平滑基材上に自由落下させた金属液滴の偏平挙動*

西岡 映二**, 福本 昌宏***

Flattening Behavior of Freely Fallen Molten Metal Droplet on Flat Substrate*

by Eiji NISHIOKA** and Masahiro FUKUMOTO***

A freely falling experiment, in which a molten metal droplet fell freely and impinged on a flat substrate, was conducted as a simulation of the thermal spray process. The relating factors to the flattening and solidification behavior of the droplet were explored and their effects were clarified.

A flattening ratio; D/d has been introduced into consideration and used as an estimation factor of the flattening degree of the splat. It was found in our experiments that the larger Re and We numbers of the splat were, the higher the flattening ratio was. Comparing with the flattening ratio of the conventional Madejski's equation, that obtained in the experiment was fairly small. This suggests that some other factors relating to the actual flattening, for example surface tension, solidification and wetting at splat/substrate interface, have to be taken into account to the analyses. Further investigation results showed that both interface wetting and thermal conductivity of the substrate affected the flattening ratio of the splat. The observation results of the bottom surface of the splat indicated that the solidification affected the flattening behavior of the splat, especially in the central region.

Key Words: freely fallen droplet, splat, substrate, solidification, flattening ratio, Re number

1. 緒 言

耐熱性、耐食性などの特性を合わせ持つ高機能材料の多くが難加工性であることから、難加工材料の厚膜作製が可能な溶射技術が注目され、その高信頼性・制御化が必要とされている。溶射において膜質や密着力の効率的な改善を行うには、皮膜構成の基本的素過程である個々の粒子の基材上での偏平挙動に着目し、これに関与する因子の影響を明らかにすることが重要と考えられる。

従来、Jones¹⁾およびMadejski²⁾による理論解析やTrapagaら^{3,4)}、Bertagnolliら^{5,6)}およびPasandideh-Fardら^{7,8)}による数値解析においては、粒子偏平を理想的な円盤状として扱い、偏平率は、 Re 数および We 数としての粒子の密度、粘性、速度、直径および表面張力により記述されたとしたが、未だ統一的な見解が得られていないのが現状であり、このような状況を打開するためには、より詳細かつ定量的な実験を行う必要があると考えられる。

著者らはこれまでに、溶射粒子の偏平に関する実験⁹⁻¹¹⁾において、基材因子とりわけ基材温度は粒子偏平形態を支配する重要因子であり、これには、基材への熱伝達および

熱伝導に関連する粒子内凝固および粒子/基材界面でのぬれの影響が関与する¹²⁾等の諸点を示したが、両因子の影響の具体像は未だ不明な点が多く、その解明が必要とされた。

ただし実際の溶射プロセスは極めて複雑な短時間の現象であり、また解析においても定量的な扱いは厳密には多くの困難を伴う。そこで溶射現象の模擬実験として関与因子の設定が比較的容易な自由落下実験¹³⁻¹⁵⁾での取り組みが有効と考えられる。本研究では、溶射プロセスの模擬として室温の平滑基材上への金属液滴の自由落下実験を行い、液滴の偏平・凝固挙動における関与因子の特定およびその影響について種々検討し、これにより溶射粒子偏平現象に対する理解を深めることを目的とする。

2. 供試材料および実験方法

Fig. 1に実験装置の模式図を示す。液滴の形成は、瞬時に高温まで加熱可能な1 kWの高周波誘導加熱装置により原材料金属線を溶融・自然落下させることによる。用いた材料は、市販の純Snおよび純Al(ともに純度99.9%以上、 $\phi 2$ mm)線である。なお本研究では液滴温度の実測は行わなかったが、液滴の形成には溶融が条件であることから液滴温度は各材質の融点以上と考えられる。液体金属の物性値の温度依存性¹⁶⁾は粘性 $\eta = \eta_0 \exp(E/RT)$ 、表面張力 $\gamma = \gamma_{mp} + (T - T_{mp})(d\gamma/dt)$ 、密度 $\rho = \rho_{mp} + (T - T_{mp})(d\rho/dt)$ で表されるが、Al液滴の温度が融点より50 K高い場合 $\eta_{mp+50} = 0.90\eta_{mp}$ 、 $\gamma_{mp+50} = 0.98\gamma_{mp}$ 、 $\rho_{mp+50} = 0.99\rho_{mp}$

*原稿受付 平成9年12月24日 平成9年度春季全国大会で発表

**学 生 員 豊橋技術科学大学 Student Member, Graduate Student, Toyohashi Univ. of Tech.

***正 員 豊橋技術科学大学 Member, Toyohashi Univ. of Technology

Fig. 1 Experimental apparatus.

