電熔式熔射法に依る熔射粒子の大きさ並に形状

星 野 愷*
武 井 武*

Yasusi Hosino and Takesi Takei : On the Size and Form of the Sprayed Metal Particle.

Sn, Zn, Al, Cu and brass were sprayed on glass plate with electrically operated pistol under various conditions, and the forms and sizes of their particles were examined from their microphotographs. The air pressure is an important factor affecting the size, that is, the size decreases considerably as the pressure rises. The spraying distance, the distance between the pistol and the articles to be coated, has also a great influence upon the size, while the arc voltage and the wire feeding speed has a very little influence. From the form of each particle, it is deduced that the disintegration and the association of the particles occur during the transportation. And also, it was possible to observe the orientation of the particles along the track of coating.

(Received September 29, 1937)

1. 緒 言

金屬熔射被膜が通常の金屬と異なる著しい特徴は、平圓板狀の熔射粒子が組織の單位となつて居り、之の集合堆積に依つて被膜が構成されてゐる事である。而して被膜の性質は熔射粒子の大きさ、形状並にその集積状態に依つて異なる。故に金屬溶射被膜の改善を行はんとすれば、熔射粒子に就いて之等の物理的性状を吟味する必要がある。

粒子の物理的性状即ち其の大きさ、形状並に集積状態は金屬の種類に依つて異なるのみならず、熔射の操作條件、例へば熔射壓力、熔射距離、熔射電壓等に依つて著しく異なる。本報告に於いては先づ電熔法に依る熔射金屬粒子の大きさ並に形状が、複雑な操作條件に依つて如何に異なるかを述べ、併せて優良なる熔射被膜を得べき標準操作法を擧げる。

熔射粒子の大きさは一般に可及的小なる事を望む。又粒子の大きさが略均等にして被覆面が一樣な消艶狀に得られる事が必要である。均齊な細粒よりなる被膜は種々の點に於いて優良である。

本研究に於いては試料金屬として熔射に最も廣く用ひられる錫、亜鉛、アルミニウム、真鍮及び銅の5種類を選んだ。其の結果粒子は熔射壓力大なる程、熔射距離小なる程微細になる事が分つた。電弧電壓並に金屬線の搬送

速度は大した影響を與へない。この結論は上記5種類の金屬に限られる事なく、一般に適用されると思ふ。粒子の形状に關しても興味ある現象が見出された。

2. 實驗の方法

本實驗に用ひた電熔型熔射器は日本メタリコン工業所製第801號である。此の電源には單相3 kVAの交流變壓器を用ひ、その二次側電壓を50 V迄2 V毎に切換へ得る様にした。壓縮空氣を得る爲には容量80 ft³/min、最高壓力150 lbs/in²なる空氣壓縮機を用ひた。尙之に空氣淨化器を附屬せしめて、空氣中の水分、塵及び油滴等を可及的除去する様に努めた。

空氣壓力の測定には特に注意を拂ひ熔射器に近接して壓力計を取付け熔射器に吹き込まれる實際の壓力を求める様にした。

上述の如き裝置を用ひ種々なる操作條件の下に錫、亜鉛、アルミニウム、真鍮、銅の5種の金屬線(徑0.8 mm)を電熔法に依つて平滑なる硝子面に極く短時間熔射した。而して被覆された粒子の一群を擴大寫眞(×41.2)に撮影して、熔射粒子の大きさ並に形状を吟味した。

熔射粒子の形状は一般に極めて複雑不規則で其の大きさは嚴密には測定し難い。然し極めて概略的に略圓形に近いと考へても本研究の目的たる熔射條件に依る粒子の大きさの比較には差支へないと思はれた。又熔射物中に

* 東京工業大學建築材料研究所

は大小種々の粒子が混在してゐるが之を詳細に観測すると統計的には全體の粒子の大きさを支配してゐる代表的な直径の粒子が認められる。この粒子の直径を以て平均直径と見做した。例を以て示せば Photo.No.1 に於ては A なる粒子を以て代表的直径を示すものと考へて其の徑を 0.05mm と定めた。斯くして求められた測定結果は個人的誤謬を含み嚴密を缺く。この缺點を除くために多數の試料全般に涉り 2 人の異なる観測者に依り測定を行った。兩者の合致は良好であつた。この程度の合致で本研究の目的とする熔射粒子の大きさに關する一般傾向の洞察には充分である事が判つた。それ故この平均粒子法を基として粒子の大きさに及ぼす諸原因を吟味した。

