

回転水中紡糸における金属ジェットの軌跡の検討

高松, 洋
九州大学機能物質科学研究所

曹, 奎常
九州大学大学院総合理工学研究科

本田, 博司
九州大学機能物質科学研究所

<https://doi.org/10.15017/7852>

出版情報 : 九州大学機能物質科学研究所報告. 10 (1), pp.61-66, 1996-11-12. 九州大学機能物質科学研
究所

バージョン :

権利関係 :

回転水中紡糸における金属ジェットの軌跡の検討

高松 洋・曹 奎 常*・本田 博 司

Locus of Molten Jet in the In-Rotating-Water Spinning

Hiroshi TAKAMATSU, Kyu-Sang CHO and Hiroshi HONDA

Metal wires of Pb and $\text{FeSi}_{7.5}\text{B}_{15}$ were produced by the In-Rotating-Water Spinning Method. The locus of molten jet in the water layer was measured from the photograph for a variety of spinning conditions, *i. e.* drum velocity, jet ejection velocity, incidence angle and nozzle diameter. It was compared with the locus predicted with taking into account of various forces acting on the jet in the water. Experimentally obtained locus agreed well with the prediction for $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{17.5}\text{B}_{15}$ but disagree for Pb when marked ripples were formed on the wire surface.

1. 緒 言

アモルファス金属細線の製造法である回転水中紡糸法は、回転するドラムの内側に遠心力により形成した回転水層中に熔融金属ジェットを噴射し、急冷凝固させて細線を製造する方法である。しかし、このプロセスにおける流動・伝熱特性が明らかでないため、所望の細線を得るには試行錯誤による製線条件のノウハウに頼らざるを得ないのが現状である。

著者ら⁽¹⁾は、低融点の Pb, Zn および磁性材料として用いられる $\text{FeSi}_{7.5}\text{B}_{15}$ を用いた紡糸実験を系統的に行い、製線条件が細線の形態に及ぼす影響を調べた。しかし、得られた結果とその原因についての考察はほとんどが推測にすぎず、さらに種々のデータの蓄積と多方面からの考察が必要である。本報では、水中での金属ジェットの写真撮影から得られる軌跡について検討する。もし、ジェット周りの伝熱特性が局所的なジェットと水流の角度や相対速度などで決定され、その予測が可能になれば、水中での軌跡の予測ができて初めてこのプロセスのシミュレーションが可能となる。Abe⁽²⁾らはジェットに対する水の抗力のみを考慮して軌跡を計算し、Pb-Sb 合金を用いた実験結果と比較した。また、島岡-大中⁽³⁾も同じ検討を行っている。

しかし、いずれも非常に限られた条件での結果のため、細線の製造プロセスの物理的解釈に役立つ結果は得られていない。したがって、本報では、前報⁽¹⁾と同様、低融点の Pb と実用合金の $\text{FeSi}_{7.5}\text{B}_{15}$ の2種類に対して軌跡に及ぼす製線条件の影響を明らかにするとともに、製造された細線の形状との関係について検討する。また、ジェットに働く種々の力を考慮した解析から軌跡を予測し実験結果と比較する。

主 な 記 号

d_j	: ジェット直径	[mm]
d_n	: ノズル直径	[mm]
g	: 重力加速度	[m/s ²]
l	: ドラムの底面に沿った距離	[mm]
v_d	: ドラムの周速	[m/s]
v_j	: ジェット速度	[m/s]
W	: 噴射量	[g]
δ	: 水面からのジェットの深さ	[mm]
ε	: 細線の真円度 = (短径/長径)	[-]
ρ	: 熔融金属の密度	[kg/m ³]
ρ_w	: 水の密度	[kg/m ³]
ϕ	: ジェットの水面への入射角	[°]
ω	: ドラムの回転数	[rpm]

