アークジェットでは放電電流とそれに伴う自己誘起磁場の相互作用によって作動ガスが電磁氣的に加速されるので、他のプラズマ熱源に比べて高速で高温・高密度の大面積プラズマを生成することができる⁵⁻⁷⁾。そのため、各種のプラズマ材料プロセスへの応用が期待される。

MPD アークジェットにおいて電磁氣力を効果的に利用しようとする、キロアンペアオーダーの大電流作動が必要である。しかし、耐久性の観点より、MPD アークジェットの作動方法は定常作動よりパルス作動が得策であると考えられる。現在検討されている作動条件は放電電流 3~25 kA で 1 msec 程度の準定常作動 (1 msec の間は放電電流・電圧などは一定) をさせ、これを 1~10 Hz 程度で繰り返し、平均電力として 1~10 kW になるような作動である^{8,9)}。MPD アークジェットは 1 msec 程度の放電による加熱を残りの時間 (1 Hz の場合約 999 msec) で輻射冷却することができるので、原則として水冷する必要がなく、構造が簡単になり軽量化できる。また、その単位時間当たりの放電回数、すなわち繰り返し

周波数を変えることによって、平均電力とプロセス時間を容易に制御することができる。

本研究では、プラズマ加速理工学実験用の準定常作動型 MPD アークジェットの基本作動特性が調べられ、下流流れ場のプラズマ状態が診断された。そして、それらの特性が検討され、新たにセラミックス成膜用 MPD アークジェット実験機が試作された。その MPD アークジェットの作動特性が明らかにされると共に、製作されたセラミックス皮膜の性質が評価された。

2. 電磁プラズマ加速アークジェットの加速原理¹⁰⁾

MPD アークジェットの放電室内の電流および磁場分布を Fig. 1 に示す。発生する電磁氣力は、放電電流の軸方向成分 j_z と自己誘起磁場 B_θ による $f_z = j_r \times B_\theta$ 、および径方向電流成分 j_r による $f_r = -j_z \times B_\theta$ である。前者は直接軸方向の加速力となり、ブローイング力と呼ばれる。一方、後者はプラズマ径方向・内側に強く圧縮し、陰極先端付近において高圧部を生じさせる。その反作用によ

Fig. 1 Patterns of current and magnetic field in magneto-plasma-dynamic arcjet.

*原稿受付 平成6年11月11日 平成6年度秋季全国大会で発表

**正員 大阪大学基礎工学部 Member, Faculty of Engineering Science, Osaka Univ.

*** 大阪大学基礎工学部 Faculty of Engineering Science, Osaka Univ.

る加速力はポンピング力と呼ばれる。 f_r と f_z を放電空間で体積分すると、理論全電磁気力 T_{th} は次式のように表される。

$$T_{th} = \left\{ \frac{\mu_0}{4\pi} [\ln(r_a/r_c) + \alpha] I^2 \right\} = \alpha I^2 \quad (1)$$

ここで、 μ_0 は真空中の透磁率、 I は放電電流、 r_a と r_c はそれぞれ陽極および陰極の半径、 α は推力係数 ($0 \leq \alpha \leq 3/4$)、 a は電極形状係数を表す。理論全電磁気力は放電電流の自乗に比例することがわかる。推力係数 α は陰極円錐部に流入する電流割合に依存する。全放電電流が陰極側面に流れ込む時、電磁気力はブローイング力成分のみであり、 $\alpha=0$ となる。一方、円錐部に全電流が等密度で流入する時、ブローイング力成分に加えポンピング力成分が最大になり、 $\alpha=3/4$ となる。

また、MPD アークジェットの加速力では、電磁気力以外に高温ガス膨張による空気力学的な加速力も無視できず、特にそれは低電流・大ガス流量時に顕著である。

3. 電磁プラズマ加速アークジェット作動システム

使用した理工学実験用 MPD アークジェットは、Fig. 2 (a) に示すように、ストレート・ダイバージェントノズル形状の銅製陽極を持ち、そのストレート部は内径 25 mm、長さ 37.5 mm、ダイバージェントノズル部は長さ 36 mm、ノズル出口径 58 mm、半頂角 20° (出口付近は 30°) である。陰極はトリウム入りタングステン製で直径 9.5 mm、長さ 17.5 mm、先端部は頂角 90° の円錐形である (但し、電極の長さとは放電室に露出している長さを言う)。フローティング電極は放電開始時に浮動電位となり、主電極根元付近への電流集中を緩和する。

作動ガスはプラズマジェット背後の 8 個のポートか

Fig. 2 Cross sections of quasi-steady magneto-plasma-dynamic arcjets. (a) MPD arcjet for plasma accelerators, (b) MPD arcjet for ceramic coatings.

