

回転水中紡糸法で製造された金属細線の形態に及ぼす製線条件の影響

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

山城, 光
九州大学機能物質科学研究所

本田, 博司
九州大学機能物質科学研究所

<https://doi.org/10.15017/6667>

出版情報：九州大学機能物質科学研究所報告．9 (1), pp.13-20, 1995-11-15. 九州大学機能物質科学研究所

バージョン：

権利関係：

回転水中紡糸法で製造された金属細線の形態に 及ぼす製線条件の影響

高松 洋・曹 奎常*
山城 光・本田 博司

Effect of Spinning Condition on the Shape of Metal Wire Produced by the In-Rotating-Water Spinning Method

Hiroshi TAKAMATSU, Kyu-Sang CHO, Hikaru YAMASHIRO
and Hiroshi HONDA

Metal wires of Pb, Zn and $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ were produced by the In-Rotating-Water Spinning Method. The effects on the shape of wire of drum velocity (5.2-8.5m/s), jet ejection velocity (3.5-10.0m/s), incidence angle (30, 45, 60 deg) and nozzle diameter (0.1 and 0.2 mm) as well as the kind of metals were examined. Pb showed the best spinnability among the tested metals, although the cross section was relatively flat and marked ripples were formed on the wire surface when the incidence angle and jet velocity were relatively large. A long, straight $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ wire that had smooth surface and round cross-section was obtained with a 0.2-mm-dia. nozzle when the jet velocity and the drum velocity were almost the same. The $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ wire produced with a 0.1-mm-dia. nozzle however showed the shape like a string of beads.

1. 緒 言

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された回転水層中に熔融金属ジェットを噴射し、急凝固させて金属細線を製造する方法である。この方法では、冷却材として回転水層を用いるため、円形断面を有する高品位の連続細線の製造が可能であり、優れた強度材または磁性材であるアモルファス金属細線が製造されている⁽¹⁾。しかし、製線プロセスが高速であるために、細線の特性に最も影響を及ぼす冷却速度（凝固速度）を決定する細線まわりの流動・伝熱

特性を明らかにすることが困難である。したがって、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。

回転水中紡糸法で得られた金属細線の性質（機械的、磁氣的、電氣的）に関する研究は比較的多く行われているが、製造プロセスに主眼をおいた研究は非常に少ない。大中ら⁽²⁾はPbを用いた実験により、ドラムの回転速度、金属ジェットの噴射圧、ジェットの入射角等の紡糸条件が細線の性状、連続性、扁平率に及ぼす影響を検討し、はじめてこの方法で金属細線が得られることを明らかにした。また、Ohnakaら⁽³⁾およびMasumotoら⁽⁴⁾は、Fe系、Pd系およびCo系合金細線を製造し、アモルファス細線を得る為の紡糸条件を明らかにした。これらの一連の研究をもとにしたOhnaka⁽⁵⁾の解説には良好な細線を得るための紡糸条件がま

受理日 1995年6月30日

本論文を名誉教授 小林宏先生に献呈する。

*九州大学大学院総合理工学研究科

とめられている。その後、Abe⁽⁶⁾らは Pb-Sb 合金の実験を行い、細線の連続性および扁平率と紡糸条件との関係を明らかにするとともに水層中のジェット軌跡に関する検討を行った。そのほかの研究には Liu ら⁽⁷⁾ および Heyder-Frommeyer⁽⁸⁾ による同様の実験がある。以上の研究は、良好な連続細線を得るための基礎研究であるが、その結果は低融点金属と高融点の実用合金で異なり、また、各操作パラメータについて系統的に実験を行ったものではないために、現象の一般的理解には必ずしもつながっていない。

著者らは回転水中紡糸法における製線過程の伝熱および流動現象を解明し、高品質の金属細線の製造に寄与することを目的として研究を行っている。さらに、伝熱に関する基礎研究として水平細線の浸漬急冷実験を行い、冷却特性を明らかにするとともに、塩類水溶液によって顕著な伝熱促進が得られることを明らかにした^{(9),(10)}。本報は、製造過程に関する研究の第1報として、低融点の Pb, Zn および磁性材料として用いられる $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ を用いた実験を行い、製線条件が細線の形態に及ぼす影響を調べた結果について報告する。

主な記号

- d_n : ノズル直径 [mm]
 ν_d : ドラムの周速 [m/s]
 ν_j : ジェットの噴射速度 [m/s]
 ϵ : 細線の真円度 = (短径/長径) [-]
 ϕ : ジェットの水面への入射角 [°]
 λ : リップルのピッチ [mm]

2. 実験装置および実験方法

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(FeSiB合金では石英ガラス、その他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達した後、先端のノズルからアルゴンガスの背圧により噴射

