メタルジェットノズルの噴射粒径限界に関する考察*

中 村 弘 史^{*1}, 山 口 勝 美^{*1}

Consideration on Size Limit of Droplets in Metal Jet Nozzle

Hiroshi NAKAMURA and Katsumi YAMAGUCHI^{*2}^{*2} Mejep Co., Ltd.,
5-1-4 Takamori-dai, Kasugai-shi, Aichi, 487-0032 Japan

The authors have developed two types of metal jet nozzles, i.e., a molten metal type and an electric-discharge type. In the molten metal type, the molten metal droplets are jetted through a hole in the nozzle by the action of a piezo-electric actuator. In the first half of this paper, the jetting mechanisms of metal droplets and the minimum droplet sizes able to be jetted are discussed. Some considerations show that an ultra-small droplet can be jetted in the case of the molten metal having a concave meniscus to nozzle material. On the other hand, it becomes very difficult to jet smaller droplets in the case of molten metal having a convex meniscus. These discussions are confirmed by experiments under several combinations between molten metals and nozzle materials. In the electric-discharge type, molten metal droplets are jetted intermittently by blowing out the molten balls which are formed at the end of a metal wire by the electric discharge. The mechanisms of the droplet formation are discussed. On the bases of the discussion and the experimental results, the minimum and maximum droplet sizes are then estimated under practical conditions.

Key Words: Non-traditional Machining, Electric Discharge Machining, Spraying, Metal Jet, Droplet, Nozzle, Printer

1. まえがき

著者らは過去メタルジェットプリンターの開発を手がけてきた。その中でマイクロなドット状の熔融メタルを発射することを試み、二つの形式のノズル、「熔融式」と「放電式」ノズルを開発してきた⁽¹⁾⁽²⁾。それぞれ低融点メタル、高融点メタルの噴射に適したものである。これまでは、このいずれのノズルに於いてもメタルドットの発射には成功したが、どのようなメカニズムで、どのような条件下でドットが発射できるか、特に噴射可能な最小ドット径についてはほとんど検討されてはいなかった。

本研究は、両ノズルにおいて、マイクロなメタルが発射されるメカニズムを考察し、主に噴射可能な最小ドット径を検討して今後のノズル設計の指針とすることを目的としたものである。

2. 熔融式ノズル

2・1 噴射メカニズムの考察

(1) 噴射原理

熔融式ノズルの構成を図1に示す。このノズルは比較的融点の低い金属（目安として 430℃の亜鉛の融点以下）である半田などの噴射を想定したものである。

Fig.1 Schematic illustration of nozzle
(Molten metal Type)

* 原稿受付 2006年3月2日。

*1 正員、メジェップ(株) (〒487-0032 春日井市高森台 5-1-4).
E-mail: yama-katsu@ha.bekkoame.ne.jp

タンクに熔融メタルを入れ、絞り流路を介してノズルチャンバーに供給し、ノズルの背面から圧子を瞬間だけ押し、噴射孔からドット状のメタルを発射させる形式である。実際のノズルは、噴射孔出口付近はメタルの酸化を防ぐため窒素ガスで覆われている。

噴射方法はインクジェットプリンターと似ているが、インクのように液体とノズルが濡れ性を持つ場合（メニスカスが凹状：図1a）は、流路や噴射孔を如何ほどに小さくても、液は表面張力の働きでそこを通過できる。従って絞り流路を噴射孔と同程度に流れにくく設計するだけで、圧子の押し行程によりノズル内に高圧が発生し、噴射孔から液体のドットが容易に噴射できる。圧子の引き行程においては、液の表面張力の働きにより噴射孔から気体が吸い込まれることなく、タンク内の液はノズルチャンバー内に引き込まれる。

しかし、液がノズル材料と濡れ性が無く、はじかれる場合（メニスカスが凸状：図2b）はそうはいかない。液は噴射孔の手前で停止する。絞り流路を噴射孔と同程度に狭く設計すると、液は絞り流路を通過できないので、メタルの供給ができない。従って、このようなノズルは設計できない。かといって流路を広く設計すると圧子の押し行程でノズルチャンバーに高圧が発生しない。ノズル設計が大変難しいことになると予想される。

