

## 減圧線爆溶射の開発研究

福田, 重久  
九州大学応用力学研究所 : 助手

松原, 監壮  
九大応用力学研究所

<https://doi.org/10.15017/4743962>

---

出版情報 : 應用力學研究所所報. 74, pp.227-235, 1992-10. 九州大学応用力学研究所  
バージョン :  
権利関係 :



## 減圧線爆溶射の開発研究

福田 重久\* 松原 監壮†

### 概 要

金属またはサーメット類の、優れた溶射皮膜を形成する目的で減圧線爆溶射の開発研究を行った。

減圧（空気）雰囲気中での系統的な線爆実験の結果、減圧線爆溶射における溶射線材の最適断面積（ $S_0$ ）と、最適な溶射距離（ $R_0$ ）を与える式は、それぞれ

$$S_0 = K_1 \{1 + k[(P_0/P) - 1]^p\}^{-1} CV f^a,$$

$$R_0 = K_3 (P_0/P)^v r_w,$$

である。これにより安定した減圧線爆溶射が実施可能となった。

減圧線爆溶射皮膜では、大気中溶射皮膜に比し、酸化や気孔が少なく組織が緻密であること、基材との付着力が大きいことなど、大幅な改善効果が確認された。

**Key words :** low pressure wire explosion spray coating, optimum spray condition, discharged energy, oxidation, porosity, adhesive strength.

### 1. 緒 言

線爆溶射（本研究所開発）は、通常大気中で施工される。したがって、線爆の際に、衝撃音、閃光、金属ガスおよび金属の粉塵を放出する。一方、減圧法ではこれらの問題の防止が可能である。この減圧線爆溶射法は、線爆溶射法<sup>1)2)</sup>の開発当初（1966）から試みられたが実施困難であった。その主な理由は、線材の爆発に高電圧の放電電流を利用するため、減圧気体中へのバイパス（気体）放電が併発し、溶射条件を定め難くしていることによる。しかし、減圧プラズマ溶射や減圧レーザー溶射と同様な、減圧による溶射皮膜の改善効果が一部確認されている<sup>3)4)5)</sup>。

本研究では、大気圧中から減圧域まで適用可能な最適線爆溶射条件を求めるため、従来の大気中線爆溶射条件に基づき、減圧下での最適放電エネルギーおよび最適溶射距離についての検討と、数多くの系統的な実験をおこなった。併せて、減圧線爆溶射皮膜の特徴ある性質を評価した。

\*九州大学助手，応用力学研究所

†文部技官，九州大学応用力学研究所

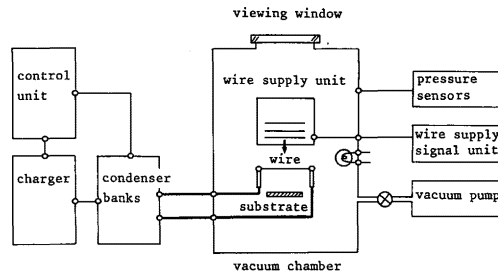


Fig. 1 Schematic diagram of low pressure wire explosion spraying (LPWES) apparatus.

## 2. 実験方法

### 2.1 減圧線爆溶射装置

減圧線爆溶射装置用の鋼製容器は、内容積約 $0.23\text{m}^3$  ( $\phi 600 \times 800\text{mm}$ ) のプラズマ加速および線爆発用の耐圧容器 (1966製造の熱衝撃試験機) であり, Fig. 1 に示す容器内に溶射電極, 基材支持台, 半自動型の溶射線材供給装置, 照明具, 制御用端子および $\phi 40\text{mm}$  放電用同軸ケーブル2本を備えている。また, 同容器には, 上部に $\phi 200\text{mm}$ , 両端部に $50 \times 250\text{mm}$  ののぞき窓, 圧力計, 排気速度 $6\text{l/s}$  のロータリーポンプおよびコンデンサ ( $40\mu\text{F}$ , または $80\mu\text{F}$ ) が同軸ケーブルに接続されて装置を構成する。

