

16pt 明朝太字

高エネルギープラズマ熱源の開発とその熱加工への応用

12 pt 明朝
行間詰める

チュラロンコン大学、東京大学工学系研究科
大阪大学接合科学研究所

小林 明

Development of High Energy Plasma Heat Sources and Its Application to Thermal Processing

14pt Times Bold

Akira KOBAYASHI^{*,**,***}

*Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, **Univ. of Tokyo, Tokyo, Japan

12 pt Times

***Joining & Welding Research Institute, Osaka University, Osaka, Japan

10.5pt
Times New Roman

行間：最小値・0 pt

Abstract

10.5 pt Times

Material processing using nano-technology is now advancing towards a more precise and controllable smart stage. Regarding thermal processing, the plasma system with high precise, has been proposed for advanced... The gas tunnel type plasma system developed by the author exhibits... and also high efficiency. Among its various applications is the plasma... such as Al₂O₃ and ZrO₂. The characteristics of these ceramic... conventional ones. The ZrO₂/Al₂O₃ composite coating by the gas tunnel... plasma spraying has the possibility for the development of high functionally graded TBC (thermal barrier coating). The corresponding results showed that the alumina/zirconia... mechanical... and oxidation resistant... as the ex... application of gas tunnel... films were formed in a... type plasma reactive spraying.

Within 200words
10pt or 10.5 pt

行間：最小値・0pt
行間詰める

Abstract (10pt or 10.5pt)
Single line Spacing (行間：最小値・0pt でも良い)
200 語以内、Centering

3.0~3.5 cm

Bold

Keywords: Gas tunnel type plasma system, Al₂O₃ and ZrO₂, Thermal barrier coating, TBC, Surface modification.

Half line space

3.0~3.5 cm

About 5 Keywords

1. 緒言

プラズマの応用を旗印に「プラズマの応用科学」が創刊されたのは1993年の12月である。以来、プラズマ応用を共通のターゲットに全国の共同研究者とともに本研究領域の確立と発展のために研究活動を推進してきた。創刊20周年となりこれまでの研究を振り返り概説する。

1980年代はプラズマ発、プラズマ物理の研究の応用については放電が主体であったが、90年代にはPVD, Sputtering, Spray... になってきた。このような時期にあつては、研究の応用分野は広く私自身が手がけたものになる。使用するプラ

究グループを立ち上げ学会活動とともに研究を推進してきた。

著者自身の研究のメインのターゲットは高エネルギープラズマ熱源の開発、プラズマの材料熱加工への応用、効率的エネルギー変換であったが、様々なプラズマ応用と、その関連分野を縫合した

2.0 cm

2.0 cm

Text

2段組 (明朝 10.5pt または、11pt)

本文：44字×40行標準

全体で8p以内

英文の場合：46 lines per page are standard.

Single line Spacing (行間：最小値・0pt でも良い)

Text (number of line: Standard)
Times, 10.5pt
2 columns format
Single line Spacing

ズマも様々なプラズマがあるが、溶接・切断に使用される大気圧プラズマを熱源とするプラズマ加工への応用が研究対象である。大阪大学溶接工学研究所で研究生活に入った 1970 年代はレーザープラズマ、電子ビームプラズマ、マイクロ波プラズマなどの研究開発に携わってきた。その後 80 年代はアークプラズマの研究開発は、トンネル型プラズマの開発を行った。トンネル型プラズマでは大気圧定常の高エネルギー密度ビームの開発を行い、アルゴンプラズマの 33000 度の最高温度を達成した。

このプラズマは、大出力プラズマの適用を行う。プラズマジェットを開発し、それをセラミック溶射膜の開発に適用し、高機能膜の作製について研究成果を挙げてきた。以後その流れを概説する。

図表と本文との間は
1 行以上のスペースをとる。
(1 or 1.5 lines)

行間 : 最小値・0pt
Times New Roman 10pt

図表は紙面の上下隅に配置

Fig.2 Current-Voltage characteristic of Schematic of gas tunnel type plasma jet.

Figure 2 は、ガストンネル型プラズマジェットの電流・電圧特性を示したもので、ガストンネル型流

Fig.1, Fig.2,... are Full spelling when they are at the head of sentence.

2. 実験装置および方法

著者が開発したガストンネル型プラズマジェットの概略図を Fig. 1 に示す。ヴァルテックスチャンバー中で作動ガスは高速の過流となり、低圧力のガストンネルを中心軸に沿って形成する。このことで、プラズマ生成が容易となり、かつ周辺の高圧のガス壁がプラズマを拘束し、安定化する。

Fig.1, Fig.2,...and Table 1, Table 2 are Bold only firstly appeared in the text.