このような場合の対策は絞り流路に逆止弁を設ければよいが、マイクロなノズルであるので（0.1mmオーダー）そのようなことは無理がある。仮にできても、1ドットの体積が小さい（ 10^{-3}mm^3 オーダー）ので、弁の開きが小さくなければならず、そこをはじく液を通過させる弁の設計は不可能と言わざるをえない。

そこで、以下に図1に示すノズルの噴射のメカニズムを裏付ける圧子の運動、流路の設計および噴射圧の検討を行ってみた。

（2）圧子の運動

圧子の運動は圧電素子を使って行ったが、印加電圧の波形を図2に示す。素子の変位は電圧にほぼ比例し、印加電圧100Vで、変位は $6\mu\text{m}$ である。

Fig.2 Profile of voltage

押し行程は、ゆっくりすぎでは下記に検討する噴射圧の条件を満たさないでメタルを噴射出来ないし、過度に早すぎでは衝撃で噴射メタルが分離して噴霧状態となる。適度な速さが必要である。

引き行程は、噴射孔から気体を吸い込まずタンクからメタルが補給されるためにはゆっくり引くのがよいが、あまりゆっくりでは噴射周波数が上げられないので可能な限り速く引きたい。

実験では、一例として半径0.1mmのノズル噴射孔で、半径1.5mmの圧子を使って噴射したとき、300Hzぐらいの周期の噴射が可能であった。その場合の両行程の圧子の運動速度を求めると、押し行程はおおよそ70mm/s、引き行程はその1/40の1.8mm/s程度の速さであった。

（3）噴射圧の検討

一般に、マイクロなものの運動に於いては、質量などの慣性項はその効果が小さく、粘性項や表面張力が支配的になる。従って、ノズル内に発生する圧力を流路の粘性抵抗と表面張力の関係のみで単純化して検討を試みることにする。

図1の各記号を用いて、噴射孔が十分小さい場合は、表面張力 γ 、ノズル材との接触角 θ の液体を、半径 r_n の孔から噴射できる限界圧力 p は表面張力と内圧のつりあいの関係から以下のように表される。

$$2\pi r_n \gamma \cos \theta = \pi r_n^2 p$$

$$\therefore p = \frac{2\gamma \cos \theta}{r_n} \quad (1)$$

一方、タンク内絞り流路口にかかる静圧 p_0 の下で、半径 R_p の圧子の降下速度 v_p によって長さ L_c 半径 R_c の絞り流路に流れる流体に流動抵抗が発生する。それによってノズル内に発生する噴射圧力 p' は以下のように求められる。圧子の運動によって生じる流量 Q は

$$Q = v_p \cdot \pi R_p^2 \quad (2)$$

また、ハーゲン・ポアズイユの式により、流量 Q と圧力差の関係は、粘性係数を η とすると

$$Q = \frac{\pi R_c^4 (p' - p_0)}{8\eta L_c} \quad (3)$$

であるので、

$$p' = \frac{8\eta L_c v_p R_p^2}{R_c^4} + p_0 \quad (4)$$

となる。

式(1)(4)において、 $p' > p$ の条件を満たさないでメタルは発射できない。

メタルの発射には p' が大きい程都合がよい。それを実現できる条件は、 L_c 、 R_p 、 v_p が大きく、 R_c が小さい方がよいことが分かる。マイクロノズルの設計では L_c 、 R_p の大きさは制限されるので、それなりの妥当な寸法限界がある。 v_p も先に述べたようにむやみに大きくできない。 R_c は他のパラメータに抜きん出て4乗の効果があることと設計の自由度が大きいので、噴射を律する決定的なポイントであることが分かる。