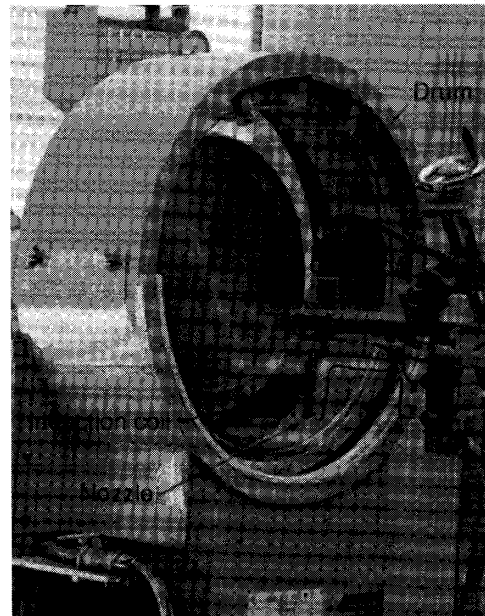
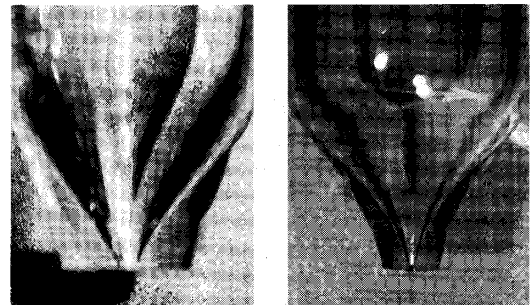


Fig. 1 In-Rotating-Water Spinning Equipment



(a) Glass nozzle (b) Quartz nozzle

Fig. 2 Close-up of nozzles

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。図2にノズルを示す。溶解温度 T_j は、Pb および Zn の場合には容器内に挿

Table 1 Experimental conditions

	Pb	Zn	$Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$
Rotational speed of drum ω_d	[rpm] 200~300	200~300	225~325
Drum velocity ν_d	[m/s] 5.2~7.9	5.2~7.8	5.8~8.5
Nozzle diameter d_n	[mm] 0.1, 0.2	0.2	0.1, 0.2
Ejection pressure ρ	[MPa] 0.1~0.4	0.05~0.4	0.2~0.4
Jet ejection velocity ν_j	[m/s] 3.5~7.1	3.6~10.1	6.3~10.0
Incidence angle ϕ	[°] 30, 45, 60	30, 60	45, 60
Melt temperature T_j	[°C] 360	450	1210
Melt superheat ΔT_j	[K] 33	30	55

Table 2 Physical properties of Pb, Zn and Fe_{77.5}Si_{7.5}B₁₅

	Pb	Zn	Fe _{77.5} Si _{7.5} B ₁₅
Liquidus temperature T_s [°C]	327	420	1155
Latent heat of solidification h_s [kJ/kg]	25	102	267* ¹
Density ρ [kg/m ³]	10678	6575	6448
Specific heat capacity c [kJ/(kgK)]	0.152	0.481	0.795* ¹
Thermal conductivity k [W/(mK)]	15.4	49.5	40.3* ¹
Viscosity μ [mPas]	2.65	3.85	11.3* ²
Surface tension σ [mN/m]	468	782	1427

*¹: value for Fe; *²: value for Fe₇₈Si₉B₁₃

入したKシー思熱電対で測定した温度, FeSiB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溶湯表面の温度で定義した。ジェットの噴射速度 v_j は次式で求めた。

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

ここに, W は噴射量, d_n はノズル直径, 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。実験条件を表1に示す。また, 参考のため表2に熔融状態のPb, ZnおよびFe_{77.5}Si_{7.5}B₁₅の主要な物性値を示す。ただし, Fe_{77.5}Si_{7.5}B₁₅の融点, 密度および表面張力は測定値, 粘度はFe₇₈Si₉B₁₃の文献値⁽¹¹⁾, その他はFeおよびPb, Znの文献値^{(12)~(14)}である。

3. 実験結果および考察

3.1 細線の連続性

図3は得られた細線の長さの分類結果をドラムの周速 v_d とジェットの噴射速度 v_j の関係で示しており,

図3(a)~(e)はPbの場合, 図3(f), (g)はZnの場合, 図3(h)~(j)はFe_{77.5}Si_{7.5}B₁₅の場合である。図中の丸印(○, ⊙, ●)はほとんど破断のない連続線が, 菱形(◇, ◆)は1m以上の連続線が得られたことをそれぞれ示し, 三角印(△, ▲)は0.1~1m, バツ印(×)は0.1m以下のものしか得られなかったことを示す。なお, 外形が同一の3種類の記号(白抜き, 二重, 黒塗り)は細線の性状の違いを表している(3.2節参照)。また, 図中には v_d と v_j の関係を表す線もいくつか示している。いずれの場合も $v_j \approx v_d$ の領域でしか連続線が得られない。これは, 図4(a), (b)に示すPbジェットの水中での様子から明らかなように, $v_d > v_j$ の場合にはジェットが水に引っ張られて破断し, 逆に $v_d < v_j$ の場合にはジェットが座屈して折れ曲がるのが原因である。金属の種類によらず入射角 $\phi = 30^\circ$ のほうが $\phi = 60^\circ$ より連続線が得られる範囲がやや広い。また, 連続線の得られる範囲はPb, Fe_{77.5}Si_{7.5}B₁₅, Znの順に狭くなっている。Znの場合, $\phi = 60^\circ$ では1m以上の連続線は全く得られておらず, $\phi = 30^\circ$ で