ガストンネル型プラズマジェットを従来型の安定である 1-3)。

また、Table 1 に示すようにトーチ出口中心温度は、15000 K で、 10^5 W/cm^2 80%であり、いずれも従来型よりも 1.5 倍ほど高い値である。詳細は、これまでに発表した論文を参照されたい。

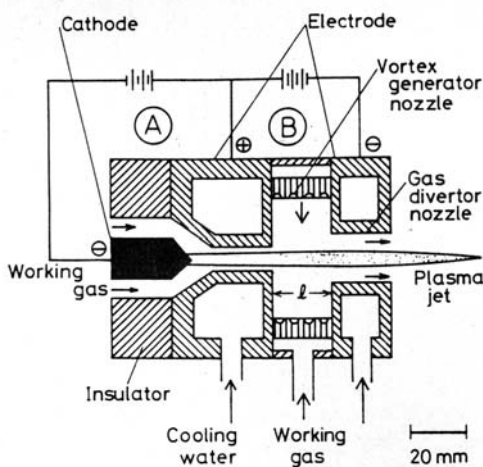


Fig.1 Schematic of the gas tunnel type plasma torch.

Times New Roman 10pt
行間 : 最小値・0pt

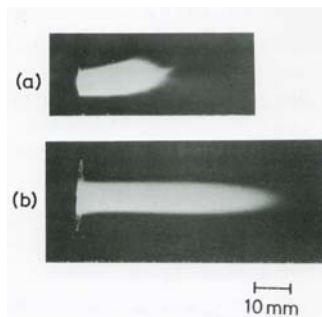


Fig.3 Comparison of the shape of plasma jet (500 A).
(a) conventional type plasma jet
(b) gas tunnel type plasma jet (long, stable)

Table 1 Comparison between gas tunnel type plasma jet and conventional ones.

| | Gas tunnel type plasma jet | Conventional ones |
|-----------------|----------------------------|-----------------------|
| Temperature | 15000 K | 10000 K |
| Energy density | 10^5 W/cm^2 | 10^4 W/cm^2 |
| Heat efficiency | 80% | 50% |

この開発した高出力のガストネル型プラズマジェットは、高エネルギー密度、高熱効率であり¹⁻³⁾、プラズマ溶射、表面改質など材料熱加工などへの適応性が高く、多くの工業応用可能性を持っている。その応用例としては、

- 1) セラミックス プラズマ溶射(Al_2O_3 and ZrO_2 etc.)
- 2) チタン材料の表面改質(Nitridation)
- 3) ナノ材料、機能材料プロセス技術
- 4) 環境問題へのプラズマ応用 などがある。

3. ガストネル型溶射の特徴

ここでは、従来研究に取り組んできたガストネル型プラズマジェットの熱加工、特に熱溶射への適用について述べ

ガストネル型

Fig. 4 に示している

かれた基板上に形成

ズル径 (ガスダイバ

である。このガスト

ラミックスの溶射実

での論文中に述べて

セラミックスと

が、用いられてきた

材料の溶射に威力を

による、セラミック

のはがれなど問題点

のプラズマジェット

高温を特徴とするガ

の問題を解決し、高

る。

たとえば、ガス

ック皮膜は従来型よ

非常に緻密である。

である。

このことは、以下のガストネル型プラズマ溶射装置の特徴に起因する。溶射用材料はプラズマガンの中心電極の穴からプラズマ中に軸方向に供給される。このため、溶射パウダーは効果的

本論分の場合

図面 6 個以上

Discussion あり、

長さ 6 p 以上が基準となります。

Fig.4 Schematic of the gas tunnel type plasma spraying torch. *L*: Spraying distance.

Text (10.5pt)

Single line Spacing (行間: 最小値・0pt でも良い)

○ 解説・研究論文、研究ノート

1. 序論 (はじめに) (0.5-1 ページ程度)

2. 実験方法 (1 ページ程度)