Table 1 Physical properties of droplets used at their melting point.

Materials	Sn	Al
Melting point(K)	505	933
Latent heat($\times 10^3$ J/kg)	58.97	396.6
Surface tension($\times 10^{-3}$ N/m)	544	914
Viscosity($\times 10^{-3}$ Ns/m ²)	1.85	1.30
Density($\times 10^3$ kg/m ³)	7.0	2.4
Thermal conductivity(w/m/K)	30.0	94.03
Specific heat($\times 10^3$ J/kg/K)	0.250	1.08
Thermal diffusivity($\times 10^{-5}$ m ² /s)	1.71	3.63

と全て物性値の減少率は1割以下であることから、本研究では液滴温度は融点とし、各物性値の温度依存性は無視した。Table 1に各材料の物性値¹⁶⁾を示す。基材温度は室温(300 K)とし、基材はSUS304鋼を基本とした。

初めに予備実験として、エメリー紙による一方向スクラッチおよび $0.3 \mu\text{m}$ Al_2O_3 を用いバフ研磨による鏡面仕上げを施したSUS304鋼基材を用い、液滴の偏平に及ぼす基材表面粗さの影響を検討した。また液滴の偏平に及ぼす落下および偏平中における表面酸化の影響を調査するために、大気中および窒素雰囲気中での落下実験を行い、スプラット表面の酸化状況を比較した。窒素雰囲気中での液滴落下を可能とするために、0.15 mから0.9 mの長さのガラス管を準備し、試片上部より窒素ガスを充填させることにより不活性雰囲気を形成した。

偏平に対するスプラット/基材界面ぬれ性の影響を調べるために、金蒸着を施したSUS304鋼基材を準備し、蒸着膜なしの基材上での結果との比較を行った。スパッタリン

グ時間から膜厚を推定したオージェ分析結果¹¹⁾より、金の蒸着膜の厚さは20~30 nm程度であった。これはスプラット厚さに比べ非常に薄いため、熱伝達性および熱伝導性等への影響は無視した。また、液滴の偏平に及ぼす凝固の影響を調査するために、種々の熱伝導率を有する基材材質としてソーダガラス、AlおよびCuを選び、スプラット/基材界面のぬれ条件を固定するためにこれら基材表面には金蒸着を施した。いずれの基材に対しても、液滴落下実験の直前にアセトンによる脱脂を行った。

得られた結果において、基材衝突直前の液滴速度は落下距離より算出した。また液滴の原直径： d は、液滴を球と仮定し、スプラットの重量および金属の理論密度より算出し、その実測範囲は $d=2.0 \pm 0.3 \text{ mm}$ であった。さらに偏平後のスプラット直径： D は、万能投影機により10倍に拡大したスプラット像の任意の10箇所を測定し、その平均値として求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 模擬実験と溶射の相似性

初めに、溶射現象に対する本模擬実験の相似性について検討した。液滴の流体的および熱的特性を表す因子は、それぞれRe数($=\rho dv/\eta$, ρ :密度, d :直径, v :速度, η :粘性)およびPe数($=vd/\alpha$, α :熱拡散率)であり、両値が一致すれば、両現象は流体的および熱的に相似と言える。同一材料においては、密度、粘性および熱拡散率は同一であるため、両因子は直径および速度のみの関数として扱うことができる。ここで溶射粒子の代表的な直径および速度をそれぞれ $d_s=20 \mu\text{m}$ および $V_s=200 \text{ m/s}$ と仮定すると、自由落下液滴のこれらの値をそれぞれ $d_f=2 \text{ mm}=100 d_s$ および $V_f=2 \text{ m/s}=0.01 V_s$ と設定することにより両現象の相似は成立する。本模擬実験において、このような直径および速度の設定は可能であり、この場合の両因子は、例えばSnの場合 $\text{Re}=15,135$ および $\text{Pe}=23$ となる。