ら、陽極内側と陰極外側の 2 つのリング状間隙を通して供給される。本実験条件ではガスの投入法により作動特性が変わらないことが確認されたので、陽極側と陰極側の流量比は 1 対 1 とした。高速電磁弁 (Fast Acting Valve: FAV) を用いて約 6 msec の間定常的に作動ガスが投入される。流量は FAV のオリフィス径と貯気槽圧によって調整され、その絶対値はオリフィスのスロート部が閉塞状態にあるとして理論的に計算される。実際に真空タンクを閉め、タンク内圧上昇速度より流量を校正すると、そのオリフィスの縮流係数は 0.85~0.95 であった。本研究の場合、流量の値に理論値を用いることは、それぞれの実験条件で流量を最大に見積もっているもので、実際はここで得られた電力変換効率以上の値を期待することができる。

実験装置システムを Fig. 3 に示す。準定常作動型 MPD アークジェットは最大 62 kJ 蓄えることができる 40 段の L-C 梯子回路 (Pulse Forming Network: PFN) により駆動される。本実験では、PFN は 0.6 msec の間、最大 27 kA の電流を準定常に供給することができる。放電は FAV トリガから 3.4 msec 後、コンデンサー充電電圧が電極間に印加されることによる高電圧絶縁破壊により開始される。放電電流は校正されたログス coils を用いて測定され、放電電圧は電極間に 10 kΩ の抵抗を接続し、その分流回路を流れる電流をカレントプローブ (岩通 CP-502) を用いて測定することによって得られる。電圧測定系の周波数応答は約 1 MHz である。なお、理工学実験用の MPD アークジェットでは繰り返しパルス作動は行わず、1 ショット毎に条件を変えて作動特性の取得、もしくはプラズマ診断測定を行う。この時、真空タンクは放電前に 2×10^{-3} Pa 以下に排気され、放電直後は 9×10^{-3} Pa 程度になる。

平均プラズマ噴出速度を測定する場合、MPD アークジェットと FAV は真空タンクの天井から吊るされた推進台の上に取り付けられる。その重さは約 8 kg で、推進台は約 1 Hz の固有振動数をもつ 1 自由度の減衰振動をする。推進台の変位は作動変圧器により検出される。反動力は鋼球を用いて衝撃力を推進台に与えることにより校正された推進台の変位から求めることができる。得られた反動力を作動ガスの質量流量で割れば、平均プラズマ噴出速度が求まる。その時、プラズマジェットを点火していない時の冷たいガスによる反動力は除かれる。

また、MPD アークジェットの加速過程と流れ場の状

Fig. 3 Experimental system with quasi-steady magneto-plasma-dynamic arcjet and substrate stand installed in vacuum tank.