添字

0 : ジェット入射時

受理日 1996年8月1日

本論文を名誉教授 竹下 齊先生に献呈する。

*九州大学大学院総合理工学研究科

2. 実験装置および実験方法

実験装置および方法は前報⁽¹⁾と同じである。図1に実験装置の写真を示す。回転ドラムは内径 500mm、幅 100mm のステンレス製で、その前面および背面の一部はアクリル製で水中でのジェットの様子が観察できるようにしてある。これをモータで回転させた後、内側に深さ 15mm の水層を形成させた。長さ 120mm、外径 9mm のガラス製容器 (FeSi_{7.5}B₁₅ 合金では石英ガラス、Pb の場合にはパイレックスガラス) に試料をいれ、アルゴンガス雰囲気中で高周波誘導加熱により溶解し所望の温度にした後、先端のノズルからアルゴンガスの背圧により噴射した。噴射時間は 4~7sec である。また、ノズル先端と水面との距離は 10mm とした。融解温度 T_f は、Pb の場合には容器内に挿入した K シース熱電対で測定した温度、FeSi_{7.5}B₁₅ 合金では容器上端にとりつけた二色放射温度計で測定した熔融金属表面の温度で定義した。実験条件を表1に示す。

水中のジェットの軌跡は、デジタルカメラを用いてシャッタースピード 1/1000 で撮影した映像をコンピュータに取り込み、デジタイザで座標を求めた。

3. 噴射速度の測定

前報⁽¹⁾では、熔融金属ジェットの噴射速度をノズル直径 d_n を用いて次式で定義した。

$$v_{jn} = \frac{4W}{\pi d_n^2 \rho \Delta t} \quad (1)$$

ここに、 W は噴射量、 ρ は熔融金属の密度、 Δt はビデオカメラを用いて測定した噴射時間である。しかし、実際の噴射速度はノズル出口での縮流のためこれより大きい可能性が高い。したがって、本研究では以下の方法でジェット速度の測定を行った。

(1) ノズルから大気中鉛直下向きに熔融金属を噴射する。

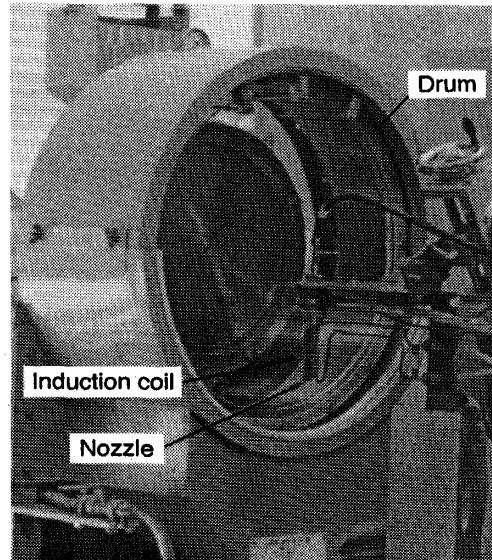


Figure 1 In-Rotating-Water Spinning Equipment

(2) ノズル先端より 10mm 下方の位置において急速に回転するカッターの刃でジェットを瞬間的に切断する。

(3) ジェットの様子を高速度ビデオ (372 フレーム/秒) で撮影する。

(4) 切断されたジェットの終端の移動距離と時間より平均速度を求める。

図2(a)および2(b)はこの方法で求めた噴射速度 v_{j0} と式(1)から算出した v_{jn} の関係を示している。 v_p は本実験条件内ではノズル直径にかかわらず

$$v_{j0} = C v_{jn} \quad (2)$$

で近似的に表され、FeSi_{7.5}B₁₅ の場合には $C=1.14$ 、Pb の場合には $C=1.1$ である。なお、大中ら⁽⁴⁾は製造された細線の断面積を用いて、また、Ohnaka ら⁽⁵⁾はバックライトで撮影した空中のジェット写真から測定した直径を用いて噴射速度を求めている。