次に、基材上でのスプラットの凝固における相似性について検討した。ここではMadejskiの解析に従い、飛行粒子が基材に衝突後直ちに円柱形状に変形し、凝固しながら偏平する場合を考える。先に示した速度および直径を有するSn液滴がFe基材上で偏平し、スプラットの厚さ方向への一方向凝固を想定するStefan問題¹⁷⁾に従い凝固すると仮定すると、両現象における無次元凝固時間($t^*=vt/d$, v :液滴速度, t :実時間, d :液滴直径)は $t_s^*=8.30$ および $t_f^*=5.75$ となり、必ずしも一致しなかった。これより、両現象における凝固に関する相似性は必ずしも成立しなかった。ただし、本実験は流体的および熱的相似が成立するため、完全ではないものの溶射現象の模擬実験として適用可能であるとした。

3.2 偏平に対する基材表面粗さおよび雰囲気の影響

模擬実験における液滴の偏平・凝固に対する基材表面粗さおよび実験雰囲気の影響について検討した。初めに基材表面粗さの影響として、600番のエメリースクラッチを施した基材上で得たSnスプラットの裏面組織観察例をFig. 2に示す。これより裏面には、エメリースクラッチに沿って偏平中に物理的に取り込んだと思われる巨視的气孔が多く認められる。このような気孔の存在は、スプラット/基材間の接触状態ひいては液滴の凝固およびスプラット/基材間のぬれ挙動にも影響を及ぼすと推測される。したがって本研究では、液滴の偏平に及ぼす基材表面粗さの影響を除外するために基材に鏡面研磨を施した。その結果、鏡面仕上げた基材上でのスプラット裏面における巨視的气孔の形成は著しく減少した。

次に粒子酸化に対する実験雰囲気の影響を調べた。Fig. 3に、本研究の一環として行った大気中で得た高融点金属であるNiのスプラット表面観察結果を示す。これより、スプラット表面には明らかに酸化膜の形成が認められ、飛行中あるいは基材付着後の凝固冷却中に酸化が起こったと考えられる。ここで用いたSnおよびAlスプラット表面に

Fig. 2 Observation result of bottom surface of Sn splat on emery polished (#600) substrate.

Fig. 3 Ni splat surface fallen in an air atmosphere.

も、ほぼ同様の酸化膜の形成が認められ、このようなスプラット表面の酸化は基材に対するぬれ性に変化をもたらすことが知られている¹⁸⁾ことから、本研究では窒素雰囲気中での実験を行うこととした。

3.3 スプラット形態および偏平率計測結果

SnおよびAl液滴について、スプラット形態を観察した。Fig. 4にSUS304鋼基材上で得たスプラット形態を示す。両材料ともに、今回変化させた範囲では落下距離とは無関係にすべて円盤状を呈した。

多くの解析研究において、液滴の偏平・凝固挙動は偏平後のスプラット径 D と液滴原直径 d との比である偏平率： D/d により評価される。偏平率は、理論的な取り扱いが容易であり、またスプラット形成に対する有効な評価因子と考えられることから、本研究においても実験結果を偏平率により評価した。

Fig. 5 a)およびb)に、SUS304鋼基材上で得たスプラット偏平率と、慣性力と粘性力の比である Re 数および慣性力と表面張力の比である We 数 ($=\rho d v^2/\gamma$, γ :表面張力)との関係、および Re 数または We 数の関数として求めた最小2乗近似曲線をそれぞれ示す。また両図には、比較のために表面張力および凝固を考慮せず Re 数のみで表したMadejski曲線およびChengの曲線¹⁹⁾をそれぞれ併記した。

これより、 Re 数および We 数の増加に伴い両材料ともに偏平率が増加する傾向が認められ、また偏平率は Re 数等の関数として表わされることがわかる。理論曲線との比較をすると、図a)では実験曲線はMadejski曲線を大きく下まわった。両曲線の差は、ここでのMadejski曲線が $We=Pe=\infty$ とする簡略化したものであるのに対し、実際の液滴では表面張力および凝固の影響が関与するためと考えられる。また図b)では実験曲線はChengの理論曲線とよく一致した。ただしChengの解析は、2枚の平行平板間の液滴を上下方向からの力により偏平させるモデルを基に導出され、粘性および凝固等の影響を考慮していないなどの不完全なものであることから、これを直接実験結果と比較するのは必ずしも適当ではないと考える。

Fig. 4 Splat morphologies. (falling distance 0.9 m) a) Sn, b) Al.