### 2.2 減圧線爆溶射条件の検討とその実験条件

従来の線爆溶射条件は, 大気中の場合についてであり, 雰囲気の影響がないものとしている。しかし, 減圧の場合は, このことを無視することができない。

すなわち, a) 気体中にある溶射線材を, コンデンサ放電の衝撃大電流により線爆する場合の全放電エネルギー ( $e$ ) は, 線爆エネルギー ( $e_w$ ), 雰囲気中への気体放電エネルギー ( $e_g$ ) および放電回路中の損失エネルギー ( $e_l$ ) からなる。ただし,  $e_l$  は一般的に無視できる。また,  $e_w$  は線材の材質, 寸法, 形状により,  $e_g$  は雰囲気の種類, 気圧 ( $P$ ) および  $e_w$  に関係してきまる。そこで, これらの関係を明らかにするため, 線爆溶射実験を以下の条件と線材によりおこなった。まず, 気体は空気に限定し,  $P$  簡囲を $7 \sim 101\text{kPa}$  とした。線材には, Ni ( $\phi 0.5 \times 60\text{mm}$ ), 高炭素鋼 (PC:  $\phi 0.5 \times 60\text{mm}$ ), Ti, Mo, W, SUS-304, WC-Co ( $\phi 1.0 \times 50\text{mm}$ ), TiC ( $1 \times 1 \times 50\text{mm}$ ) を用いた。また,  $\phi 0.5$  の Ni と PC はコンデンサ容量を $40\mu\text{F}$ , それ以外は $80\mu\text{F}$  とした。そして, 各線材について, 減圧中の最良な溶射皮膜 (1回の線爆で形成されま皮膜が, 基材面を完全に, しかも均質に被覆し, その表面粗さが数 $\mu\text{m}$  以下) が得られる最適放電条件を求め, 気体放電現象を考慮しながら整理した。つぎに, 従来の大気中線爆溶射で線材の最適断面積 ( $S_0$ ) を与える式<sup>2)</sup>,

$$S_0 = K_1 C V f^a \quad (1)$$

( $C$ : コンデンサ容量,  $V$ : 充電電圧,  $f$ : 回路の固有振動数,  $a$ : 実験定数) の材料定数  $K_1$  に気体の圧力  $P$  を導入した。

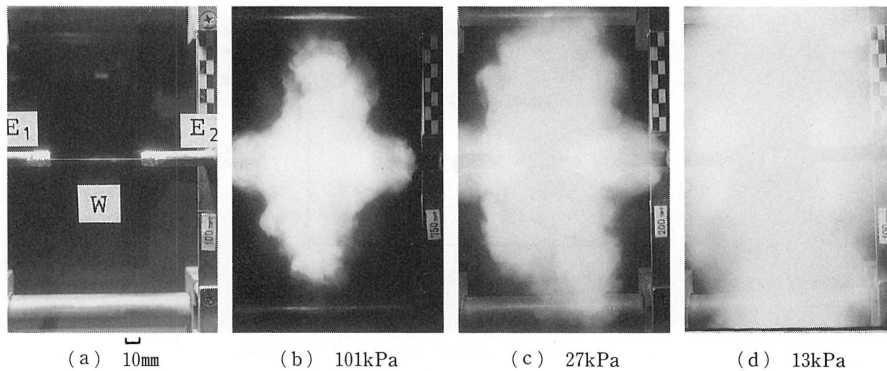


Fig. 2 Photographs of exploded gas from piano wires  
(W : 0.4mm in diameter, E<sub>1,2</sub> : electrodes) at air pressure.

b) 減圧下での線爆では、気体放電が基材に達することがある。したがって、従来の最適線爆溶射距離 ( $R_0$ ) を示す式<sup>2)</sup>,

$$R_0 = K_3 r_w \quad (2)$$

( $K_3 \approx 35$ ,  $r_w$  : 線材の半径) が成立しなくなる。そこで、線爆発ガスの膨張におよぼす気圧  $P$  の影響をみるため、Fig. 2 に示すような爆発の瞬間写真を取り、爆発ガスの膨張距離 ( $R_g$ ) と  $P$  の関係を求め、それにより  $K_3$  を補正した。

c) 最適な線長を与える式<sup>2)</sup>,  $l_0 = K_2 V f^{-a}$  は、 $P$  に無関係であるから従来どおりである。

### 2.3 溶射皮膜の形成と性状の評価方法

溶射皮膜試片は、厚さ1mmの SUS-304, 70Cu-30Zn 合金および軟鋼の三種類の基材 (表面を #800 研磨紙にて表面処理) 上に Ti, Mo, W, PC, WC-Co および TiC 線材 ( $\phi 1.0 \times 50\text{mm}$ ) を、気圧  $P$  : 13, 27, 53, 77, 89 および 101kPa 中で、各々 6 回線爆溶射し、厚さ約  $30\mu\text{m}$  の皮膜を形成したものである。