3. 実験結果及び考察

4. 結論 (まとめ) など項目を区切る。

○ 研究論文、研究ノートは、オリジナルであること。未発表のものに限る。

○ 英文 Abstract (100-150words)、Keywords (5 個程度) をつける。

○ 研究論文は、十分な結果考察 (6 以上の図表を基準) を含む 6 ページ以上の原稿とし、不鮮明な図表は受け付けない。

○ 図表は、Fig.1、Table 1、とし、中身、説明は英文 (10pt Times) とする。

○ 参考文献 (References) 15 個程度以上は全て英文で表記してください。

s tunnel type plasma spraying in the of Al_2O_3 powder. Spraying distance: *L*

点セラミックスの溶射が可能と

射中の溶射皮膜形成を Fig.5 の

。これは、 Al_2O_3 パウダーの付

であり、中心軸上の溶射粒子が

いることがわかる。

考察

の性質

プラズマ溶射は、従来の溶射皮

質セラミックス溶射膜の作製を

Fig. 6 は、ガストネル型溶射に

と従来型 Al_2O_3 coating の断面

とガストネル型は従来型と比較して

Al_2O_3 coating 断面の顕微鏡写真である。ガストネル型皮膜の断面は非常に緻密であることがわかる。

Table 2 は、ガストネル型溶射によるアルミ

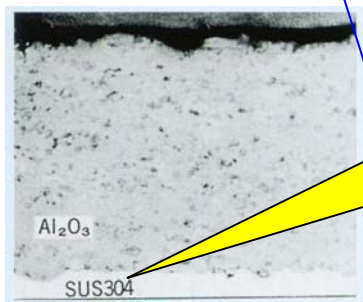
ナ皮膜と従来型 Al₂O₃ coating の特性 (hardness, porosity, etc.) の比較である¹¹⁻¹³。ガストンネル型溶射によるアルミナ皮膜は従来型より 30-50%高い硬度を示し、非常に緻密である。気孔も従来の溶射皮膜の半分である⁵。^{5, 11-14}

このアルミナ皮膜のビッカース硬さは、焼成アルミナと同様の値: Hv=1,200 であり、高密度である。気孔は従来型皮膜の半分の値である。ガストンネル型溶射では、作動ガスにアルゴンのみを用いた 20 kW の低入力でも Hv=800 の高ビッカース硬度が得られる。

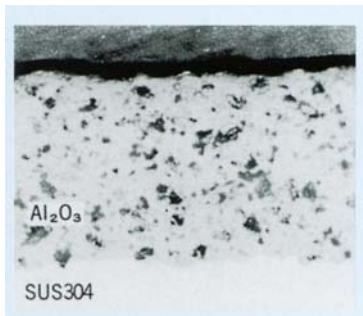
また、ガストンネル型溶射により、ジルコニア、チタニアなどセラミックス膜についても従来の品質 (硬度、気孔、緻密) を上回る皮膜が得られている⁵。

4.2 熱遮蔽膜 TBC への適用

ジルコニア(ZrO₂)膜は、気孔が多く、低熱伝導性のため、ガスタービン、バーナー部品など高温部分で使用される材料に対して熱遮蔽膜 TBC として使用されているが、現状ではクラック、高温酸化⁹、高温腐食によるはがれ wear resistance¹⁰などの問題点が克服されていない。そこで、ガストンネル型溶射による高性能 TBC の研究開発を行ってきた。



(a) gas tunnel type plasma spraying



(b) conventional type.

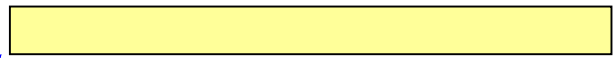
英文使用のこと。図中の文字ははっきり見える大きさに！
10pt 程度が良い(大きすぎないように)
図表の幅は段の幅に収める。

Proper spacing

の Vickers hardness は溶射し、At L=30 mm, when P=33 m の短距離で the Vickers was about Hv=1200¹⁵、これは

は焼結体の ZrO₂ (Hv=1,300)の硬さに匹敵する。ZrO₂ coating は表面側が硬く、硬さの傾斜機能性¹⁶⁻¹⁸を持つ。このような傾斜機能化により、界面の緻密化、および、高硬化に伴うクラックの防止が可能となる。

アルミナ混合によるジルコニア TBC の性質を改良するのにアルミナは有効な添加成分のひとつである。アルミナは低融点ではあるが高硬度であるからである。



Illustrations should preferably be mounted in the text, with successive numbers and captions. Please take into account that too small symbols, fragments, inscriptions will be indistinguishable.

Figure captions and table captions should be typed 10point size.

Fig.6 Comparison between gas tunnel type plasma spraying and conventional type for Al₂O₃ coating. (Input =45 kW、Distance = 65-100 mm)



Table 2 Comparison between gas tunnel type plasma spraying and conventional type for Al₂O₃ coating. (Input =45 kW、Distance = 65-100 mm)

| | Gas tunnel type plasma spraying | Conventional ones |
|------------------|---------------------------------|-------------------|
| Vickers hardness | 1200 | 800 |
| Porosity | 10% | 20% |

Al₂O₃ ZrO₂ mixing ratio (wt%) ZrO₂

Fig.7 Dependence of Vickers hardness and porosity of zirconia composite coating on the alumina mixing rate. L=40 mm when P=25 kW.