$p_0=0$ の条件下で、表1に示すような L_c 、 R_p 、 v_p の値を使い p' を求めた。その結果を表の下段に示す。ここでA欄は濡れ性のある場合、B欄は濡れ性のない場合を想定したもので、絞り流路半径 R_c の値はAの場合はノズル噴射孔半径 r_n 相当値とし、Bの場合はメタルがはじかれず通過できる最小孔径値相当としたものである。 R_c 以外は全て実験に使った数値で、両者同じ値で比較した。なお、接触角 θ については溶融 Sn と SUS・Cu 表面についての実験から得られた値を用い、 $\eta \cdot \gamma$ については Sn の物性値を用いた。

計算結果から、ノズル内に発生する圧力 p' はAの場合 25.6 kPa でBの場合 0.5 kPa と格段の違いがあることが分かる。

式(1)の表面張力による限界圧力 p を噴射ノズル

Table.1 Numerical value

	A Wet	B Repellent
Radius of piston R_p [mm]	1.5	
Radius of connecting tube R [mm]	0.15	0.4
Length of connecting tube L [mm]	5	
Velocity of piston v_p [mm/s]	72	
Viscosity η [10^{-3} Pa]	2	
Surface tension γ [10^{-3} N/m]	526	
Contact angle θ [$^{\circ}$]	40	140
Generated pressure p' [kPa]	25.6	0.5

Fig.3 Relationship between hole radius and surface tension

孔径 r に対して計算した結果を図3に示す。当然 p は r_n に逆比例関係の線で表される。この図に上記で求めた噴射圧力 p' を書き込むと、 $p = p'$ の交点は、Aの場合は $r_n = 0.016 \text{ mm}$ となり、非常に小さなメタルドットの噴射ができる。Bの場合は、 $r_n = 0.8 \text{ mm}$ となって、それ以下の径のノズルではメタルの噴射ができないことになる。濡れ性のある液体は濡れ性の無いものに比べて如何に噴射し易いかが分かる。その原因は絞り流路の設定に制限があることに起因することが分かる。

(4) 背圧の影響

上記では絞り流路口にかかる静圧 $p_0 = 0$ で計算したが、タンク内の液面ヘッドおよびその液面に背圧 q を与えることで、式(5)の p_0 を大きくすることで p' を大きくできる。但し、圧子が静止状態でノズルから流れ出ないために、 $p_0 < p$ でなければならない。背圧 q を加える方法はいわゆるディスペンサー方式と言われるものである。この方法を使えば、上記の式から濡れ性のない場合でも次のようなことが予想できる。

① q により p_0 が p を少し下回る圧力を加えておけば、いずれの r_n に対しても噴射できることになる。Bの場合、図3に示すように、 p_0 を p 線直下のa点になるように背圧をかけておき、絞り流路での流動抵抗によって生じる圧力を加えることで噴射できることになる。

② 噴射孔が小さい場合(例えば 0.1 mm)には、高い背圧で、 p_0 をa点にする必要であるにも拘らずノズル内に発生する圧力は変わらないので、微妙な圧力のセティングをしなければならない。従って、噴射は相対的に難しくなる。

③ このように背圧を高くすれば、絞り流路を小さくしてもメタルが通過できるので、ノズルへの補給ができる。絞り流路を小さくすると噴射圧は高くなるので、噴射できる可能性は高くできる。しかし、絞り流路の流動抵抗が大きくなるので、圧子の引き行程をゆっくり引かないと、ノズル孔から気体を吸い込んでしまう。これは噴射周波数が上げられなくなることになって、不都合となる。

(5) 噴射限界の考察

上記の考察から、噴射できる粒径は、濡れ性のあるノズルの場合には、噴射孔径を小さくし、それに応じて絞り流路を小さくすれば、原理的には限りなく小さなドット粒子が噴射できることになる。

濡れ性のないノズルでは、式(5)から、ノズル孔径に応じて背圧 p_0 を上げ、 R_c をそれに応じて小さくすれば圧力は4乗の効果となって噴射圧を上げること

はできる。しかし、圧子の引き行程における金属の流入抵抗も同じように増えるので、ノズルの孔から気体を吸い込むことになってしまい、丁度その効果と裏腹にその分だけゆっくりと圧子を引かなくてはならない。これは、噴射周波数が落ちることになり、ノズルとしての性能が維持できなくなる。言い換えれば、小径粒子の噴射は難しくなる。

