

## 同軸プラズマ堆積法におけるプラズマ微粒子に働く電磁加速力について Acceleration force of plasma particles on a coaxial plasma deposition method

○山田 雄大<sup>1</sup>, 西田 昌平<sup>1</sup>, 八重樫 哉雅<sup>2</sup>, 橋口 舞<sup>2</sup>, 胡桃 聡<sup>3</sup>, 松田 健一<sup>3</sup>  
鈴木 薫<sup>3</sup>, 小林 大地<sup>4</sup>, 関口 純一<sup>5</sup>, 浅井 朋彦<sup>5</sup>

\*Katsuhiro Yamada<sup>1</sup>, Syouhei Nishida<sup>1</sup>, Saiga Yaegashi<sup>2</sup>, Mai Hashiguchi<sup>2</sup>, Satoshi Kurumi<sup>3</sup>, Ken-ichi Matsuda<sup>3</sup>  
Kaoru Suzuki<sup>3</sup>, Daichi Kobayashi<sup>4</sup>, Jun-ichi Sekiguchi<sup>5</sup>, Tomohiko Asai<sup>5</sup>

Abstract: In this study, we have developed a deposition apparatus utilizing coaxial-plasma gun (CPG) for generating plasmas particle of metallic materials. Argon gas was introduced into the chamber. A pulsed-current generator provided repeatedly pulses of large discharge current between electrodes. Maximum discharge current is 34.2 kA ( $V_c = 2.5$  kV). Its pulse width of first half-wave was 42  $\mu$ s. Acceleration force on plasma particles was estimated to be 52.7N.

### 1. はじめに

廃熱等を電気に変換する熱電変換材料の一つとして、 $Fe_2TiAl$  系フルホイスラー合金が注目されている<sup>[1]</sup>。 $Fe_2TiAl$  は有害元素を含まず、理論的に高い性能を有すると考えられている。しかし、各元素配合量の僅かな変化がゼーベック係数の大きさや符号に影響することが分かっており、制御の困難さが、応用上の期待を低下させている。そこで我々は同軸プラズマガン (Coaxial Plasma Gun, CPG) <sup>[2][3]</sup>を用いた堆積法である、同軸プラズマ堆積法 (Coaxial Plasma Deposition, CPD) に着目した。この手法は融点の異なる複数の金属を合金化し、組成比を容易に制御できることが期待されている。本稿では CPG により Al 微粒子を放出させた時の基礎特性として CPG 電極間放電電圧、電流、プラズマ電磁加速力を評価した結果を報告する。

### 2. 実験・評価方法

#### (1) 放電電圧・電流の測定

Fig. 1 に CPG を用いた堆積法の概略図を示す。Fig. 2 にパルス放電回路図を示す。CPG の電極は中心電極と同心円筒状の外部電極で構成され、これらの電極へターゲットとして Al を設置した。ターゲットの外寸は中心電極側の外径の長さ  $\Phi 22 \times 80$  mm, 外部電極側の内径の長さ  $\Phi 34 \times 20$  mm である。チャンバー内の気圧を  $7 \times 10^{-3}$  Pa まで排気した後、動作ガスとして Ar ガスを流入することにより 0.8 Pa に調整した。パルス放電回路ではコンデンサが  $V_c = 2.5, 2.8, 3.0$  kV まで充電された後、イグナイトロンスイッチの始動により充電電圧  $V_c$  が CPG 電極間に印加された。すると CPG 電極間に絶縁破壊が生じ、電極に設置された Al ターゲットがスパッタされ、プラズマ微粒子が生成される。その際、

電極間に流れる放電電流  $I$  とこれによって生じた磁場  $B$  によるローレンツ力 ( $F = I \times B$ ) が働き、発生したプラズマ微粒子は水平軸方向に電磁加速され放出される。このときの CPG 電極間電圧は分圧器 (Pintek 社製, HVP39pro) とオシロスコープ (Tektronix, TDS1012B)、電流はカレントモニター (Pearson, 4418) を用いて測定した。測定は各  $V_c$  において 10 回ずつ行った。