皮膜の性状の評価は、表面粗さの測定、SEM により組織検査と観察、気孔率測定および EPMA による線分析でおこなった。また、機械的性質については、マイクロビッカース硬さおよび PC/Cu 試片の皮膜の張り付き強さを測定した。この付着試験片の構成は、一対の  $\phi 3$  銅 (Cu) 棒の各端面に形成された PC 皮膜面同志をアララダイト AT-1 接着剤で突き合わせ接合 ( $150^\circ\text{C}$ , 5h 処理) したものである。ここで、Cu 材を基材に選定した理由は、この基材上の皮膜の付着強さが比較的弱く、接着剤法でも剝離試験が可能であることによる。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 最適溶射条件

気圧 7~101kPa 範囲での線爆溶射について、最適放電エネルギーおよび最適溶射距離を求めるための

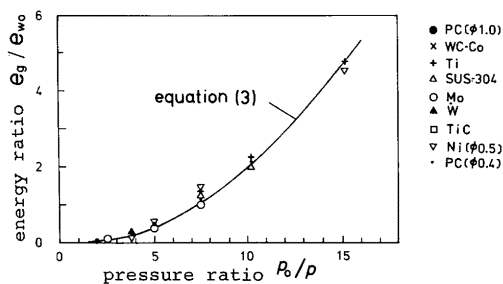


Fig. 3 Effect of air pressure on wire explosion energy.

$e_g$  : energy in gas at pressure  $P$  condition,

$e_{w0}$  : energy at 101 kPa,

$P$  : air pressure,

$P_0$  : 101 kPa.

系統的な実験で、つぎの結果が得られた。

a) Fig. 3 は線爆に伴う気体中放電エネルギー  $e_g$  と気体圧力  $P$  の関係を示す実験結果(プロット)である。電極間空隙の気体放電の形式<sup>9)</sup>と同様に、 $e_g \simeq k[(P_0/P)-1]^\beta$ 、( $k, \beta, P_0$  はそれぞれ気体定数、実験定数および気体圧力101kPa)で示される。また、 $e_g$  と101kPaでの最適放電エネルギー  $e_{w0}$  の関係は、 $e_g \propto e_{w0}$  である。したがって、 $e_g \simeq k \cdot e_{w0}[(P_0/P)-1]^\beta$ 、または、

$$e_g/e_{w0} \simeq k[(P_0/P)-1]^\beta \quad (3)$$

ここで、実験で求めた気体定数  $k$  は空気の場合0.024、実験定数  $\beta$  は  $P_7 \sim 101$  kPa 範囲で約2である。Fig. 3の曲線は、(3)式の計算結果であり、線材の材質、寸法、コンデンサ容量が異なっても、(3)式、つまり  $P$  で整理できることを示す。以上により、(1)式の  $K_1$  を(3)式で補正すると、

$$S_0 = K_1' C V f^a \quad (1, 2)$$

$$K_1' = K_1 \{1 + k[(P_0/P)-1]^\beta\}^{-1}$$

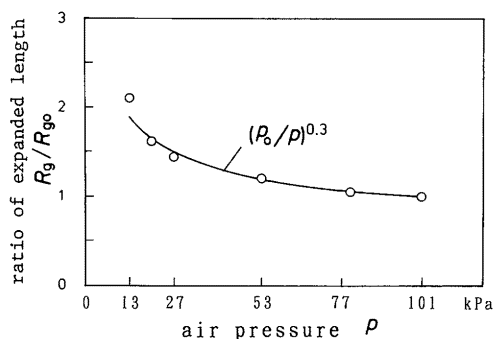


Fig. 4 Effect of air pressure on expanded length  $R_g$  of exploded gas versus pressure.