2・2 実験方法および結果

上記の考察を詳細に確認するためには、系統的な実験が必要であるが、一つのパラメータを変えるだけで、実験は膨大な手間がかかり難しいので、以下の事項について考察を確かめた。

(1) 濡れ性のある場合

噴射金属は融点 47℃ の U アロイ (44.7Bi-5.3Cd-22.6Pb-8.3Sn-19.1In) を用い、ノズル材料は濡れ性のある銅を使用した。参考のため 183℃ の Pb-Sn 共晶半田 (38Pb-62Sn) についても実験した。いずれの場合もノズルとタンクを金属の融点より 10℃ 程度高く加熱

した状態に保った。各種寸法などの条件は、表 1 に示されたものを使った。ノズル噴射孔径 r_n は 0.1mm である。

いずれも噴射は容易にできた。そのときの U アロイの噴射の様子を図 4 に示す。Pb-Sn 共晶半田を噴射し、これを使って造形を試みたものを図 5 に示す。このとき、絞り R_c はノズル孔径とほぼ等しい穴徑を目指したが、その大きさはあまり問題なく噴射できた。

濡れ性のある場合は極小粒径の発射が可能としたが、別に $r_n=0.02\text{mm}$ 以下の極小ノズルで U アロイを使って噴射を試みた。図 6 に示すように小径粒子の噴射は可能であった。

当然のことながら、この方式には問題がある。それは、ノズル材料である銅と熔融金属との間に濡れ性があるが、銅が金属に少しずつ溶け込んで、浸食される。U アロイの場合で 2~3 週間、共晶はんだで 2~3 時間程度の実験でノズルが明らかな損耗を起こしてしまった。

このように実験室では実験データは得られたが、このノズル材料では融点 50℃ 程度以上の金属では実用的には使えないことが分る。濡れ性が高く、長期間に亘って溶融しないしは合金反応しない材料の組合せがあればそれが望ましいが、通常の工業上の金属ではそのようなノズル材料はなかなか得られない。

(2) 濡れ性の無い場合

この実験に使用した金属は先に述べた U アロイと融点 68℃ のウッドメタル (50Bi-12.5Cd-25Pb-12.5Sn) である。ノズルはこれらと溶解・反応性がほとんど無いステンレス鋼 (SUS304) を使った。当然濡れ性がない。実験は条件 B に示された設計条件で実験を行った。いずれも融点より 10℃ 程高い温度で溶融した。

結果は、 p_0 などの最適値を選んで噴射を試みたところ、いずれも噴射ができた。図 7 にウッドメタルの噴射による文字プリント例を示す。しかしいずれの場合も、噴射条件設定範囲が狭いものであった。また、半径 0.10mm より小さい孔からは、 p_0 、 v_p など各種条

Fig.4 Serial photograph of metal shot

Fig.5 3-dimentional model made of Pb-Sn solder

Fig.6 Drop of U-alloy

Fig.7 Metal printing by wood's metal

件を変えても噴射はしにくく不安定であった。

以上、不安定な原因は、先に考察で明らかなように、濡れ性のあるものでは、圧子の引き行程で、ノズル噴射孔出口でメタルが表面張力の働きにより気体が吸い込まれにくいのに対し、濡れ性の無いものでは、メタルが噴射孔に入ることなく入り口で止まり、気体の吸い込み防止は背圧のみによるため、絞り流路を小さくできないことによるといえる。もし絞り流路を小さくすると、負圧が生じて、気体の吸い込みが発生して噴射できなくなると考えられる。

以上から、このままでは、この方式のノズルでは耐久性は得られるものの、信頼性は低く、実験室はともかく実用的な使用には難があると判断できる。

著者らは、その後、この考察に基づき、噴射圧を増強できる極めてユニークな噴射方式を創案し、濡れ性の無い場合でも安定した噴射に成功した。

Fig.8 Schematic illustration of nozzle (Electric discharge Type)