Table 1 Experimental conditions

		Pb	Fe _{77.5} Si _{7.5} B ₁₅
Rotational speed of drum ω	[rpm]	200~300	225~325
Drum velocity v_d	[m/s]	5.2~7.9	5.8~8.5
Nozzle diameter d_n	[mm]	0.1, 0.2	0.2, 0.25
Ejection pressure p	[MPa]	0.1~0.4	0.2~0.4
Jet ejection velocity v_j	[m/s]	3.9~7.9	7.2~11.4
Incidence angle ϕ	[°]	30, 60	60
Melt temperature T_f	[°C]	360	1210

4. ジェット軌跡の計算

図3に計算モデルを示す。速度 v_t の水に対して角度 α をなす速度 v_j 、直径 d_j のジェットの一部 (微小長さ ds) を考えると運動方程式は

$$F = \left(\frac{\pi}{4} d_j^2 r ds \right) \cdot a \quad (3)$$

となる。ここに F および a は微小要素に働く力および加速度である。 F は次の4つの力の合力と考えられる。

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho_t (v_t - v_j \sin \alpha) |v_t - v_j \sin \alpha| d_j ds \quad (4)$$

$$F_G = \left(\frac{\pi}{4} d_j^2 ds \right) (\rho - \rho_t) g \quad (5)$$

$$F_L = \frac{\pi}{4} d_j^2 ds \rho_t r \omega^2 \quad (6)$$

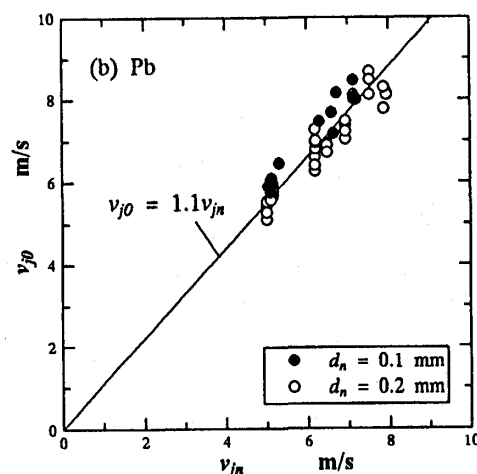
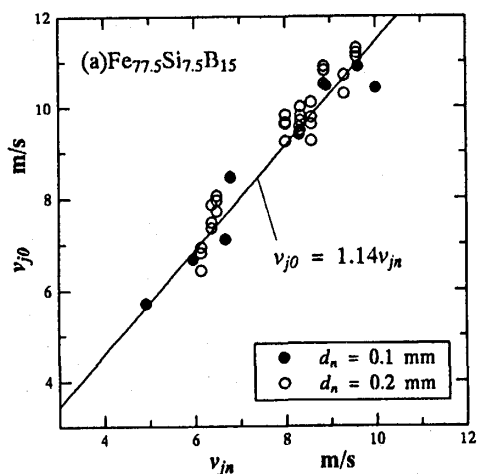


Figure 2 Comparison of measured and estimated jet velocities; (a) FeSi_{7.5}B₁₅, (b) Pb

ここに、 F_D はジェットに対して垂直な水の速度成分による抗力による力である⁽⁶⁾。 C_D は抗力係数を表わす。 C_D に対しては一様流中に置かれた円柱まわりの抗力係数⁽⁶⁾にもとづいた Re 数の関数を仮定した。また、 d_{je} は水流の方向から見たジェットの幅であり、ジェットが水中に突入した直後に偏平になる影響を考慮した。 F_G は微小要素に働く重力を示す。また、 F_L は回転