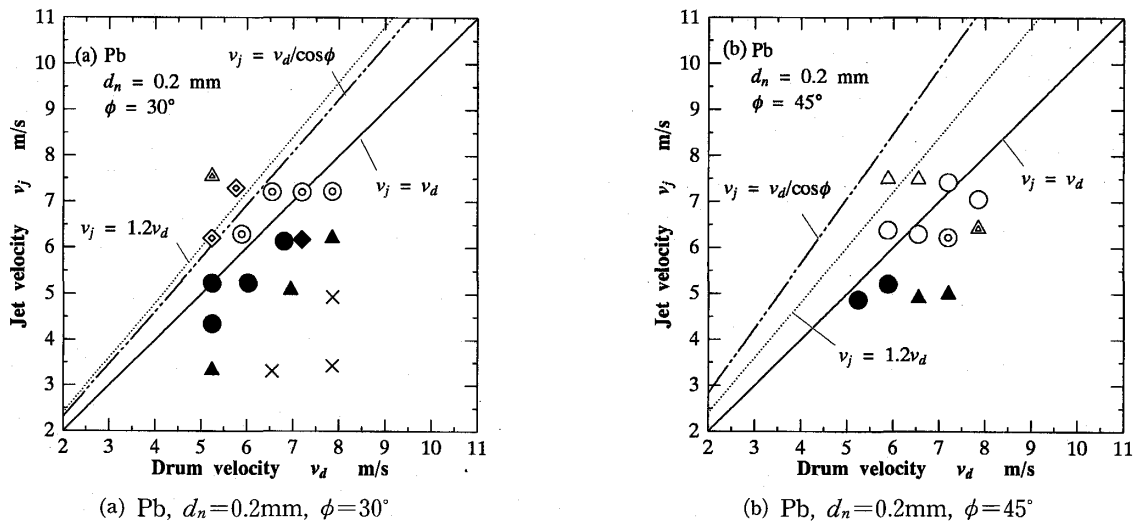


Fig. 3 Effect of drum and jet velocities on the wire length
(○⊙●: whole continuous wire, ◇◆◆: over 1m, △▲▲: 0.1~1m, ×: under 1m)