3. 粒子の大きさに及ぼす諸因子

前節記載の實驗裝置にて熔射器の噴射壓力、弧光電壓、線の搬送速度、熔射距離等を種々に變更して試料を作り熔射粒子の大きさに及ぼす諸因子を調べた。Photo.No. 2 に錫に就いて得た擴大寫眞を示した。他の金屬に就いても同様な擴大寫眞が得られた。之等の擴大寫眞より粒子の大きさに及ぼす諸因子に就いて吟味を行ふに次の如くである。

1. 噴射壓の影響 前記 Photo. より空氣壓力を種々に變更し其他の條件を一定とせる場合の實驗結果を選び出し粒子の大きさと空氣壓力との關係を求めれば Fig. 1 乃至 Fig. 5 の如くである。粒子の徑は圖に見る如く噴射

Fig. 1. Pressure of Air Blast (lbs/in²).

壓の増加に比例して略直線的に減少してゐる。之は從來の定性的判斷と一致する。此傾向は各金屬に對して特に大なる差異はないが、銅、真鍮或はアルミニウムの如き比較的融點の高い金屬に於いて傾向の大なる

を示してゐる。筆者等は未だ融點の

Fig. 2. Pressure of Air Blast (lbs/in²).

Fig. 3. Pressure of Air Blast (lbs/in²).

Fig. 4. Pressure of Air Blast (lbs/in²).

遙に高い鐵、銅、ニッケル等に就いて詳細な實驗を完了して居ないが、若し前記の傾向が之等金屬に迄擴張されたとすれば之等高融點金屬の粒子の大きさに及ぼす噴射壓力の影響は更に大なるものと豫期される。

實際に行はれてゐる金屬熔射操業に於いては噴射壓力は大體 50~80 lbs/in² である。之から實際の粒子の大きさが想像出来る。近時粒子を微細にする目的で噴射壓力を増加させる傾向がある。

時には 120 lbs/in² 以上さへも試みられて居る。斯る場合には粒子自身は非常に細粒となるが、一方空氣壓力の増大は熔射金屬の酸化を促進する。そのために却つて被膜の性質を劣下させる恐れがある⁽¹⁾ 故に實用上の噴射壓力としては 80 lbs/in² 附近が適當であると

(1) 空氣壓力と粒子酸化との關係は追つて之を報告する

Fig. 5. Pressure of Air Blast (lbs/in²). 得る。之に依れば

弧光電圧に依る影響は極めて少ない事が看取される。それ故熔射に差支へない程度で成可く低電圧で行ふのが電力損失、金属の酸化、弧光の安定、操業の安全等の見地より有利である。電圧の大小は熔射金属如何に依る。熔融点の高い程高電圧を加へないと熔融が充分に行はれない憾みがある。

考へられる。尤も之は熔射金属によつて異なる。酸化し易い金属、例へばアルミニウムの如きには寧ろ噴射壓力更に小なる方が適當である。

2. 電圧の影響
擴大寫真より電圧の影響を求むれば Fig. 6~Fig.10 を

Fig. 6. Arc Voltage.

Fig. 7. Arc Voltage.

Fig. 8. Arc Voltage.

Fig. 9. Arc Voltage.

Fig. 10. Arc Voltage.

Photo. No. 3 にアルミニウムを電弧電圧 12.6 V, 噴射壓力 80 lbs/in² にて熔射せるものを示した。之では電圧が低過ぎるために金属が辛うじて熔融した程度であり、附着が極めて不良である。操業に適當なる電圧は噴射壓力に依つても多少異なる。壓力高き程高電圧を要する。Table 1 に各種金属及び噴射壓力に對し操業上最も適當と

思はれる電圧を示した。この値は一般に知られてゐる熔射電圧よりも稍低い。從來信ぜられてゐた熔射電圧は著者の實驗に依れば稍高過ぎる様に思はれる。

Table 1. Suitable Arc Voltage for Various Metals.