3. 放電式ノズル

3・1 噴射メカニズムの考察

(1) 噴射原理

本方式のメタルの噴射原理を図8に示す。メタルの細線を細いパイプに通して突出させて、側方に置かれた電極から細線を介して放電させることで、線端にメタルの溶融球をつくる。直後にパイプの中から気体パルスジェットで溶融球を吹き飛ばすものである。

(2) 噴射限界の考察

気体のジェットによって、溶融メタルを噴射できる最小限界を検討する。

放電で溶融されたメタルは表面張力により球を形成する。図9にそのモデルを示す。噴射はこのような溶融球を気流で線軸方向に吹き飛ばすのである。吹き飛ばす条件は付け根の表面張力以上に溶融球に気流の抵抗が生じなければならない。その抵抗力は球の形状によって決まり、球の形状は気流から受ける摩擦力、流体力、表面張力のバランスで決まる。この問題を流体力学的に解くのは極めて難しいので、以下に近似の見積もりを行う。

半径 r_w の細線が長さ L_w だけ融けた場合の体積と、形成される溶融球の体積の関係は

$$\pi r_w^2 L_w = \frac{4}{3} \pi R_b^3$$

であることから、半径 R_b は

$$R_b = \left(\frac{3}{4} r_w^2 L_w \right)^{1/3} \quad (5)$$

Fig.9 Schematic illustration of release of droplet

半径 R_b の溶融球が気流から受ける抵抗によって、流れに形状が馴染んで、近似的に長半径 a 、短半径 b の楕円形状に変形させられると仮定すると

$$R_b = (ab^2)^{1/3} \quad (6)$$

の関係が得られる。

この楕円体の長軸方向に働く空気抵抗 D は軸の面積 πr_w^2 に空気があたらないことを考慮して、気流の流速を v_a とすれば

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho v_a^2 \cdot \pi (b^2 - r_b^2) \quad (7)$$

で表される。ここで、 C_D は抗力係数で、係数は一般にレイノルズ数や形状によってわずかに変化するが、実験におけるレイノルズ数は $10^3 \sim 10^4$ 程度であり形状に関係なくほぼ $C_D = 0.4$ である⁽³⁾。

半径 $r_w = 0.025 \text{ mm}$ の金属線について、流速 $v_a = 300 \text{ m/s}$ における $a/b = c$ を変化させていった場合の空力抵抗を計算してみると、図 10 のように表される。

一方、溶融体が金属線から表面張力 γ の働きによる付着力 F は

$$F = 2\pi r_b \cdot \gamma \quad (8)$$

この値を図 10 に書き込むと、水平な実線で表される。式 (3) > 式 (4) で決まる点が、飛しようする最小限界を与え、この値以上であれば、溶融球は飛しようすることになる。

一方、最大溶融長さ L_w は安定して放電が持続する最大放電長さで決まる。この値は実験から定められる。

3・2 実験方法および結果

実験に使ったノズルの概要を図 11 に示す。表 2 に示す条件で噴射を試みた。使用した金属線は金、ジェットは音速に近い空気である。

Fig.10 Criterion of shooting
(Au $r_w = 0.025 \text{ mm}$ $v = 300 \text{ m/s}$)

放電により金線の先を溶融させそのまま、凝固させたものを図 12 に示す。表面張力によりほぼ真球が形成される。これを溶融状態で空気ジェットにより銅板上に噴射したものを図 13 に示す。高速で衝突し、瞬時に凝固したため中央がへこんだ底付きのドーナツ状をしている。

このような噴射実験に於いて噴射可能な溶融長さ

Fig.11 Detail of nozzle

Table 2 Experimental condition

Wire	Au
Wire radius [mm]	0.025
Jet	Air
Jet velocity [m/s]	300
Discharge current [mA]	70
Discharge time [ms]	7