$R_{g0}$  :  $R_g$  at 101 kPa.

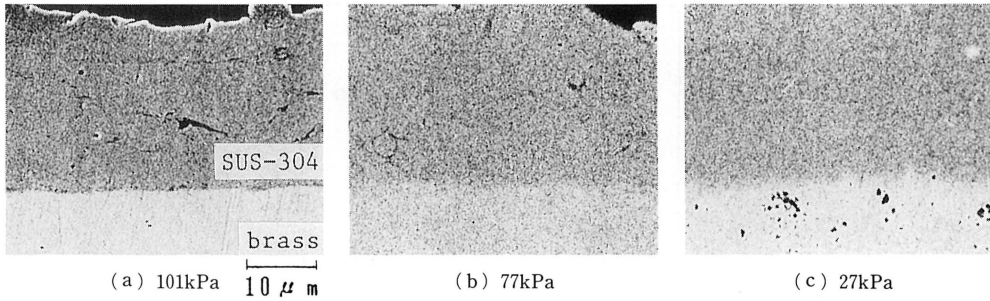


Fig. 5 Microstructure of cross sections of SUS-304 coatings on brass substrate.

b) 最適溶射距離  $R_0$  と気体圧力  $P$  の関係は、爆発ガスの膨張距離比  $R_g/R_{g0}$ , ( $R_{g0}$ : 101kPa での距離) と  $P$  との関係 (Fig. 4) に相似するとして, (2)式の  $K_3$  を補正すると,

$$R_0 = K'_3 r_w \quad (2.2)$$

$$K'_3 = K_3 (P_0/P)^\nu, \text{ (実験定数 } \nu \text{ は } 0.3 \text{).}$$

## 3.2 溶射皮膜の性質

### 3.2.1 皮膜の性状

各気圧における線爆溶射皮膜の組織例として, SUS-304皮膜断面の SEM 像を Fig. 5 に示す. 各皮膜の気孔率は気孔率の比を Fig. 6 で示すように, 減圧するほど少なくなる傾向にある. ただし, 77kPa 中で形成した PC, WC-Co, Ti 皮膜中では, 20~30μm の粗い組織が見られる. この様な異状は後述する

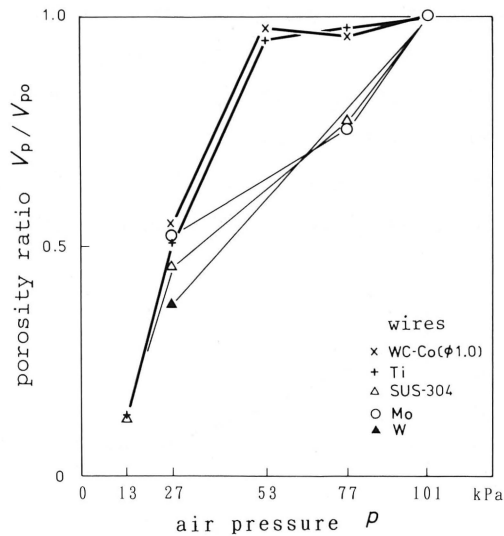


Fig. 6 Effect of air pressure on porosity  $V_p$  in coatings.  
 $V_{p0}$ :  $V_p$  at 101 kPa.

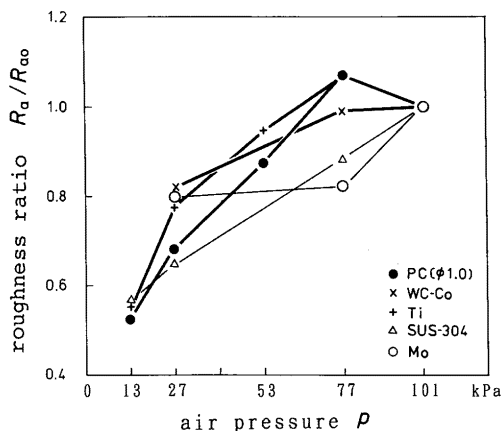


Fig. 7 Effect of air pressure on average roughness  $R_a$  in coatings.  
 $R_{a0}$ :  $R_a$  at 101 kPa.