Metal	Arc Voltage (V)	Metal	Arc Voltage (V)
Sn	16	Brass (Cu70%)	30
Zn	23	Cu	32
Al	28		

3. 熔射距離の影響 熔射距離は附着粒子の大きさと頗る密接な關係がある。Photo. No. 4 a, b, c, d, e は熔射距離を 3.4 cm より 39.6 cm 迄變化した時の粒子の擴大寫眞を示す。之より粒子の徑を求めて熔射距離對粒子の徑の關係を求むれば Fig. 11 の如くである。

Fig. 11. Distance of Pistol from Object Sprayed (cm).

之にて明かなる如く、熔射距離が小なる程細粒となり、距離の増すに従つて粒子が甚だ大となる。本實驗に於ては硝子板上に熔射を行つたのであるが、砂吹きをした鐵板についても同様な實驗を繰返し、全く之と一致する結果を得た。熔射距離によつて粒子の徑が斯くも異なる事は一見奇異に感ずる。特に距離の小なる程細粒が得られる點に興味がある。この原因として考へられるのは第1に熔射粒子が飛行中他の粒子と衝突再結合して大塊となる事である。噴射氣流中に於ける粒子の運動徑路を觀察するに粒子は稍亂雜な曲線運動を爲して居り再結合の可能性が推定し得られる。第2は飛行中小粒子が燃焼に依つて消滅し大粒のみが残存して遠距離に到達する事である。特にアルミニウム熔射焰の如きに於ては燃焼消滅の状態が明瞭に目撃し得られる。第3は小粒子が高壓氣流圏外に逸脱することである。第4は大塊粒子の物體表

面激突による再分裂で、之は近距離に於ける高溫、高速度粒子程著しい。第5は到着熔射粒子の附着力の減退である。大粒は遠距離に到着しても運動勢力大なる爲附着が強固に行はれる。然るに小粒は假令物體表面に達しても速度減少して附着力を失ふ。以上の中 (1), (2), (3), (4) は粒子飛行中の生長、消滅を、(5) は到達せる粒子の附着能の有無を原因として挙げたのである。然し茲に注意すべきは熔射粒子は平圓板狀をなして居り、其の厚さは熔射距離の小なる程減少する筈である。従つて同一質量の粒子では近距離に於ける程其の徑が増大しなければならない。然るに事實は之に反するのは上記諸種の原因がこの傾向を打消してゐるからであらう。實際には之等の諸因の總てが總合的に影響して距離對粒子の關係を支配してゐるものと思はれる。熔射距離の増す程粒子の附着率が減少する事實から考へると近距離にては (4)、遠距離にては (5)、の原因が重きをなすとも思はれる。

4. 熔射粒子の生成、分裂とその形態

金屬線が電弧によつて熔融し壓縮空氣で噴射されて細粒狀に分散し、物體表面に附着する迄には、粒子の大きさの變化は (1) 電弧熔融物の噴射に依る微粒化 (2) 飛行中の變化 (3) 衝突に依る再分裂の3階梯で行はれる。(1) の噴射に依る微粒化は既に述べた如く噴射壓の高い程著しい。噴射口に於ける分裂に關しては噴射壓以外に、噴射口の構造並びに2本の金屬線を搬送し短絡に依つて電弧を發生させる線導子 (Wire leader) の調整が影響を及ぼす。Photo. No. 5 に線導子の寫眞を示す。經驗に依れば兩線の交角 θ は熔射金屬の熔融點に依つて異なり、熔融點高きもの程 θ を増大するのが良好である。この場合搬送金屬線の先端が正確に接觸する事が肝要である。兩線の接觸に喰違ひがあると噴射膜には不完全熔融物或は散亂不十分な大塊が混在する様になり、被膜は頗る不良になる。

(2) の飛行中に於ける粒子の質量變化は、粒子の酸化に依る金屬の減少と、飛行粒子の再結合に依る質量増加の相反する二つの傾向が起り、金屬の種類、熔射條件に依つて之等の影響が異なる事既に吟味した通りである。(3) なる衝突に依る再分裂は粒子の大きさ並びに相互融着と密接な關係があり、上記3因中最も重要なものである。電