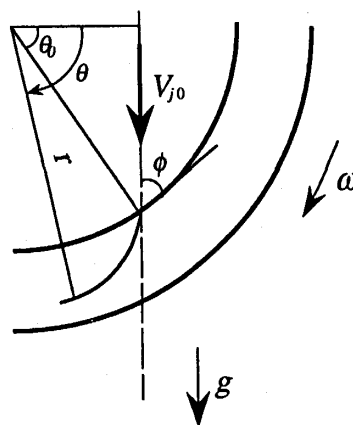
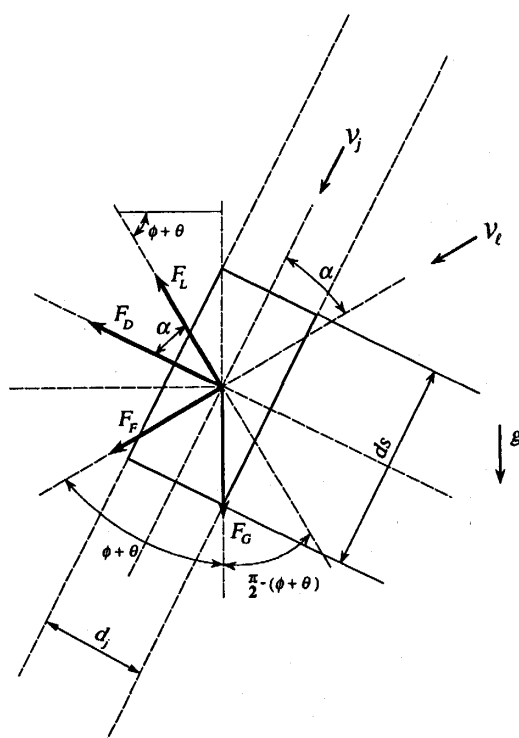


Figure 3 Physical model and coordinate system

水層に働く遠心力により生ずる圧力勾配に基づく浮力である。式(4)~(6)の力を考慮して式(3)を極座標で表わすと r 方向および θ 方向の運動方程式はそれぞれ以下のように表わされる。

$$F_c \sin(\phi + \theta) - F_L - F_D \cos \alpha = \left(\frac{\pi}{4} d_j^2 \rho ds \right) \frac{dv_r}{dt} \quad (7)$$

$$F_c \cos(\phi + \theta) + F_D \sin \alpha = \left(\frac{\pi}{4} d_j^2 \rho ds \right) \frac{dv_\theta}{dt} \quad (8)$$

ここに、 v_r および v_θ はそれぞれジェットの r 方向および θ 方向の速度成分であり、 v_j と次式の関係をもつ。

$$v_j = \sqrt{v_r^2 + v_\theta^2} \quad (9)$$

また、ジェットに対する連続の式より

$$d_j = \sqrt{\frac{v_{j0}}{v_j}} d_{j0} \quad (10)$$

が得られる。ここに、 d_{j0} はジェットの入射部の直径である。ジェットの扁平を考慮するため断面をだ円形と仮定し、その短径と長径の比を真円度 ε で定義すると

$$d_{je} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} d_j \quad (11)$$

となる。一方、水の速度分布に対して

$$v_t = r\omega \quad (12)$$

を仮定する。式(11)、(12)を式(7)、(8)に代入すると、それぞれ次式が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{dv_r}{dt} = & \left(1 - \frac{\rho_t}{\rho} \right) g \sin(\phi + \theta) - \frac{\rho_t}{\rho} r \omega^2 \\ & - \frac{2}{\pi} \frac{1}{d_j \sqrt{\varepsilon}} \frac{\rho_t}{\rho} C_D r^2 \omega^2 \sin^2 \alpha \cos \alpha + \frac{v_\theta^2}{r} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{dv_\theta}{dt} = & \left(1 - \frac{\rho_t}{\rho} \right) g \cos(\phi + \theta) \\ & + \frac{2}{\pi} \frac{1}{d_j \sqrt{\varepsilon}} \frac{\rho_t}{\rho} (C_D r^2 \omega^2 \sin^3 \varepsilon) - \frac{v_r v_\theta}{r} \end{aligned} \quad (14)$$

式(13)、(14)と次の三つの式

$$\frac{dr}{dt} = v_r \quad (15)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{v_\theta}{r} \quad (16)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{v_r}{v_\theta} \right) \quad (17)$$