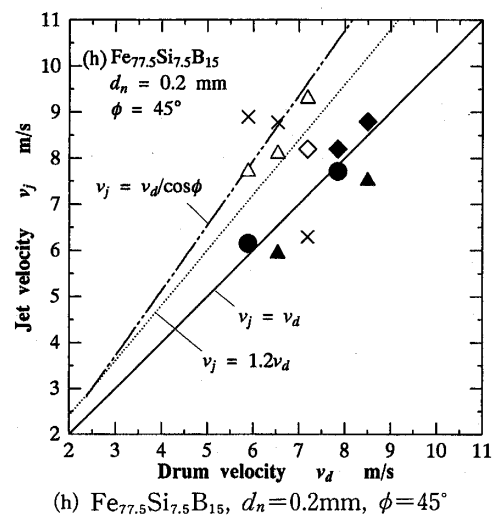
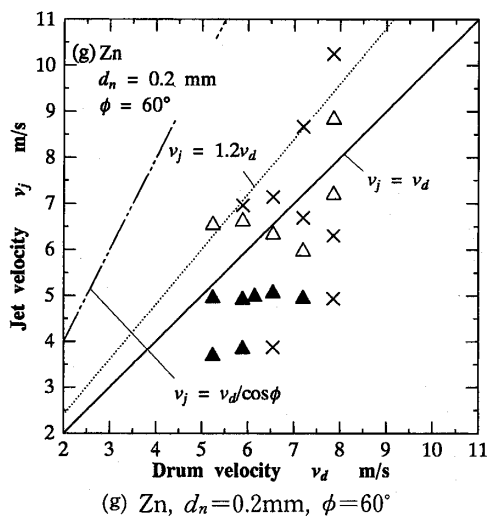
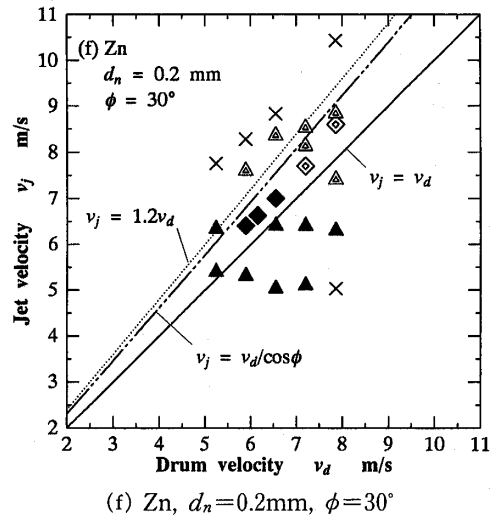
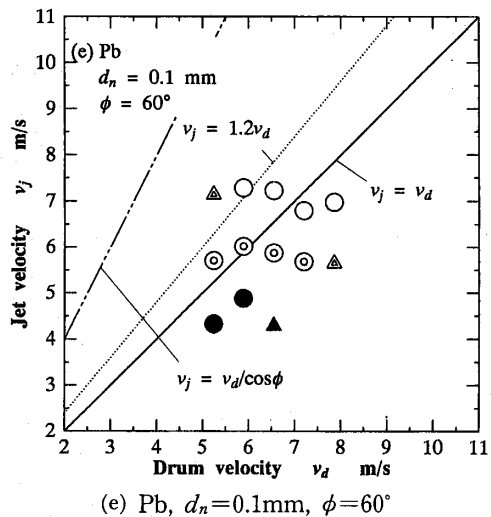
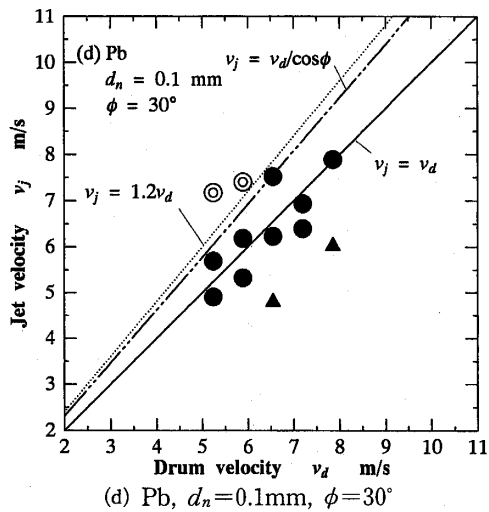
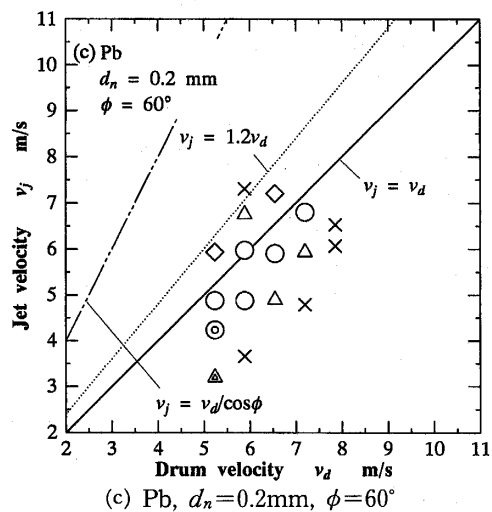


Fig. 3 (continued)

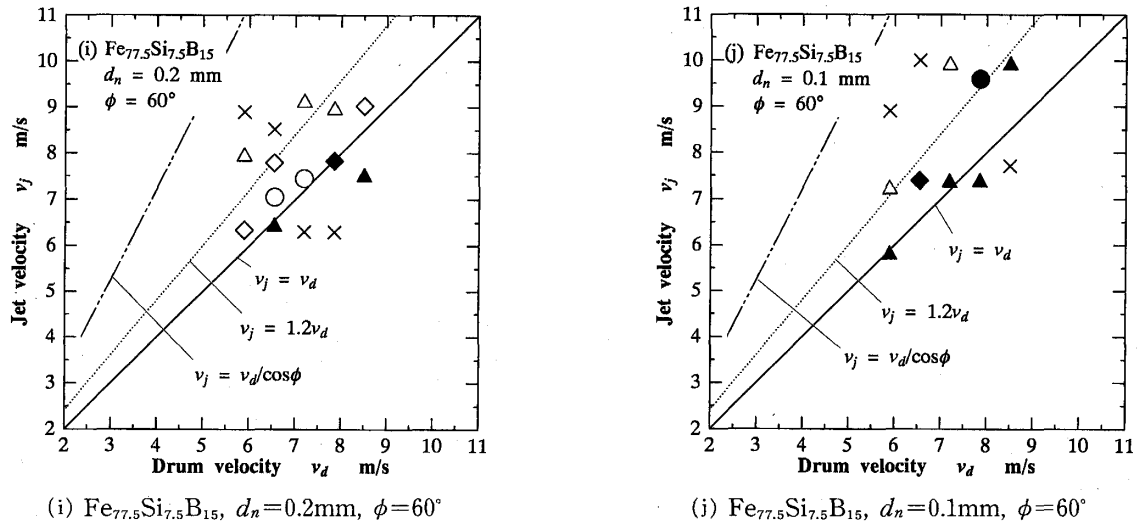
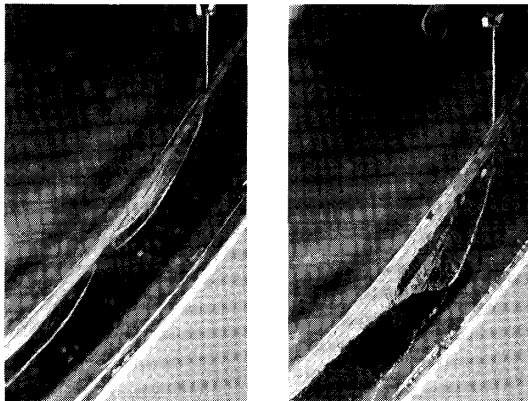