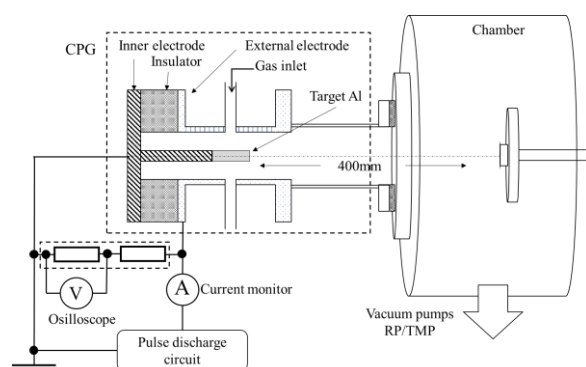


Fig. 1. Experimental apparatus of the CPG deposition system.

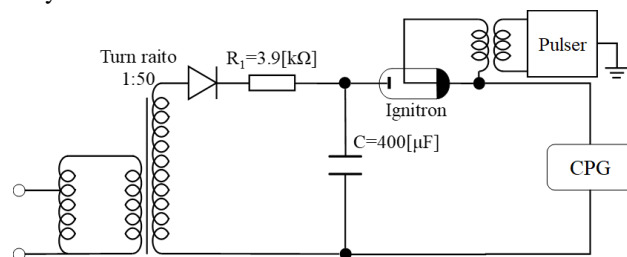


Fig. 2. Schematic diagram of the pulsed-discharge circuit for CPG.

#### (2) プラズマ電磁加速力の評価<sup>[4]</sup>

Fig. 3 にプラズマ電磁加速理論の概要図を示す。同軸電極において発生する全電磁力  $F_{th}$  は  $\mu_0$  を真空中の透

1 : 日大理工・学部・電気 2 : 日大理工・院 (前)・電気 3 : 日大理工・教員・電気 4 : 日大理工・院 (前)・物理  
5 : 日大理工・教員・物理

磁率,  $I$  を放電電流,  $r_o, r_i$  をそれぞれ外部電極, 内部電極の半径,  $\alpha$  を推進係数とすると次式で求められる.

$$F_{th} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \ln\left(\frac{r_o}{r_i} + \alpha\right) \cdot I^2 \quad (1)$$

全電流成分が内部電極側面円筒部に流れる場合, 電磁力はブローイング成分のみとなるので,  $\alpha = 0$  とみなせる. この式を用いて, 各  $V_c$  におけるプラズマ電磁加速力を算出した.

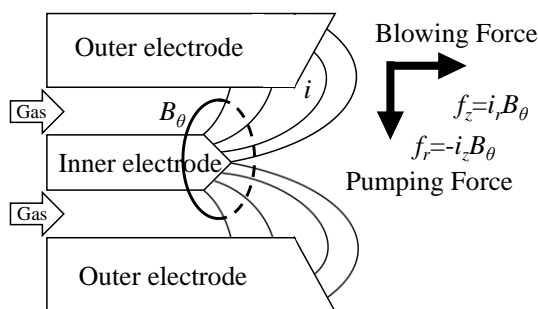


Fig. 3. Acceleration mechanism in CPG.

### 3. 実験結果

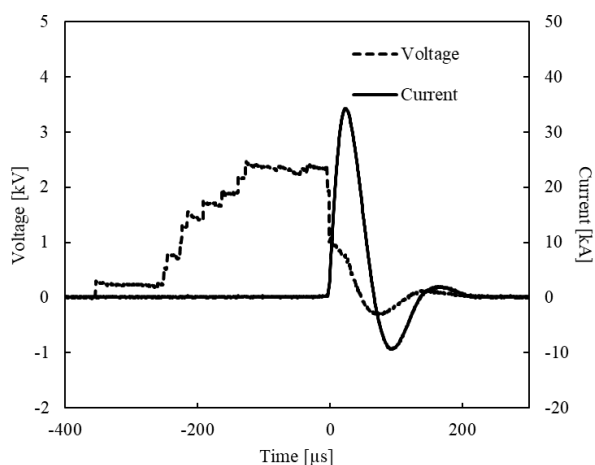


Fig. 4. Waveforms of discharge voltage and current between electrodes of the CPG ( $V_c = 2.5$  kV).