を初期条件

$$t=0 \text{ で } v_r = v_{j0} \sin \phi \quad (18)$$

$$v_\theta = v_{j0} \cos \phi \quad (19)$$

$$r = r_0 \quad (20)$$

$$\theta = \theta_0 \quad (21)$$

$$\alpha = \phi \quad (22)$$

の元に連立して解くとジェットの軌跡が求められる。

5. 実験・計算結果および考察

図4に水中の $\text{FeSi}_{7.5}\text{B}_{15}$ ジェットの様子を示す。ジェットは水層に突入すると、水の流れにより直ちに曲げられ、約 30 mm 以上下流ではジェットの進行方向はドラムの回転方向に非常に近くなっている。また、水面近くのジェットの後流には、水の剥離によって生ずる空気のシート状のキャビティが形成されている。

図5(a)および(b)は $\text{FeSi}_{7.5}\text{B}_{15}$ の軌跡を水面からの深さ δ とドラムの底面に沿った距離 l の関係で示している。図5(a)は $v_j = 6.5 \text{ m/s}$ で $v_d = 6.5, 7.9 \text{ m/s}$ 、図5(b)は $v_j = 8.8 \text{ m/s}$ で $v_d = 6.5, 8.5 \text{ m/s}$ の場合の結果であり、これらは実験を行った v_j と v_d の最大と最小の組み合わせの四条件に対応する。○印は実験結果を、点線は $\varepsilon = 1$ と仮定して得られた計算結果を示す。ジェットは v_j が等しいければ v_d が小さいほど、また v_d が等しいければ v_j が大きいほど水中深く突入する。図中の矢印は、キャビティがジェットから離れる点を示している。この点の深さは v_d が小さい方が深い。これに対して開水路を流れる流体中に垂直円柱を立てた場合には円柱の後部に生ずる空気のキャビティの深さは流速が大きいほど深くなる。したがって、キャビティの付着と剥離はジェットまわりの蒸気膜およびジェットと水流の相対速度の影響を受けてい



Figure 4 Photograph of melt jet in the water layer; $\text{FeSi}_{7.5}\text{B}_{15}$, $d_n = 0.2 \text{ mm}$, $v_j = 8.5 \text{ m/s}$, $v_d = 7.9 \text{ m/s}$

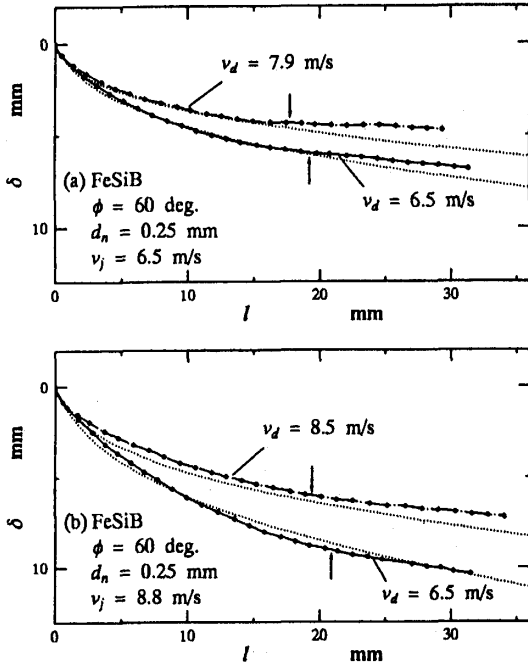


Figure 5 Locus of melt jet of $\text{FeSi}_{7.5}\text{B}_{15}$;
(a) $v_j = 6.5 \text{ m/s}$, (b) $v_j = 8.8 \text{ m/s}$