弧に依つて熔融した高温金屬は、斷熱膨脹の爲めに冷却せる噴射空氣に依つて吹付けられるのであるが、物體表面に到達して被膜を形成する際には、激突に依る相互融着の可能な程度の温度にあるものと思はれる。加ふるに飛行粒子の一部分は燃焼する爲め發熱を伴ひ、又高速粒子が物體に衝突せる際運動エネルギーは熱エネルギーに變じ、粒子加熱の原因となる。之等の原因に依り物體表面に衝突せる粒子は相互融着可能な程度に加熱される場合もあると考へられる。

斯る考察の例證として錫及びアルミニウムを硝子板上に極く短時間熔射せる擴大寫眞を検査すると附着粒子群の中に多數の珊瑚礁狀の粒子の存在が認められる。Photo.No. 6 に斯かる錫の一粒を示す。

錫は熔融點低く、そのために粒子は衝突直後迄殆んど熔融してゐる。同圖 a はかゝる熔融錫粒子の衝突中心を示すもので、熔融金屬は a を中心として圓を畫いて硝子面上を進行し、b なる距離に於て始めて凝固點に達したものである。然るに之より稍熔融點高き亜鉛に於ては斯る輪環狀粒子は認められない。アルミニウム被膜にはこの輪環狀粒子が認められる。之では粒子が飛行中、酸化燃焼に依つて發熱し、到着粒子が頗る高温に加熱されてゐる爲めである。アルミニウム粒子が飛行中燃焼することは他の二三の事實より明かに認められる。輪環狀粒子の生否は熔融金屬の粘度に關係する處もあらうが、之が全體の傾向を支配する程大なる影響を與へてゐるとは考へられない。珊瑚礁狀粒子を形成する金屬は衝突に依る二次的散亂著しく、極めて微細なる小粒を生成する。眞鍮、銅に於ては亜鉛と同じく、殆んど輪環狀粒子の存在が認められない。

斯る熔射粒子が集合し、木の葉の堆積する如くにして熔射被膜の形成を見るわけであるが、茲に注目すべきは熔射器を左右に動かして生成せる熔射被膜を詳細に觀察すると熔射器運動の方向に一種の走行性が現はれてゐる。

事である。

Photo. No. 7 a, b は熔射器を夫々互に直角の方向に運動して形成せる二枚の被膜の擴大寫眞 ($\times 7.5$) である。之に依ると明瞭な走行性が看取される。そこで急速に熔射器を運動し、硝子板上に瞬間熔射を行つた所 Photo.No. 8 の如き明瞭な走行性を具現した粒子の存在する擴大寫眞 ($\times 41.2$) を得た。之にて明かなる如く熔射器を急速に運動した場合の單位粒子は非對稱的な形態を示す傾向がある。又熔射被膜の表面と、被膜の垂直切斷面とを檢鏡すると、兩者の組織には著しい差異が現はれてゐる。斯る方向性は被膜の諸性質に相當な影響を與へるものと考へられる。

5. 總 括

(1) 電熔法に依つて錫、亜鉛、眞鍮、アルミニウム、銅の 5 種金屬を熔射壓力、弧光電壓、金屬線搬送速度、熔射距離を變化して硝子板上に瞬間熔射し、之の擴大寫眞によつて粒子の大きさ並びに形態を調べた。

(2) 其結果熔射壓力、熔射距離は粒子の大きさに著しい影響を與へる事を見出し、又弧光電壓、搬送速度は影響小なる事を認めた。以上につきその原因を考察した。

(3) 各種金屬及各熔射條件につき電氣的に安定にして良好なる熔射電壓を表示した。然してこの値は從來行はれてゐる電壓より稍低い。

(4) 粒子の生成、分裂及び粒子の形狀につき吟味した。

(5) 熔射ピストルを運動させる時、被膜には運動の方向に一種の走行性の表れるのを指摘した。

終りに臨み本研究に對し懇篤なる御援助を賜りたる所長加藤與五郎教授に對し深甚なる感謝の意を表する。又實驗に當り熱心に助力せられた井澤範茂氏の勞を深謝する。

Photo. No. 1.

Photo. No. 3.

 $P = 25 \text{ lbs/in}^2$

 $P = 40 \text{ lbs/in}^2$

 $P = 60 \text{ lbs/in}^2$

 $P = 80 \text{ lbs/in}^2$

Photo. No. 2.