Figure 7 は、 ZrO_2 混合比に対する $Al_2O_3 + ZrO_2$ 複合膜 のビッカース硬度と 気孔率の特性を示している。この場合、 $P=25\text{ kW}$, $L=40\text{ mm}$ で皮膜厚さは約 $200\text{ }\mu\text{m}$ の複合膜を作製したものである。(トラバース 2 回) ZrO_2 複合膜のビッカース硬度は Al_2O_3 の比率が大きいほど大きく、 Al_2O_3 膜の硬度 $Hv_{50}=1440$ に近づく。これと反対に、気効率は ZrO_2 混合比 $R(\text{wt}\%)$ が大きいほど大きくなり、 ZrO_2 膜では 30% となる。

このように、アルミナを混合することによってより ZrO_2 複合膜の構造・機能を制御することができ、高硬度で緻密な膜を作製することができる。

4.3 傾斜機能複合皮膜の作製

アルミナ、ジルコニア膜について傾斜機能膜が作製できることがわかっているが、ジルコニア複合膜では、アルミナ混合比を調整することによって

より傾斜機能膜が作製される。
Figures and Tables should be located at the upper and bottom corners in each page before CONCLUSION.

多数回の高速トラバースによって複合膜を形成すると¹⁸⁾ 表面温度が一様化され組織が制御された傾斜機能膜(表面が緻密で基板側が粗)が作製される。

Figure 8 は高速トラバースで作製されたアルミナ混合膜 ($50\%Al_2O_3/50\%ZrO_2$ composite coating) の断面の一例である。高速トラバース 30 回で $P=25\text{ kW}$, $L=40\text{ mm}$ で作製されたものである。トラバース速度は 1000 cm/min で従来 in Fig.4 より 10 倍の高速である。膜厚 $150\text{ }\mu\text{m}$ の断面組織は、表面が緻密で気孔が少なく、基板側が粗で気孔が多い従来の皮膜と同様であることが容易に観察される。

この膜は white and gray の異なる 2 層からできており、交互に積層して皮膜を形成している。EPMA の分析により、white is zirconia (ZrO_2) and gray is alumina (Al_2O_3) であることがわかっている。なお、写真で黒い部分は気孔である。

Figure 9 はこの Al_2O_3/ZrO_2 複合皮膜の Vickers hardness Hv_{50} の断面方向の分布を示したものであ

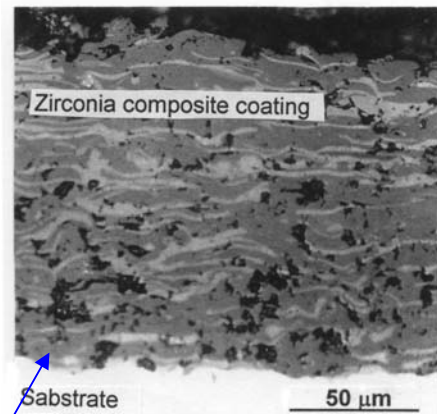


Fig.8 Comparison between gas tunnel type plasma spraying and conventional type for Al_2O_3 coating. (Input = 45 kW , Distance = $65\text{--}100\text{ mm}$)

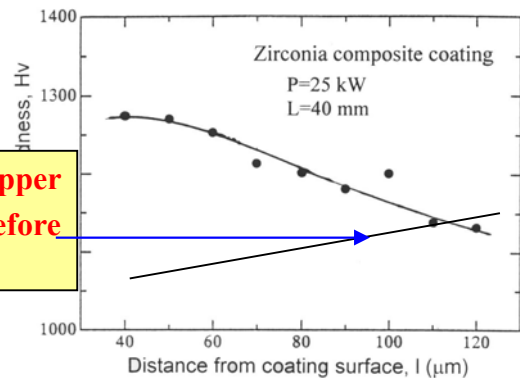


Figure 9 shows the distribution of Vickers hardness: Hv_{50} of the zirconia/alumina composite coating shown in Fig.8 (coating thickness: about $150\text{ }\mu\text{m}$).