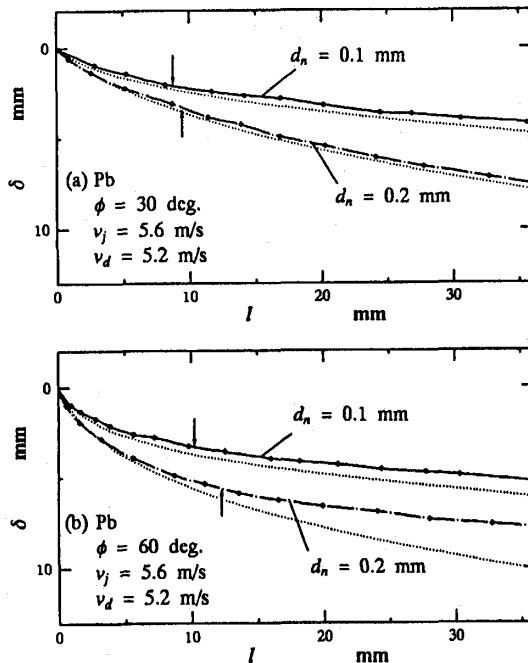


Figure 6 Locus of melt jet of Pb;
(a) $\phi = 30^\circ$, (b) $\phi = 60^\circ$

るものと考えられる。図 5 から明らかなようにいずれの条件でも軌跡に関する実験結果と計算結果の一致は良い。これは $d_n = 0.2 \text{ mm}$ の場合も同様であった。

図 6 (a)および(b)はそれぞれ $\phi = 30^\circ$ および $\phi = 60^\circ$ の場合の Pb に対する結果を d_n をパラメータとして示している。いずれの場合も d_n が大きい方がジェットは深く突入する。 $\phi = 30^\circ$ の図 6 (a)の場合には実験結果と計算結果の一致が比較的良好のに対し、 $\phi = 60^\circ$ 場合には特に $d_n = 0.2 \text{ mm}$ で計算結果の方がかなり深い軌跡を示している。

前報⁽¹⁾の結果によると、得られた細線の真円度 ϵ は $\text{FeSi}_{7.5}\text{B}_{15}$ の場合には v_j および v_d の値にかかわらずほとんどが 0.9 以上の高い値を示し、図 5 (a),(b) に示す条件で得られた細線の場合、 $\epsilon = 0.93 \sim 0.96$ であった。一方、Pb の場合には、 ϵ はジェットの突入時におけるウェーバ数 $We = \sigma / (v_j^2 \sin^2 \phi d_n)$ (表面張力によるジェットの内圧とジェットの垂直方向の水の速度分による動圧の比) と強い関係を示し、 We が大きいほど ϵ は大きい値を示した。図 6 (a)の条件では $d_n = 0.1 \text{ mm}$ で $\epsilon = 0.86$, $d_n = 0.2 \text{ mm}$ では $\epsilon = 0.78$ であった。また、図 6 (b)に示す $\phi = 60^\circ$ の場合には、細線はより偏平になり、 $\epsilon = 0.71$ と $\epsilon = 0.48$ であった。さらに、表面には d_n とほぼ同程度の間隔で顕著なリップルが形成されていた。以上の結果より、Pb の $\phi = 60^\circ$ の場合のみ実験で得られた軌跡が計算結果よりかなり浅くなるのは、細線の真円度が小さく(偏平率が大きく)しかもリップルがあるため、水流による抗力がかなり大きくなることが原因と考えられる。ところで、開水路中に垂直に置かれた円柱または平板に働く抗力から得られた平均の抗力係数はそれぞれ次式で表わされる⁽⁷⁾。

$$C_D = 0.5 + \frac{gh}{v^2} \quad 10^3 < \text{Re} < 10^5 \quad (23)$$

$$C_D = 0.8 + \frac{gh}{v^2} \quad 10^3 < \text{Re} < 10^5 \quad (24)$$

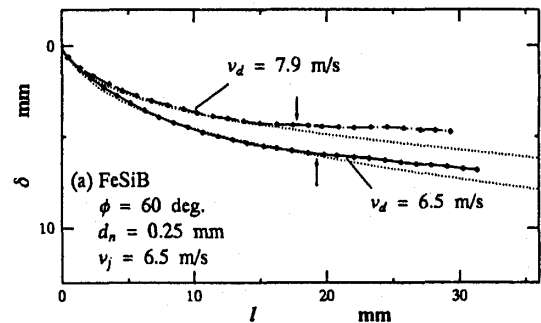


Figure 7 Locus of melt jet of $\text{FeSi}_{7.5}\text{B}_{15}$, calculated with $C_D = 0.8$