Fig. 3 (continued)



(a) $v_d = 7.9 \text{ m/s}, v_j = 4.9 \text{ m/s}$ (b) $v_d = 5.2 \text{ m/s}, v_j = 7.6 \text{ m/s}$
 Fig. 4 Behavior of Pb jet in rotating water layer ($\phi = 30^\circ$)

も線の途中に一旦破断したものが再度くっついたような連結部が多数観察された。このように Zn の連続性が Pb よりはるかに劣るのは、表 2 に示すとおり凝固潜熱が Pb の約 4 倍(体積あたりでは約 2.5 倍)、比熱が約 3 倍のため凝固に要する時間が長いこと、および表面張力が 1.7 倍、密度が 0.6 倍なのでジェットの擾乱の

成長速度が速いことが主な原因と考えられる(大気中に噴射されたジェットの擾乱の成長速度は $(\sigma/\rho d^3)^{1/2}$ に比例する⁽¹⁵⁾)。また、 $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$ は凝固潜熱、比熱、表面張力がいずれも Zn より大きいにもかかわらず Zn より連続線が得られやすいのは、粘度が大きく、かつ Si の添加により酸化膜が形成しやすくなった⁽⁵⁾ が主な原因と推測される。Pb の場合、ノズル直径 $d_n = 0.1 \text{ mm}$ のほうが 0.2 mm より連続線が得られやすい。これは凝固に要する時間が短いからであろう。これに対して、 $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$ の場合には $d_n = 0.2 \text{ mm}$ のほうが連続線になりやすい。これは Pb の場合より凝固時間が長いので、その間のジェットの擾乱の成長の影響のほうが支配的であるためと考えられる。

細線の連続性に関しては、これまでに大中ら⁽²⁾および Abe ら⁽⁶⁾が同様の分類を行っている。表 3 に彼らの実験条件を示す。そして、大中らは $1 < v_j/v_d < (1/\cos\phi)$ 、Abe らは $1 < v_j/v_d < 1.2$ の範囲で連続線が得られると結論づけている。図 3 にはこれらの範囲を示しているが、入射角が大きい場合には大中らの条件は

Table 3 Experimental conditions of previous studies on wire continuity

		Ohnaka <i>et al.</i>	Abe <i>et al.</i>
Metal		Pb	Pb-Sb Alloy
Drum diameter	[mm]	305	300
Drum velocity	[m/s]	3.3~9.1	3~10
Nozzle diameter	[mm]	0.2, 0.5	0.1~0.14
Incidence angle	[°]	53	60
Melt temperature	[°C]	350	-
Melt superheat	[K]	23	150

明らかに広すぎるようである。また、細線の破断のメカニズムを考えると、最も重要なパラメータは v_j/v_d ではなく $v_j - v_d$ であると考えられる。本報では v_j を式(1)で定義しているが、大中ら⁽²⁾は凝固細線の平均直径を式(1)の d_n に代入した式によって、また Abe ら⁽⁶⁾は運動量の式によって v_j を求めている。したがって、求められた v_j の値には定義式の差に基づく系統的なずれがあり、これが上述の連続線が得られる条件の差になっていると考えられる。いずれにせよ、連続線が得られる条件を詳細に議論するためには、水中に突入するジェット速度の正確な値が必要である。

3. 2 細線の性状

図5(a)~(c)に得られたPb細線の写真を示す。左側の写真は表側(ドラムに接する面側)および裏側からの観察結果をそれぞれ上と下に、右側の写真は横からの観察結果を示す。ほとんどが同図に示すような扁平な形状をとり、大中ら⁽²⁾の結果と同様に水流に対して裏側の面は光沢がある(写真ではわかりにくい)のに比べ、水が当たる表側(ドラムに接する面)は光沢がなくリップルが生じる場合が多かった。 $\phi=30^\circ$ の場合には、図5(a)に示すように表面が比較的なめらかであるのに対し、 60° では図5(b)のようなリップルが多く観