Fig. 5 Relations between D/d and a) Re number, b) We number.

いずれにせよ液滴偏平挙動の解明には、関連する各種因子の影響について基本的に調査する必要があると考えられる。そこで以下に、液滴の偏平に対する代表的因子として、スプラット/基材界面ぬれ性および凝固の影響について調査した。

3.4 偏平率に及ぼすスプラット/基材界面ぬれの影響

初めに、偏平率に及ぼすスプラット/基材界面でのぬれ性の影響を調査した。なおぬれ性の影響評価においては、基材への熱伝導条件を一定とする必要があるために、基材をSUS304鋼に固定し、金蒸着膜の有無によりぬれ性のみを変化させ、これに伴う偏平率の変化を調査した。

Fig. 6に金蒸着膜の有無に伴う偏平率の差を示す。これより膜の有無により Re 数の増加に伴う偏平率の増加傾向が微妙に異なり、20000までの Re 数域では膜のある場合の

Fig. 6 Effect of wetting on flattening ratio.

偏平率が大きいのにに対し、それ以上の Re 数域では逆に膜のない場合の偏平率が大きくなることが分かった。一般に金属酸化物に対する液体金属の静的ぬれ性は、金属酸化物が不安定であるほど良いことが知られている²⁰⁾ことから、速度の影響の小さい低 Re 数域において金膜のある場合の偏平率が大きかった一因には、かかる静的ぬれによる偏平促進効果があげられる。

ただし両者の相違をもたらすぬれの影響については、ここでのぬれが、スプラット/基材間の熱の移動を伴う熱的に非平衡で、かつ液滴が偏平する動的な、いわば非平衡条件下での前進接触状態でのぬれであるために、その影響の実像解明は今後の課題である。

3.5 偏平に及ぼす凝固の影響

これより、異なる基材上での偏平率の比較には、ぬれ条件を一定とする必要があることが分かった。そこで液滴の偏平に及ぼす凝固の影響を調べるにあたり、各基材表面に金蒸着を施した。

Fig. 7に偏平率に及ぼす基材材質の影響を示す。各基材ごとに最小2乗近似曲線を求め、これら相互を比較した結果、 Re 数値とは無関係にSUS304鋼、AlおよびCuの順に偏平率が低下する傾向が認められた。スプラット/基材界面でのぬれは一定とみなされることから、これらの差は基材熱伝導性の相違に起因する凝固の影響によると考えられる。そこで、落下距離を一定とした場合の偏平率と基材熱伝導率との関係を整理してみた。その結果をFig. 8に示す。これより、熱伝導が良い基材ほど偏平率は小さいことが分かった。これは熱伝導が良い基材ほど偏平中の凝固が急速に起き、偏平が抑制されるためと考えられる。したがって液滴の偏平に対し凝固は強く影響することが分かった。

Fig. 7 Flattening ratio on various substrate materials.

Fig. 8 Effect of thermal conductivity of substrate on flattening ratio and center region ratio.

3.6 凝固組織形態の特徴

液滴の扁平に対する凝固の影響形態について検討するために、スプラットの裏面組織を観察した。Fig. 9に0.9 mの距離より落下させ、SUS304 鋼基材上で得た Sn スプラットの裏面組織観察例を示す。これよりスプラット裏面は、

巨視的な方向性の認められない中央部凝固組織と、これを取りまき粗大空孔を形成しながら扁平と同時に凝固したと思われる外周部放射状凝固組織の2つの領域により構成されることがわかった。また放射状凝固域には、流れに直交する円周方向のストライエーション状模様が認められ、その間隔は扁平粒子外周に近づくにつれ次第に広がる。かか

Fig. 9 Observation result of bottom surface of Sn-splat. (falling distance 0.9 m)

Fig. 10 Observation results of bottom surface of Sn-splat on various substrates. (falling distance 0.5 m), a) Au-coated SUS, b) Au-coated Cu.