態を明らかにするために、陰極先端部の圧力がピエゾ圧電効果型圧力変換器を用いて測定され⁷⁾、下流域の電子温度とイオン数密度が静電複探針を用いて評価される。

セラミックス成膜用のMPDアークジェットは理工学実験用アークジェットに比べてFig. 2(b)に示すように、その陽極は短く、陰極が放電室内に直接露出していない。またガスポートも陽極側のみである。成膜用MPDアークジェットの陽極ストレート部の長さは18 mm、その直径とダイバージェント部の大きさは理工学実験用アークジェットのそれに等しい。陰極は直径6 mmの端面のみが放電電極として働く。この陰極は成膜材料である円筒状のセラミックカバー（組成： Al_2O_3 ：56 wt%， SiO_2 ：41 wt%，その他CaOなど3 wt%）で覆われている。セラミックス材は陰極部への電流集中により効率よく溶融・蒸発される。陰極前方の放電空間に供給されたセラミックス粒子は高圧プラズマの膨張、もしくはプラズマの電磁気加速によりアークジェット外に排出され加速される。理工学実験用MPDアークジェットの陽極に比べて成膜用アークジェットのそれを短くした理由は、セラミックス粒子が陽極ストレート部に付着することを避け、それらをできる限りスムーズに加速させるためである。また、理工学実験用アークジェットの陰極側ガスポートは成膜用アークジェットではセラミックカバーの存在により不要であると判断した。なお、本実験の成膜用MPDアークジェットはセラミックス材の供給機構を備えておらず、陰極付近のセラミックス部がなくなるとコーティングできなくなるので実用的には更なるアークジェット構造の改良が必要であるが、本研究目的のMPDアークジェットのセラミックス成膜への有効性を認めるためには十分であると考えている。

セラミックス成膜実験における繰り返しパルス作動時に真空タンク内は0.1 Pa台の真空度に保たれている。プラスト処理を行った、厚さ4.5 mmのS45C基板は陽極ノズル先端より50～150 mm下流に設置され、その温度は基板裏側のヒーターにより200～400°Cの範囲で制御される。

4. 電磁プラズマ加速アークジェットの作動特性とプラズマ状態

4.1 放電モード

一定流量において、放電電流を増加させた時の代表的な放電電圧波形をFig. 4に示す。 $I = 5 \text{ kA}$ の場合、電圧波形は矩形で静かであり、陽極は電流担体である電子を単

Fig. 4 Typical waveforms of discharge current and discharge voltage of magneto-plasma-dynamic arcjet for plasma accelerators with Ar at 1.37 g/s.

に受け取るだけの受動的電極として働くと推測される（拡散モード）。電流を次第に上げると、陽極に電流スポットが形成され（スポットモード）、そのスポットの運動により電圧波形に高周波成分が発生すると推定される。陽極にスポットが発生すると、過度の電流集中により陽極の溶融・損耗が生じ、電圧波形は矩形でなくなってくる。本研究では平均電圧波形が矩形でなくなり始める電流を作動上限電流と定める。それ以上の電流値ではFig. 4(d)に示すように、激しい電圧変動はなくなり、大きい陽極損耗が生じた（エロージョンモード）。

4.2 基本作動特性

測定された放電電圧と放電電流の関係をFig. 5(a)に

Fig. 5 Operational characteristics of magneto-plasma-dynamic arcjet for plasma accelerators with various working gases. (a) Discharge voltage vs discharge current characteristics, (b) Energy conversion efficiency vs average exhaust velocity characteristics. The solid lines represent reaction/power ratios of 6, 8, 10, 15, 20 and 30 mN/kW, respectively.

示す。但し、図中の放電電圧の値は、Fig. 4 に示す放電電圧波形において高周波成分を取り除いた平均電圧波形から、放電開始より2分の1放電時間（0.3 msec）経過後の電圧を読みとったものである。通常の電熱型プラズマトーチの垂下特性と異なり、MPD アークジェットの放電電圧は放電電流の増加と共に上昇していく。その増加割合、すなわち $V-I$ の傾きは電流の増大と共に緩やかに増加する。これは低電流放電では電磁気加速と共にジュール加熱による作動ガスの加熱が盛んに行われるが、電流の増加と共に電磁気的な加速に消費される電力が支配的になるためと推定される³⁾。なお、本実験の投入パルス電力（準定常作動時の電力 $V \times I$ ）は100 kW から5 MW 程度であり、各ガスの作動上限電流は Ar では15.4 kA、 H_2 では7.1 kA、 N_2 では9.8 kA、 NH_3 では10.8 kA であった。