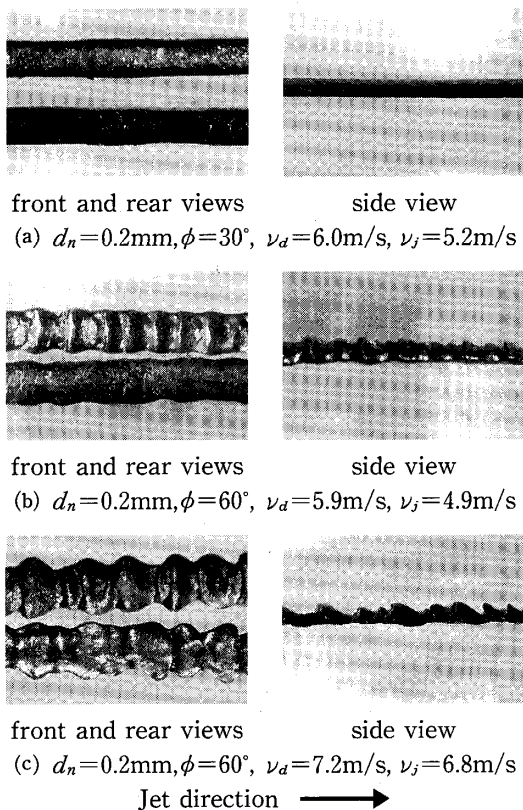


Fig. 5 Photographs of Pb wire

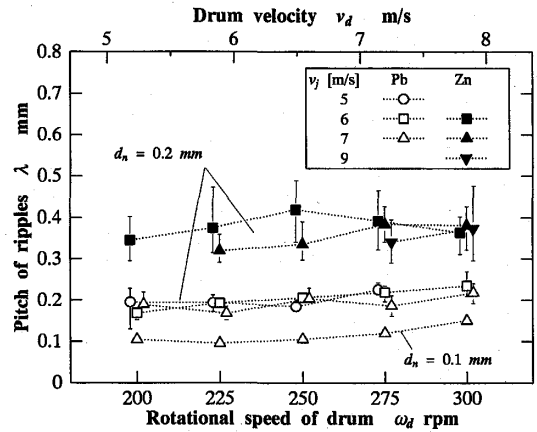


Fig. 6 Pitch of ripples formed on Pb and Zn wires

察され、図5(c)に示すような極端な形状のものも多かった。Znの場合もPbの場合と同様であった。図3(a)~(b)に示したPbおよびZnに関する細線長さの分類図において、黒く塗りつぶしたデータ(●◆▲)は表面がなめらかなもの、白抜き(○◇△)は明らかにリップルが形成されているもの、二重の印はその中間のものであることを示す。リップルの形成は $\phi=60^\circ$ および 45° で、しかも v_j が大きい場合により顕著であるので、ジェットが水中に突入した直後に逆方向に剪断力を受け、表面が変形することがリップル生成の原因と推測される。そして、 ϕ が大きく横からも強い剪断力を受けると図5(c)のような形になると考えられる。いずれにしても何らかの不安定による表面の変形過程が凝固物として観察されているので、リップルの形状およびその大きさには流体力学的要因だけでなく、いつ凝固が完了するかを支配する伝熱特性も大きな影響を

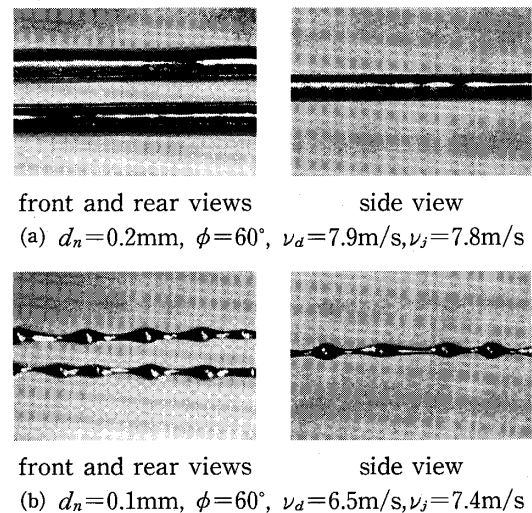


Fig. 7 Photographs of $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$ wire