るストライエーション状組織は、Madejski の仮定する偏平/凝固の交互発生によるものとも考えられるが、その詳細は不明であり今後の検討を要する。ただし、仮に偏平の完了した後に凝固が起こるとすると、裏面全面が均一な凝固組織となることが推定されるのに対し、実際はこのような特徴的な組織形態を呈することから、少なくとも基材に接するスプラット裏面における凝固は、液滴の基材接触および偏平に追従して起こり、偏平に対しなんらかの影響を及ぼすものと推測される。

ここで上述した裏面組織上の2領域の境界を光学顕微鏡での観察結果より求め、中央部凝固領域の直径を D_c とし、この D_c と液滴原直径 d との比と種々の実験条件との関係を系統的に調査した。

初めに落下距離を0.5 m の一定とし、基材材質を変えた場合について調べた。結果の一例として Fig. 10 に、金蒸着膜を有する SUS304 鋼および Cu 基材上で得た Sn のスプラット裏面組織を示す。両裏面組織はともに上述の2領域からなり、巨視的な凝固形態は同じとみなされるが、 D_c/d 値が Cu 基材の方が小さいことが分かった。そこで同一落下条件下で得た他の基材上でのスプラット裏面組織についても D_c/d 値を求め、同値と基材熱伝導率との関係を整理した結果を前掲の Fig. 8 中に示した。その結果 D_c/d 値は基材熱伝導率の大きいほど小さく、また通常の偏平率 D/d 値の変化傾向にほぼ平行して変化することがわかった。こ

Fig. 11 Variation of flattening ratio and center region ratio.

のことは、基材熱伝導性の変化に基づき変化するのは主に中央部凝固域の広がりであり、周囲放射状凝固域の大きさはさほど変わらないこと、換言すれば、液滴の偏平における凝固環境の違いは主として中央凝固域において現れ、放射状凝固域は凝固環境の影響を受けにくいことを示唆している。

次に Dc/d 値の衝突速度依存性を調べた。前掲の Fig. 9 と Fig. 10 a) とを比較すると、衝突速度の増大に伴い Dc/d 値は増大する傾向が認められる。Fig. 11 に、 D/d 値および Dc/d 値と液滴衝突速度との関係を示す。これより、衝突速度の増加に伴い Dc/d 値の増加度合いが若干小さくなる傾向が認められるが、両値はほぼ平行して増大することがわかった。 Dc/d 値の増加度合いが減少するのは、一般に液体は高圧条件下ほど凝固しにくいことから、衝突速度の増大に伴い衝突圧力の増大する本液滴での凝固にもその傾向が反映されるためと考えられる。いずれにせよ、この場合にも放射状凝固域は凝固環境の影響を受けにくく、凝固環境の違いは主として中央凝固域の広がり現れるものと判断される。

以上の事実から、液滴の偏平を抑制する凝固の影響は、主として衝突点を含む中央凝固部の形成域にあることが示唆された。両領域は明らかに凝固組織形態が異なり、中央部は液滴衝突直後において基材面に直交する液滴流れの圧力が作用する条件の下で起こった凝固であるのに対し、放射状凝固部は基材面に沿った液滴流れとともに起こった凝固であると考えられる。ただしその詳細および偏平に対する凝固の影響の具体像は未だ不明であり、今後の検討を要する。

3.7 実験値と理論推定値との比較

以上の結果より、偏平率予測理論の構築には、粘性のみならず、表面張力、凝固およびぬれ性等を考慮する必要があることが分かった。そこでこれまでに提案されている理論曲線について、本実験での実験点との比較を通じ、修正点を検討した。

Fig. 12 に本実験で得た Sn の偏平率と衝突速度との関係を示す。また図中には、Sn 液滴温度を融点 (505 K) および Fe 基材温度を室温 (300 K) とした場合の Re のみで表した Madejski 曲線：a)、表面張力および凝固を考慮した Madejski 曲線：b)、および b) の Madejski モデルを改良した Rangel 曲線²¹⁾：c) を併記した。ここで、Rangel 曲線

は Madejski モデルの粘性エネルギー項の算出過程において円柱内軸方向速度成分の平均値を用いた点を改良し、その軸方向速度分布を考慮し得た曲線である。また、これらの理論式をまとめて Table 2 に示す。