投入電気エネルギーが軸方向の運動エネルギーに変換される効率、すなわち電力変換効率 η 、反動力-入力比 T_p 、平均噴出速度 U は次式で与えられる。

$$\eta = F^2 / 2 \dot{m} VI \quad (2)$$

$$T_p = F / VI \quad (3)$$

$$U = F / \dot{m} \quad (4)$$

ここで、 V と I はそれぞれ放電電圧と放電電流、 $\dot{m}$ は作動ガスの質量流量、 F は反動力である。

電力変換効率と平均噴出速度の関係を Fig. 5 (b) に示す。図中の直線は反動力-入力比が一定の直線である。MPD アークジェットでは電磁気的加速を有効に利用しているため、そのプラズマ噴出速度は通常の電熱型プラズマトーチ、減圧プラズマトーチより1～2 オーダー大きいことがわかる。MPD アークジェットでは噴出速度の増加と共に、すなわち放電電流の増加と共に電力変換効率は単調に増加する。一定の噴出速度に対しては作動ガス流量が大きいくほど、すなわち空気力学的加速成分が大きいくほど電力変換効率は高かった。電力変換効率の最大値は作動上限電流により制限され、作動限界内における最高効率は、Ar では20 km/s、9%、 H_2 では100 km/s、40%、 N_2 では30 km/s、13%、 NH_3 では40 km/s、20% である。Ar の場合20 km/s 以下の低速度域をカバーし、 H_2 の場合40～100 km/s の高速度域を、 N_2 、 NH_3 の場合その中間域15～40 km/s を高い反動力-入力比をもってカバーできることがわかる。こうして、種々の作動ガスを用いることにより広範な噴出速度領域が得られる。

4.3 プラズマパラメータ

MPD アークジェット下流流れ場内の電子温度とイオン数密度の空間分布を Fig. 6 に示す。作動ガスは Ar と H_2 、放電電流は10 kA である。Fig. 6 (a) はジェット下流中心軸上で測定された分布で、横軸の原点はノズル出口を表す。温度および密度は共に流れに沿って緩やかに低下していく。電子温度はノズル出口で3～5 eV から下流100 mm 付近で1 eV まで低下し、イオン数密度は 10^{21} m^{-3} 程度から 10^{20} m^{-3} まで減少する。また、陰極先端部の圧力は10 kA 放電時、1 気圧程度になることが確認された⁷⁾。こうして、陰極先端付近の高温・高密度プラズマが加速され膨張し、その熱エネルギーが運動エネルギーにスムーズに変換されていることが推定される。

Fig. 6 (b) はジェット下流50 mm で測定された径方向分布で、原点は中心軸上を表す。温度と密度は共に半径30 mm の範囲内でほぼ一定の値をとっており、電子温度は1～2 eV、イオン数密度は $3 \sim 5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ である。これより、MPD アークジェットでは均質な高温・高密度プ

Fig. 6 Axial and radial profiles of electron temperature and ion number density of magneto-plasma-dynamic arcjet for plasma accelerators at downstream locations for Ar and H_2 at discharge current of 10 kA. (a) Axial profiles on MPD arcjet axis, (b) Radial profiles at 50 mm downstream from nozzle exit.

ラズマが広範囲に生成されていることが推測される。

5. 電磁プラズマ加速アークジェットによるセラミックス成膜実験

作動ガスに Ar (質量流量 1.37 g/s) を用い、放電電流 5 ~ 10 kA, 繰り返し放電周波数 0.05 Hz で 100 発の作動によりセラミックコーティングを行った。

5.1 成膜用 MPD アークジェットの電圧特性と放電状態

放電電流を増加させた時の成膜用 MPD アークジェットの放電電圧波形を Fig. 7 に示す。電流値によらず電圧波形はほぼ矩形になるが、Fig. 4 と比較した場合放電の立ち上がりに鋭い電圧ピークが観察される。これはセラミックカバーで陰極を覆っているため絶縁破壊が起こりにくくなったためと推定される。放電電圧は 5 kA で約 200 V, 10 kA で約 350 V となり (それぞれパルス電力 1 MW, 3.5 MW に相当)、これはセラミックカバーを装着しない理工学実験用 MPD アークジェットの電圧の 4 倍近い値である。陰極付近では電流路がセラミックカバー内に制限されているため激しいジュール加熱が起こり、生成された高温・高圧プラズマと蒸発セラミック粒子もしくはその構成原子との活発な運動量交換が行われていることが推測される。

前章で典型的な電極構造をもつ理工学実験用 MPD アークジェットの作動特性とプラズマ状態を検討した。成膜用 MPD アークジェットの性能特性、プラズマ特性は理工学実験用アークジェットのそれに準ずるものと考えている。過去の理工学実験用、および宇宙推進用 MPD アークジェットの研究開発において、短陰極、および中空陰極を用いた場合、アブレーションカーボン陰極を用

Fig. 7 Typical waveforms of discharge current and discharge voltage of magneto-plasma-dynamic arcjet for ceramic coatings with Ar at 1.37 g/s.