及ぼす。

図6はリップルのピッチをドラムの回転速度に対して示したもので、縦軸の値は各条件で得られた細線から長さ数センチのサンプルを任意に10本切り取り測定したピッチの平均を示す。ピッチはドラム回転速度とともにわずかに大きくなる傾向を示すが、ジェット速度にはほとんど依存せず、 $d_n=0.2\text{mm}$ の場合、Pbでは約 0.2mm 、Znでは約 0.35mm である。また、 $d_n=0.1\text{mm}$ のPbの場合には約 0.1mm であり、ピッチはジェットの直径にほぼ比例する。液体ジェットの座屈に関するBejan⁽¹⁶⁾の理論によると断面が円の場合の座屈波長は $\lambda=(\pi/2)d_j$ であり、 $d_j=0.2\text{mm}$ とすると $\lambda=0.31\text{mm}$ になる。また、液体プールの表面に衝突する細い液柱に関するLienhard⁽¹⁷⁾の理論によると $\lambda=2\pi d_j/We$ (ここに $We=\rho v_j^2 d_j/\sigma$)であり、 $d_j=0.2\text{mm}$ 、 $v_j=5\text{ m/s}$ とするとPbについては $\lambda=0.01\text{mm}$ 、Znについては $\lambda=0.03\text{mm}$ となる。したがって、いずれの理論でも説明できない。

図7(a), (b)に $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$ 細線の写真を示す。PbやZnと最も異なる点は、断面形状が円に近く、得られた細線を見ても水流に対して表裏の区別が全くつかないことである。 $d_n=0.2\text{mm}$ の場合の線は図7(a)に示すように表面はほとんどなめらかで、いずれの条件でもリップルは全く観察されない。しかし、 $d_n=0.1\text{mm}$ では全ての条件で図7(b)のような数珠状になる。この数珠のピッチはいずれの条件でも 0.5mm 程度であり、大気中に噴射されたジェットの線形安定性理論⁽¹⁵⁾より導か

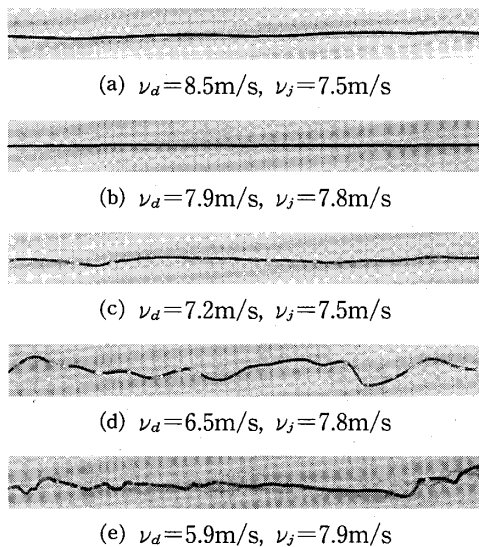


Fig. 8 Effect of drum and jet velocities on the form of $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$ wire ($d_n=0.2\text{mm}$)

れる最不安定波長 $\lambda=\pi d_j/0.7=0.45\text{mm}$ に近い。さらに形状がほぼ軸対称で、大気中に噴射されたジェットの破断過程に似ていることから、この現象は上記の理論でほぼ説明されると考えられる。

図8は $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$ 細線の形状をドラムの周速 v_d をパラメータとして示したものである。上述のように $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$ ではPbとは異なりジェット速度 v_j が速くてもリップルが形成されることはないが、 v_j が v_d よりかなり大きくなると曲がりくねった線になる。この原因が速度の遅い水によってジェットが減速されることにあることは図4(b)のPbの場合の写真からも容易に想像できる。 $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$ に対する細線長さの分類図3(h)~(j)で、黒く塗りつぶしたデータ(●◆▲)はまっすぐなもの、白抜き(○◇△)は曲がりくねったものが得られたことを示す。Masumotoら⁽⁴⁾による $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$ の実験では、 $v_d/v_j=1.2$ 程度でまっすぐなアモルファス細線が得られており、ドラム速度がそれより遅い場合には曲がりくねった線になることが報告されている。これに対して、本実験でまっすぐな連続線が得られる条件は $v_j=v_d$ に近く、 $d_n=0.1\text{mm}$ の場合には v_j のほうがやや大きめである。Masumotoら⁽⁴⁾による v_j の定義は式(1)と同一であるので、両者の違いは実際のジェット速度と式(1)による計算値の相違によるものと考えられる。

図9は得られた細線の真円度 ϵ を $\sigma/\{(v_j \sin \phi)^2 \rho_l d_n\}$ に対して示している。ここに ϵ は断面の短径と長径の比で定義しており、各条件で得られた細線から得た任意の10断面の平均値である。横軸の $\sigma/\{(v_j \sin \phi)^2 \rho_l d_n\}$ は、表面張力によるジェットの内圧と入射時のジェットに垂直方向の水の速度成分による動圧との比を表す。PbおよびZnの場合には、大中ら⁽²⁾およびAbeら⁽⁶⁾の結果と同様に表面張力の影響が優