皮膜の酸素量や機械的性質でも現れる。また、常温の基材上に減圧溶射した WC-Co や TiC 皮膜には、熱収縮によりき裂が40~50 $\mu\text{m}$  間隔で発生することがある。

減圧溶射効果は、つぎの各測定結果にもみられる。a) 皮膜の表面粗さが、Fig. 7 に面粗さ比で示すように、平滑となる。b) 皮膜/基材境界層の厚さが、Fig. 8 に示す PC/70Cu30Zn 試片例のように厚くなり、または、Fig. 5 の SEM 像のように、境界が明瞭でなくなる。以上の結果は、減圧するほど爆発ガスの膨張度が大きくなること (Fig. 4) から推察して、ガス中を飛行する溶射粒子の速度 (~800m/s) があまり低下することなく基材に衝突するためであると考えられる。c) 皮膜中の酸素と炭素の量は Fig. 9 に、PC (0.6wt% C) 皮膜例で示すように、酸素量と、相対的に炭素の減量が少なくなる。このことは、酸化による脱炭量の減少であると考えられる。また、77kPa で酸素量にピークがある。

これらの諸原因を77kPa 中での線爆写真から推察すると、次のことが考えられる。すなわち、この場合の爆発ガスは、強い乱流状態での膨張により多量の空気を巻き込んでいるので、ガス中にある溶射粒子の酸化を強めること。また、このガスの乱れは粒子の飛行をも乱すことである。これらのことは、とくに炭素を多く含有する材料や、高温酸化度の大きい Ti や Mg などの皮膜の性質に大きな影響を与え

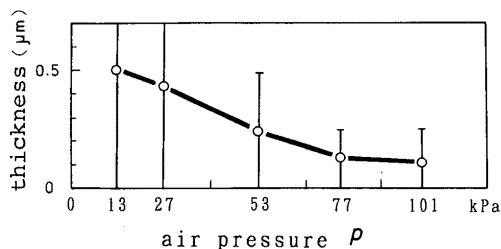


Fig. 8 Average thickness of interphase regions of PC coatings on brass substrate.

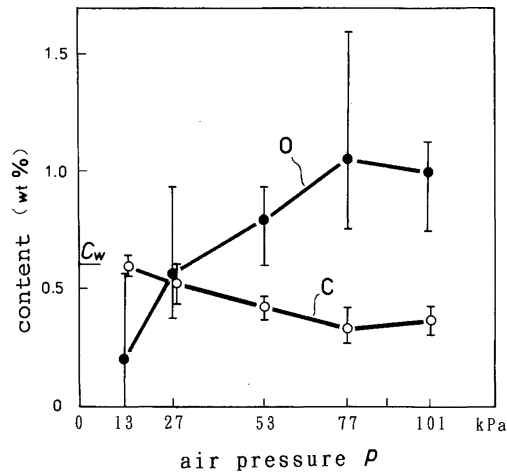


Fig. 9 Oxygen and carbon contents in PC coatings.  
 $C_w$ : carbon content in PC wire.

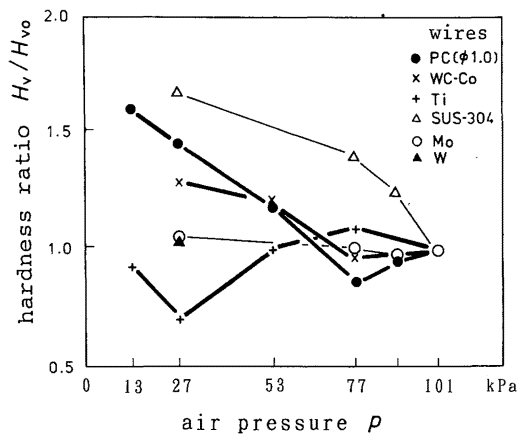


Fig. 10 Effect of air pressure on coating hardness  $H_v$ .  
 $H_{v0}$ :  $H_v$  at 101 kPa.