Fig. 8 Photograph of cross section of substrate coated using magneto-plasma-dynamic arcjet for 5 kA with Ar and 1.37 g/s at 100 mm of distance between arcjet exit and substrate.

いた場合の作動特性から類推すると、本研究の成膜用 MPD アークジェットではその放電電圧は上述のように高くなり、ポンピング力が大きくなるのでプラズマ加速性能も若干向上するが、そのプラズマパラメータ特性は大きく変わることはないと推測される¹¹⁻¹³。

5.2 セラミックス皮膜

成膜実験の結果、セラミックカバーの損耗率は 5 kA では 1.1 mg/shot, 10 kA では 7.5 mg/shot であった。放電電流 5 kA, 放電回数 100 回、基板-アークジェット出口間距離 100 mm の場合、Fig. 8 に示すコーティングされた基板断面 (MPD アークジェット中心軸付近) の SEM 写真から膜厚は約 15 μm である。表面近傍の明るい部分は断面切断の際に生じた傾斜によるものである。100 回の作動では生成された膜が非常に薄く、その断面状態は評価し難いが、皮膜の内部には一般的なプラズマ溶射皮膜で観察されるような直径数 μm 級の気孔は特に観察されない。これは通常のプラズマ溶射では溶射材料として粒径 10 ~ 50 μm の粉末を使用するのに対し、成膜用 MPD アークジェットでは陰極先端でアーク加熱されたセラミックス材がより細かい粒塊もしくは蒸気となって基板表面に到達するためと推測される。

MPD アークジェット中心軸上におけるセラミックス皮膜表面のビッカース硬度 (試験荷重は 500 g, 保持時間は 15 sec) の基板温度依存性を Fig. 9 に示す。放電電流は 5 kA, 放電回数は 100 回、基板はアークジェット下流 100 mm の位置に置かれた。この時、膜厚は基板温度にほとんど依存せず、15 μm 程度であった。基板温度 200 ~ 400°C の範囲では温度上昇に伴い皮膜表面中央のビッカース硬度は著しく増大する。温度 400°C では 1200 以上という高い値が得られる。皮膜硬度の半径方向分布より、基板中心付近では高い硬度が得られるが、径方向外側に遠ざかるにつれ硬度は低下し、半径 15 mm で硬度 800 になった。放電電流 10 kA の場合、基板中心の硬度は低下し、 $H_v = 800$ 程度になった。また、皮膜硬度に対する基板の位置依存性として、基板-アークジェット出口間距離 100 mm の時最も硬い膜が得られたが、基板間距離 50, 150

Fig. 9 Vickers hardness vs substrate temperature characteristics of ceramic film coated using magneto-plasma-dynamic arcjet for 5 kA with Ar and 1.37 g/s at 100 mm of distance between arcjet exit and substrate.

mm の場合のビッカース硬度は600~850程度になり大きく減少した。成膜用 MPD アークジェットでは基板を配置しない時、放電電流の増加と共に輝度の高いプラズマブルームが径方向および軸方向に大きく広がり、ノズルより十分下流域においてもプラズマ流の加速が起こると予測される。基板-アークジェット間距離が小さい場合、プラズマ流中のセラミック粒子の加速が十分でなく粒子速度がまだ小さく、また基板間距離が大きい場合、逆にセラミック粒子の速度が大きすぎ粒子が冷却されるものと推測される。また、陰極周りにセラミックス材を配置したので、中心軸上の高密度・高温プラズマ流中のセラミック粒子が特に硬く緻密な膜生成に寄与していることが推定される。こうして、MPD アークジェットの作動条件、および溶射条件を最適化すれば、高速、かつ適度の温度の微小セラミック粒子による硬い膜生成が可能であることがわかった。

コーティング膜と元のセラミックス材断面の XPS スペクトルを Fig. 10 に示す。コーティング条件は Figs. 8, 9 の場合と同じである。100回の作動前後の陰極タングステンの重量を測定した結果、放電電流 5 kA では 1 mg 以下、10 kA では 172 mg の重量減少が観察された。それ故、5 kA の場合は皮膜の XPS スペクトルにタングステン