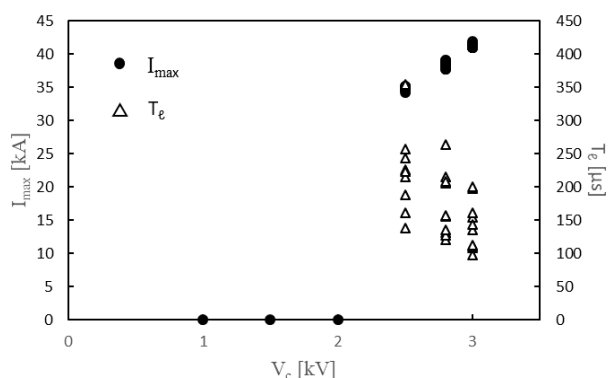


Fig. 5. Maximum discharge current:  $I_{max}$  and time lag:  $T_l$  vs charged voltage of the capacitor property.

Fig. 4 に  $V_c = 2.5$  kV のときの CPG 電極間放電電圧および電流波形の関係を示す. 電極間に電圧を印加するとその最大値は 2.41 kV となる. その後電圧が急激に降り放電電流が流れ始める. 放電波形の最大値  $I_{max}$  は 34.2 kA, 半値幅は 42  $\mu$ s となる. 火花遅れ  $T_l$  は 353  $\mu$ s となる.

Fig. 5 に  $V_c = 2.5, 2.8, 3.0$  kV における電流の最大値と火花遅れ  $T_l$  のばらつきについて示す.  $V_c = 1.0, 1.5, 2.0$  kV のとき, 放電が起こらず電流値は 0 となる.  $V_c = 2.5$  kV のとき, 電流値と火花遅れともにばらつきは大きい,  $V_c = 3.0$  kV ではばらつきが小さくなっている. 電流値のばらつきはプラズマ電磁加速力に影響を及ぼす.

以上の結果より各  $V_c$  におけるプラズマ電磁加速力を算出した. 電流値の平均値はそれぞれ 34.8, 38.4, 41.3 kA となるので, プラズマ電磁加速力  $F_{th}$  はそれぞれ 52.7, 64.2, 74.3 N と算出された.

### 4. まとめ

ホイスラー合金生成の為, CPG による Al の堆積について検討した.  $V_c = 2.5$  kV のとき電極間放電電圧の最大値 2.41 kV, 放電電流の最大値は 34.2 kA, 半値幅は 42  $\mu$ s となることが確認された. 充電電圧  $V_c$  が大きいほど電流の最大値のばらつきが小さくなることがわかった.  $V_c = 2.5, 2.8, 3.0$  kV におけるプラズマ電磁加速力  $F_{th}$  はそれぞれ 52.7, 64.2, 74.3 N と算出された.

### 5. 参考文献

- [1] Y. Nishino et. al.: "Effect of off-stoichiometry on the transport properties of the Heusler-type  $Fe_2VAl$  compound", Phys. Rev. B, Vol. 63, p. 233303, 2001.
- [2] M. Takatsu et. al.: "Application of Coaxial Ion Gun for Film Generation and Ion Implantation", JPS Conf. Proc., Vol.1, p. 01586-1, 2014.
- [3] S. Woodruff: "New Mode of Operating a Magnetized Coaxial Plasma Gun for Injecting Magnetic Helicity into a Spheromak", Phys. Rev. Lett., Vol.90, No.9, p. 095001, 2003.
- [4] 田原弘一他: 「電磁加速プラズマを用いた窒化珪素の高速成膜」, 高温学会誌, 第 31 巻, 第一号, pp76-80, 2005.