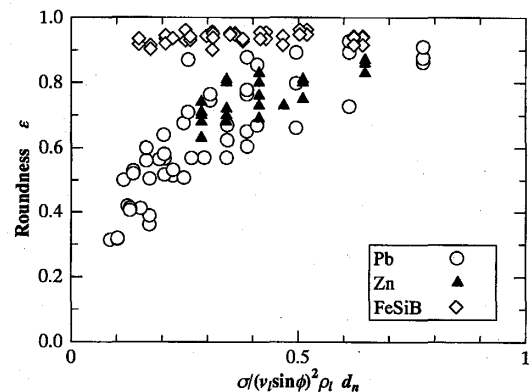


Fig. 9 Roundness of wire cross-section

るにつれて ε は 1 に近づき、金属の種類、入射角度およびノズル径によらず比較的良い相関を示す。一方 $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$ の場合には横軸の値にかかわらず 1 に近い値を示す。これは、凝固までの経過時間が比較的に長いために、凝固により形状が決定するのはジェットが水流とほぼ並行になった後であるからと考えられる。これに加えて、前述のような酸化皮膜の影響もあると推測される。

4. 結 言

回転水中紡糸法による低融点の Pb, Zn および高融点の $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$ 細線の製造実験を行った結果以下のことが明らかになった。

1. 金属の種類によらず入射角が小さい方が連続線が得られやすい。また、連続線の得られる範囲は Pb, $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$, Zn の順に狭くなる。

2. Pb および Zn の場合、入射角が大きいほど、またジェット速度が大きいほど細線の表面にリップルが形成されやすい。

3. $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$ の場合にはリップルは生じないが、ノズル径が 0.1mm の場合には数珠状になる。また、ジェット速度がドラム速度より大きくなると曲がりくねった細線しか得られない。

4. Pb および Zn 細線は多くの場合扁平であり、断面は表面張力によるジェットの内圧と入射時のジェットに垂直方向の水の速度成分による動圧との比が大きくなるほど円に近づく。一方、 $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$ の場合は条件にかかわらず真円度は 0.9 以上である。

以上のように、同一の装置を用いてほぼ同一条件で得られた細線の性状は低融点の Pb や Zn と Fe 系合金では全く異なり、良好な連続線が得られる条件も異なる。一方、写真やビデオによる水中のジェットの観察からは、Pb や Zn と $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{15}$ の場合との違いは明らかではない。しかし、製造過程での冷却条件が細線の性状等に大きな影響を及ぼしているのは明らかであり、今後この伝熱特性を明らかにすることが製造プロセスを理解するうえで最も重要である。また、ジェット速度の測定も不可欠であり、この二点に重点をおいて研究を遂行中である。

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谷出喜彦君(現ユニチカ株)および槇寺啓太君(現株ジャパンエナジー)に感謝の

意を表す。

文 献

- (1) 萩原道明, 塑性と加工, 策31巻策349号(1990), 132.
- (2) 大中逸雄, 福迫達一, 大道徹太郎, 日本金属学会誌, 策45巻第7号(1981), 751.
- (3) Ohnaka, I., Fukusako, T., Ohmichi, T., Masumoto, T., Inoue, A. and Hagiwara, M., Proc. 4th Int. Conf. on Rapidly Quenched Metals (1981), 31.
- (4) Masumoto, T., Inoue, A., Hagiwara, M., Ohnaka, I. and Fukusako, T., Proc. 4th Int. Conf. on Rapidly Quenched Metals (1981), 47.
- (5) Ohnaka, I., Int. J. Rapid Solidification, Vol.1 (1985), 219.
- (6) Abe, Y., Miyazawa, K. and Nakamura, M., Trans. ISIJ, Vol. 27 (1987), 929.
- (7) Liu, J., Arnberg, L., Bäckström, N. and Savage, S., Materials Science and Engineering, Vol. 98 (1988), 21.
- (8) Heyder, B. and Frommeyer, G., Materials Science and Engineering, Vol. A113 (1991), 667.
- (9) 本田博司, 高松洋, 山城光, 小林慎太郎, 日本機械学会論文集(B編), 第58巻第550号(1992), 1904.
- (10) 本田博司, 高松洋, 山城光, 松尾英典, 日本機械学会論文集(B編), 第58巻第554号(1992), 3135.
- (11) 山崎徹, 嶋田辰夫, 荻野喜清, 日本金属学会誌, 第56巻第11号(1992), 1229.
- (12) 日本金属学会編, 金属データブック(第2版), 丸善(1984).
- (13) 日本機械学会編, 伝熱工学資料(改訂第4版), 日本機械学会(1987).
- (14) 日本熱物性学会編, 熱物性ハンドブック, 養賢堂(1990).
- (15) Rayleigh, Lord, Proc. London Math. Soc., Vol. 10 (1878), 4.
- (16) Bejan, A., Letters in Heat and Mass Transfer, Vol. 8, No. 3 (1981), 1897.
- (17) Lienhard, J. H., Trans. ASME, J. Basic Engineering, Vol. 90, No. 1 (1968), 137.