の存在は確認できなかったが、10 kA の場合大きなタングステンのピークが観察された。こうして、コーティング膜中の不純物(タングステン)量は MPD アークジェットの作動条件に大きく依存することがわかった。放電電流 5 kA の場合、Fig. 10 に示されるように、その膜の Si/Al ピーク比は元のセラミックカパー断面のそれとほぼ等しく、Al と Si の価数も変化していないと推定されるので、セラミックス材の構造的な変化はほとんど無いものと予想される。

6. ま と め

本研究では、まず準定常作動型 MPD アークジェットの材料プロセスへの応用を目指して、その基本作動特性と生成プラズマの状態が調べられた。その結果、MPD アークジェットでは通常の電熱型プラズマトーチに比べて高速・高温・高密度のプラズマを生成することができ、各種プロセスへの利用が期待された。次にセラミックス成膜用の MPD アークジェットが試作され、その作動特性が明らかにされると共に、コーティング皮膜の性質が評価された。その結果、ビッカース硬度 1200 以上をもち、かつ純度の高いセラミックス皮膜が得られることがわかった。

参 考 文 献

- 1) 工藤, 中山: 宇宙における電気推進システムの現状, 電気学会雑誌, 106-1 (1986), 30-36.
- 2) 栗木: MPD アークジェットシステム, 日本航空宇宙学会誌, 33-373 (1985), 89-99.
- 3) 田原, 加賀谷, 吉川: 宇宙推進用電磁プラズマジェットの作動特性, 高温学会誌, 15-4 (1989), 133-142.
- 4) H. Tahara, Y. Kagaya and T. Yoshikawa: Quasisteady Magnetoplasma-dynamic Thruster with Applied Magnetic Fields for Near-Earth Missions, J. Propulsion and Power, 5-6 (1989), 713-717.
- 5) 田原, 加賀谷, 吉川: 準定常 MPD 推進機のアークの構造, 日本航空宇宙学会, 33-382 (1985), 658-666.
- 6) 田原, 榊原, 加賀谷, 吉川: 宇宙推進用準定常電磁プラズマジェットの作動特性と放電機構, 核融合研究, 64-2(1990), 195-211.
- 7) 田原, 滝口, 加賀谷, 吉川: 外部磁場をもつ準定常電磁プラズマジェットの性能特性と放電機構, 高温学会誌, 17-5(1991), 231-243.
- 8) Y. Kagaya, H. Tahara and T. Yoshikawa: Energy Balance and Thruster Performance of a Quasi-Steady MPD Thruster in Continuous Operational Tests, Proc. 17th Int. Symp. Space Technology and Science, 1 (1990) 431-438.
- 9) Y. Kagaya, H. Tahara and T. Yoshikawa: Power Deposition and Thruster Performance of a Quasi-Steady MPD Arcjet, 19th Int. Symp. on Space Technology and Science, Paper No. 94-a-66p (1994), 1-8.
- 10) R.G. Jahn: Physics of Electric Propulsion, McGraw-Hill (1968).
- 11) T. Yoshikawa, Y. Kagaya, Y. Yokoi and H. Tahara: Performance Characteristics of Quasi-Steady MPD Thrusters, Proc. 17th Electric Propulsion Conf., 1 (1984) 396-403.
- 12) Y. Kagaya, Y. Yokoi, H. Tahara and T. Yoshikawa: Thrust Performance and Current Distribution in a Quasi-Steady MPD Arcjet, Proc. 17th Electric Propulsion Conf., 1 (1984) 200-205.
- 13) G. Paccani, and M.F. Rossi: Quasi-Steady Solid Propellant MPD Thruster Diagnostics, 17th Electric Propulsion Conf., Paper No. 84-64 (1984).

Fig. 10 XPS spectra of cross section of raw ceramic material and ceramic film coated using magneto-plasma-dynamic arc-jet for 5 kA with Ar and 1.37 g/s at 100 mm of distance between arcjet exit and substrate. (a) Cross section of raw ceramic material, (b) Coating film.