るものと考えられる。

### 3.2.2 溶射皮膜の機械的性質

Fig. 10 は、溶射皮膜断面のマイクロビッカース硬さを101kPa 時の値で整理したものである。個々の皮膜の硬さは、それぞれ、緻密度、炭素量、酸化量等の影響を受けていることが推察される。とくに、PC と WC-Co は炭素量に、また化学活性な Ti は酸化の影響が強く出ているものと考えられる。

PC 溶射皮膜の Cu 基材への付着強さの測定結果を Fig. 11 に示す。この引張り付着強さは、減圧するほど大きくなるが、この場合でも77kPa 中のもものでは弱い。この付着強さは、皮膜/基材境界層の厚さに対応し、また皮膜組織内の欠陥状態にも関係する。

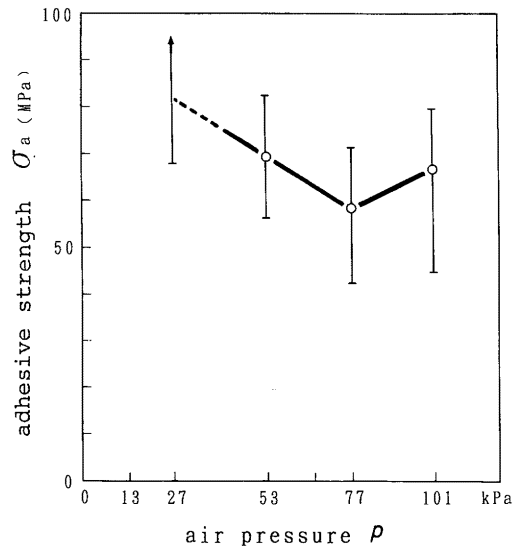


Fig. 11 Adhesive strength of PC coatings on Cu substrate.

#### 4. 結 言

減圧（空気）線爆溶射に適用できる最適溶射条件を求め、それによって形成した溶射皮膜の評価を行い、次の結果が得られた。

- (1) 線爆溶射線材の最適断面積は、

$$S_0 = K_1 \{1 + k[(P_0/P) - 1]^a\}^{-1} CVf^a,$$

また、最適溶射距離は、

$$R_0 = K_3 (P_0/P)^b r_w.$$

- (2) 減圧線爆溶射皮膜は、一般的に減圧するほど緻密化が進む。  
 (3) 線材に炭素を多く含有するものや高温酸化度の大きいものの皮膜は、77kPaで特異現象が現れる。しかし、27kPa以下では脱炭、酸化、表面粗さ、気孔率、硬さおよび付着強さなどに、減圧による改善の効果が著しくなる。  
 (4) 皮膜の付着強さは、減圧するほど大きく、皮膜/基材境界層の厚さに対応する。また、皮膜組織内の欠陥状態にも関係し、さらに、高炭素鋼皮膜のように77kPaにおける特異現象が現れるものもある。

以上の結果より、最適な減圧線爆溶射条件と、実用化に適した雰囲気圧の範囲がわかった。今後の展開予想としては、耐摩耗、耐熱あるいは耐食・防錆の付与、金属/陶材の接合、FRM プリフォームシート、磁性、非晶質、化学活性金属などの特殊な皮膜の形成および精密プリント模様の構成などと、幅広い活用が考えられる。

## 謝 辞

本研究の一部は、三井造船株玉野研究所から、奨学寄付金の援助を受けたことを記し、謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 福田重久：熱処理，**28**-5 (1988) 320.
- 2) T. Suhara, S. Fukuda, H. Ito : 6th Inter. Metal Spray. Conf. Paris GB-3 (1970) 15.
- 3) S. Fukuda, K. Tokunaga, T. Matsubara, Y. Aono, T. Muroga, Y. Takao, N. Yoshida : Proc. Surf. Eng. Intern. Conf. Tokyo (1988) 79.
- 4) 福田重久，松原監壮，高雄善裕，武田展雄：溶射（日本溶射協会誌），**27**-1 (1990) 25-30.
- 5) 福田重久，松原監壮：溶射，**29**-1 (1992) 1-7.
- 6) 三好保憲：放電形成に関する研究，生産技術センター (1977) 213-229.
- 7) 八田吉典：気体放電，近代科学社 (1963) 140-160.

(平成4年5月29日受理)