Fig.12 Molten metal ball
(Au wire, $r_w = 0.025 \text{ mm}$)

Fig.13 Drop of gold

L_w と粒径を測定した。その結果を図14に示す。

溶融長さ L_w の設定を大きくした場合は、放電により金属線の先端が溶融して放電距離がしだいに伸びてゆき、放電が途中で断絶してしまつて、所定の溶融ができなくなる。この放電長は電源の特性、気体の状態、電極材料などの影響を受けるが、それらが定められると、それに応じた放電限界の長さ L_w が決まる。本実験では図示のように最大溶融長さ $L_w = 7\text{ mm}$ であった。この値は線径によってはあまり変わらない値である。

一方、設定溶融長さが小さい場合、溶融球が小さ過ぎて、空気で吹き飛ばすことができない。その限界は図に示されているように $L_w = 0.9\text{ mm}$ であった。

以上の結果、溶融長さ $0.9 \sim 7\text{ mm}$ 、即ち粒径 $150 \sim 300\text{ }\mu\text{m}$ のドット粒子の噴射ができた。

この飛ばさせることができる最小粒子条件を図10に示した予測値と対応させると、溶融球が飛ばす際に変形する形状を示す a/b の値は2.25程度と推測できる。

Fig.14 Allowable molten length of wire for shooting
(Au $r_w = 0.025\text{ mm}$)

3. 3 噴射限界粒子径

金属線を細くすればするだけ小径の粒子が噴射できる。その限界を、ここで推測された楕円形状で吹き飛ばされると仮定して飛ばさせられる最小粒径を予測してみる。また同時に、限界放電長から予測される発射可能な最大粒径も求められる。その計算による予測結果を表3に示す。

使用する線径に応じて噴射可能な粒径が変わる。仮に使用できる線半径が 0.005 mm とすれば最小粒径は $61\text{ }\mu\text{m}$ となる。市販の最小線半径は金線で 0.015 mm であることから、技術的に入手可能な線半径は 0.005 mm が限界と考えられる。その場合、本方式で発射可能な

限界最小粒径は約 $60\text{ }\mu\text{m}$ と予測できる。

なお、溶融球の飛ばす状況を実際に観察したいと考えたが、この現象が起こるのは 10^{-6} s 時間内の現象であり、放電状況の下でかつ顕微鏡で観察しなければならないことから、観察はとてもできなかった。

Table 3 Allowable condition for shooting

Wire radius [mm]	Minimum wire length [mm]	Minimum diameter [μm]	Maximum diameter [μm]
$\phi 0.01$	1.51	61	102
$\phi 0.02$	1.17	89	161
$\phi 0.04$	0.95	132	256
$\phi 0.05$	0.91	151	297
$\phi 0.06$	0.87	167	336
$\phi 0.08$	0.83	200	407
$\phi 0.10$	0.81	230	472

4. 結論

メタルジェットの噴射現象の考察と実験から、噴射可能粒径について、次のことが結論づけられた。

(1) 溶融式ノズルでは、濡れ性のあるノズル材料が使えれば、原理的には極めて小さいメタルも噴射できる。濡れ性の無いノズルを使わなければならないときは、背圧を使い微妙な設計条件を満たさなければならない。また、小径の粒子の噴射は極めて難しくなる。

(2) 放電式ノズルでは、メタルを飛ばすために必要な金属線の最小溶融長を予測する簡便手法を示し、それに基づき噴射可能な最小粒径を予測した。

10. 参考文献

- (1) Yamaguchi, K., Sakai, K. et al., Generation of Three-dimensional Structure Using Metal Jet, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.64, No.10 (1998), pp. 1497-1501.
- (2) Yamaguchi, K., Nakamura, H., Development of Electric-Discharge Type Metal Jet Nozzle for Printer. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.072, No.720 (2006), pp.2656-2661.
- (3) The Japan Society of Mechanical Engineers ed., *JSME Mechanical Engineers' Handbook*, (1996), A5-p98, The Japan Society of Mechanical Engineers.