ここに、 v は流速、 h は水路中に垂直に置かれた円柱または平板の水面からの深さである。上式によると本実験で得られたキャビティ深さの平均値 5mm 程度ではそれぞれ $C_D = 0.5$ と $C_D = 0.8$ である。この値は本計算で得られた値 $C_D = 1.2 \sim 1.3$ よりかなり小さい。また、 $\text{FeSi}_{7.5}\text{B}_{15}$ の場合にも、 We は Pb の場合と同程度であるため、ジェット入射直後はやはり偏平になっていると考えられる。図 7 は図 5(a) の条件の場合に $C_D = 0.8$ として計算した場合の結果を実験値と比較した例である。この場合、 $\varepsilon = 0.6$ とすると実験値と比較的良好一致する。以上のことから総合的に考えると、 $\text{FeSi}_{7.5}\text{B}_{15}$ および $\phi = 30^\circ$ の Pb 場合に実験結果と計算結果が比較的良好一致するのは、一様流中の C_D の値に比べてキャビティが形成された場合の C_D の値が小さくなる効果と、ジェット入射直後に水の抗力のためにジェットが偏平になり抗力が増加する結果が相殺しあった結果であろうと考えられる。そして、 $\text{FeSi}_{7.5}\text{B}_{15}$ の場合に凝固後の細線がほとんど $\varepsilon > 0.9$ であるのは、熱容量が Pb より大きく、凝固に要する時間が長いこと、水流にほぼ平行になった所で凝固することによると推測される。

6. 結 言

(1) $\text{FeSi}_{7.5}\text{B}_{15}$ および $\phi = 30^\circ$ の Pb の軌跡は、本解析による計算結果と比較的良好一致する。しかし、 $\phi = 60^\circ$ の Pb の場合には実験の軌跡の方がかなり浅くなる。

(2) Pb の $\phi = 60^\circ$ の場合、実験結果が計算結果よりかなり浅い軌跡を示すのは、細線の偏平率が大きく、しかも細線の表面にリップルが形成されるため、水流による抗力がかなり大きくなるのが原因と考えられる。

(3) $\text{FeSi}_{7.5}\text{B}_{15}$ の場合、水層に突入した直後は偏平になるが、熱容量が大きく凝固に要する時間が長いこと、水流にほぼ平行になった所で凝固してほぼ円形の細線が得られるものと推測される。

最後に、実験に協力していただいた元九州大学大学院総合理工学研究科学生の榎寺啓太君（現（株）ジャパンエナジー）に感謝の意を表す。

文 献

- (1) 高松洋, 曹奎常, 山城光, 本田博司, 九州大学機能物質科学研究所報告, 9-2 (1995), 13.
- (2) Abe, Y., Miyazawa, K. and Nakamura, M., Trans. ISIJ, 27 (1987), 929.
- (3) 島岡三義, 大中逸雄, 日本金属学会誌, 60-4 (1996), 420.
- (4) 大中逸雄, 福迫達一, 大道徹太郎, 日本金属学会誌, 45-7 (1981), 751.
- (5) Ohnaka, I., Fukusako, T., Ohmichi, T., Masumoto, T., Inoue, A. and Hagiwara, M., Proc. 4th Int. Conf. on Rapidly Quenched Metals (1981), 31.
- (6) Houser, S. F., Fluid-Dynamic Drag, (1959), 3-9.
- (7) Houser, S. F., Fluid-Dynamic Drag, (1959), 10-15.