これより、通常の Madejski 曲線 a) に表面張力および凝固の影響を考慮することにより得た曲線 b) は、低速度域では実験点に近く修正の効果があるが、速度の増大に伴い次第に乖離した。これは、曲線 b) は表面張力および凝固を考慮した結果、低速度域での表面張力の効果が働くものの、速度の増大に伴いその効果が相対的に弱まるためと考えられる。また、近似体内速度場の改良により得た曲線 c) は、高速度域において曲線 b) をやや下回った。これは、速度分布の考慮により、過大評価された偏平率を修正した結果と考えられる。ただし、これらはいずれも実験点との乖離が

Fig. 12 Relation between flattening ratio and droplets' velocity. a) Madejski's; $f(Re)$, b) Madejski's; $f(Re, We, Pe)$, c) Rangel's; $f(Re, We, Pe)$, d) Modified Rangel's; $f(Re, We, Pe, \theta)$, e) experimental curve.

Table 2 Theoretical equations for flattening ratio.

notation	parameters	theoretical equation
a)Madejski's equation	$D/d=f(Re)$	$D/d=1.2941Re^{0.2}$
b)Madejski's equation	$D/d=f(Re, We, Pe)$	$\frac{d}{dt}[\frac{\epsilon}{3}\xi^2\phi(\xi^2+\frac{6}{5}\phi^2)+\frac{\xi}{We}(\xi+2\phi)]+\frac{\xi^2\xi^2}{\phi Re}=0$
c)Rangel's equation	$D/d=f(Re, We, Pe)$	$\frac{d}{dt}[\frac{3\epsilon}{10}\xi^2\phi(\xi^2+\frac{11}{7}\phi^2)+\frac{\xi}{We}(\xi+2\phi)]+\frac{\xi^2\xi^2}{\phi Re}(\frac{3}{2}+\frac{72\phi^2}{5\xi^2})=0$
d)Modified Rangel's equation	$D/d=f(Re, We, Pe, \theta)$	$\frac{d}{dt}[\frac{3\epsilon}{10}\xi^2\phi(\xi^2+\frac{11}{7}\phi^2)+\frac{\xi}{We}(1-\cos\theta)]+\frac{\xi^2\xi^2}{\phi Re}(\frac{3}{2}+\frac{72\phi^2}{5\xi^2})=0$

$$\phi = \frac{1}{6\epsilon^3\xi^2} \left[1 - 6\epsilon^2 U_{Pi}^0 \sqrt{\frac{\epsilon}{Pe}} \left[\sqrt{t} + 2 \int_0^t \xi \sqrt{t-\tau} d\tau \right] \right], \epsilon=0.5, \xi=D/d$$

大きく、さらなる改良が必要である。

そこでc)に示した Rangel の式に、ぬれ性の効果の導入を試みた。表面張力の増減を考慮した¹³⁾ 表面エネルギー $E_s = \pi R^2(\gamma + \gamma_{is} - \gamma_s)$ に、平衡状態での表面張力の釣り合いを表す Young の式 ($\gamma_s = \gamma_{is} + \gamma \cos \theta_e$) を導入すると、表面エネルギー $E_s = \pi R^2 \gamma (1 - \cos \theta_e)$ を得る。ここに、 γ は液滴/空気界面、 γ_{is} はスプラット/基材界面、および γ_s は基材/空気界面の表面張力である。これにより得たスプラット/基材界面ぬれ性を平衡接触角として与えた改良 Rangel 曲線を求め、曲線 d) として図中に示した。ここに平衡接触角には、本実験で実測した接触角の値 (145度) を用いた。なお曲線の式は Table 2 に示した。その結果、曲線 d) は全般的に曲線 c) よりも若干実験点に近づいたが、依然として両者の間には乖離が認められた。

以上、本研究の範囲では、表面張力、凝固および界面ぬれ性を考慮した理論曲線 d) がもっとも実験点に近づいたが、依然として両者の間には乖離が認められ、さらなる改良が必要である。これには例えば、1 次元熱伝達とする凝固を偏平方向への 2 次元熱伝達を伴う凝固とすることや、静的ぬれではなく動的ぬれとすることなどの改善策が考えられる。また、実際のスプラット断面形状は必ずしも理想的な円盤状でない場合が多いことから、周辺が厚いリム状あるいは表面の不規則な凹凸形状などの現実に近い形状モデルでの解析が必要と考えられ、今後の検討課題である。