る。左の縦軸が表面側で、ビッカース硬度は表面から $l=40\text{ }\mu\text{m}$ の位置が最高硬度で $Hv_{50} = 1300$ であり、基板方向に向かって直線的な傾斜勾配である。緻密な構造の皮膜表面近くは硬度が高く傾斜機能膜が作製される。

TBC の基板側では、気孔が多く (up to $25\text{ vol}\%$) 高融点の ZrO_2 coatings の利点が生かされている。

表面側は、腐食環境に耐えるため、気孔率が低く高密度のなっており、アルミナを添加した効果が現れている。

以上のように、多数回・高速トラバースで複合膜を形成すると¹⁸⁾ 表面温度が一様化され組織が制御された傾斜機能膜(表面が緻密で基板側が粗)が作製される。組織が一様化し、気孔のばらつきが改善される。硬さ分布も滑らかになり、傾

斜機能性もよくなる。高性能 TBC の開発に寄与する。

5. 結論

ガストンネル型プラズマは、高エネルギー密度で高熱効率を特徴とし、様々な熱加工の課題解決に有効である。典型的な適用はプラズマ溶射であり、従来のものより高機能の Al₂O₃ や ZrO₂ コーティングが作製される。

(1) ZrO₂ 複合皮膜は、傾斜機能を持ち熱遮蔽膜

TBC (傾斜機能) の適用が期待される。

結果をまとめて書くこと
箇条書きがわかりやすい。
(1)…(2)…

その、アパタイトの抑制されたユニークな結果が得られた。

(2)ガストンネル型プラズマによる金属の表面改質

では、TiN 薄膜が短時間の 5s で得られている。

以上の研究をもとに、新しいタイプの高効率小型プラズマの開発、そのほか環境・エネルギー分野などあたらしい分野への展開が構想されている。

← Single line space

謝辞

本研究成果をまとめるに際して、これまでの研究において協力していただいた多くの共同研究者、学生諸君にたいして、ここに謝意を表す。

← Single line space

References

- 1) Y. Arata, and A. Kobayashi, *J. High Temp. Soc.* **11-3**, 1984, pp.124-131
- 2) Y. Arata, and A. Kobayashi, *J. A. P.*, **59-9**, 1986, pp.3038-3044
- 3) Y. Arata, and A. Kobayashi, *J. J. A. P.*, **25-11**, 1986, pp.1697-1701 (1986)

- 4) Y. Arata, A. Kobayashi, Y. Habara and S. Jing; Gas Tunnel Type Plasma Spraying, *Trans. of JWRI*, Vol.15-2, 1986, pp227-231.
- 5) Y. Arata, A. Kobayashi, and Y. Habara: Ceramic coatings produced by means of a gas tunnel type plasma jet, *J. Applied Physics*, **62**, 1987, pp.4884-4889.
- 6) R. Vassen, G. Kerkhoff, and D. Stoever, Development of a micromechanical life prediction model for plasma sprayed thermal barrier coatings. *Mater. Sci. Eng.*, A303, 2001, p. 100-109
- 7) D.N. Assanis; *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. **4** (1989), p. 232.
- 8) T. M. Yonushonis; *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. **6**(1) (1997), p. 50.
- 9) P. Ramaswamy, S. Seetharamu, K.B.R.Varma, and K.J. Rao, Thermal shock characteristics of plasma sprayed mullite coatings, *J. Therm. Spray Technol.*, 7(4), 1999, p. 497-505
- 10) T. Araya; *J. Weld. Soc. Jpn.*, Vol.57-4, 1988, pp.216-222.
- 11) Y. Arata, A. Kobayashi, and S. Habara: Relation of Alumina Coating Quality in Plasma Spraying (in Japanese), *J. Weld. Soc. Jpn.*, 57(4), 1988, pp.116-124.
- 12) A. Kobayashi, S. Habara, and Y. Arata; Relation between Plasma Spraying Parameters and Coating Quality in Plasma Spraying (in Japanese), *J. Weld. Soc. Jpn.*, 57(4), 1988, pp.116-124.
- 13) A. Kobayashi; Property of Alumina Coating Sprayed with a Gas Tunnel Plasma Spraying, *Proc. of ITSC*, 1992, pp.57-62.
- 14) A. Kobayashi; Characteristics of High Hardness Alumina Coating Sprayed with a Gas Tunnel Plasma Spraying, *Proc. of ITSC*, 1992, pp.57-62.

References: in English
For Japanese paper,
add (in Japanese)
10.5, 10pt or 9pt Times
行間 (最小値、0pt)

References (Bold): Centering (More than 15)

Times or Times New Roman 10.5-10, 9pt.

Describing title of paper is preferable for each reference.

In case of Japanese, note (in Japanese)

Journal name should be Italic.

Volume number of the reference journal should be bold.

左右の最下段の行を大体あわせる。