4. 結 言

溶射現象の模擬実験として自由落下金属液滴の偏平・凝固挙動を観察した。得られた結果を以下に示す。

1) 液滴の自由落下と溶射の相似性を、Re 数および Pe 数により検討した結果、両現象の流体的および熱的相似性は成立した。また両現象での凝固に要する無次元時間は一致し、凝固についても相似性が成立した。

2) 実験で得た偏平率と一般的に知られている Madejski 曲線との間には大きな乖離が認められた。液滴偏平挙動の解析的把握には、スプラット/基材界面ぬれ性および凝固等の影響を考慮する必要がある。

3) 同一基材での金蒸着膜の有無に伴う偏平率の差違を調査した結果、スプラット/基材界面ぬれ性は液滴の偏平に対し影響を及ぼすことが分かった。

4) スプラット/基材界面ぬれ性および落下距離一定の条件下で液滴偏平率と基材熱伝導率との関係を調査した結果、熱伝導性の高い基材ほど偏平率は小さいことが分かった。これより偏平に対し凝固は強く影響することが分かった。

5) スプラット裏面凝固組織は、方向性のない中央凝固域と、これを取りまく放射状凝固域との 2 つの領域から構成されることがわかった。

6) 中央凝固域直径 D_c と液滴原直径 d との比の基材熱伝導率および液滴衝突速度依存性を調査した結果、 D_c/d 値は基材熱伝導率の低下および衝突速度の増大に伴い増大し、また同値は D/d 値の変化傾向と平行して変化することがわかった。したがって、液滴偏平における凝固環境の違いは主として中央凝固域において現れ、周囲放射状凝固域は凝固環境の影響を受けにくいことが示唆された。

7) 表面張力、凝固および界面ぬれ性を考慮した改良 Rangel 曲線が実験点にもっとも接近したが、依然として両者の間には乖離が認められ、さらなる改良の必要性が示された。

本研究は、文部省科学研究費基盤研究(c)の援助によった。記してここに謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) H. Jones, J. Phys. D: Appl. Phys. 4 (1971) 1657.
- 2) J. Madejski, Int. J. Heat Mass Transfer., 19 (1976) 1009.
- 3) G. Trapaga and J. Szekely, Met. trans., 22B (1991) 901.
- 4) G. Trapaga et al., Met. trans., 22B (1992) 701.
- 5) M. Bertagnolli et al. Materials and design technology, PD-vol. 62 (1994) 199.
- 6) M. Bertagnolli et al. J. Thermal Spray Technology, 4 (1995) 41.
- 7) M. Pasandideh-Fard and J. Mostaghimi, Plasma Chemistry and Plasma Processing, 16-1 (1996) 83.
- 8) M. Pasandideh-Fard, Y.M. Qiao, S Chandra and J. Mostaghimi, Phys. Fluids, 8-3 (1996) 650.
- 9) 福本昌宏, 加藤信一郎, 岡根 功, 日本金属学会誌, 58-10(1994) 1191.
- 10) 福本昌宏, 加藤信一郎, 大渡智喜, 黄 亜輝, 日本金属学会誌, 59-11 (1995) 1178.
- 11) 黄 亜輝, 大渡智喜, 福本昌宏, 日本金属学会誌, 60-12(1996) 1215.
- 12) 福本昌宏, 林 宏道, 横山 剛, 溶射, 32-3 (1995) 149.
- 13) E.W. Collings, A.J. Markworth, J.K. McCoy and J.H. Saunders, J. Mat. Sci., 25 (1990) 3677.
- 14) T. Bennett and D. Poulikakos, J. Mat. Sci., 29 (1994) 2025.
- 15) 平田好則 他, 高温学会誌, 23 (1997) 222.
- 16) 日本金属学会編, 金属データブック (改正 3 版), 丸善 (1993) 16.
- 17) H.S. Carslaw and J.C. Jaeger, Conduction of Heat in solids, Oxford University Press, London (1959) 282.
- 18) D.J. Wang and S.T. Wu, Acta Metall. Mater., 42-12 (1994) 4029.
- 19) L. Cheng, Ind. Eng. Chem., Process Des. Dev., 16-2 (1977) 192.
- 20) 野城 清, 岩本信也, 荻野和巳, 日本金属学会会報, 31 (1992) 278.
- 21) J.P. Delplanque and R.H. Rangel, J. Mat. Sci., 32 (1997) 1519.