報 文

一般報文

(昭和52年4月11日受理)

ガラスを利用した金属の溶融紡糸過程の解析

名古屋工業大学 後藤 共子

THE ANALYSIS ON THE DYNAMICS OF THE MELT SPINNING OF METALS USING THE SPINNABILITY OF GLASS

By Tomoko Gotō

(Nagoya Institute of Technology, Department of Fiber and Polymer Technology,
Gokiso-chō, Shōwa-ku, Nagoya, Japan)

The dynamics of the melt spinning of metals by making use of the spinnability of glass are analyzed by deriving a set of simultaneous partial differential equations which have been developed to describe the spinning of polymers. For steady-state, equation of heat balance: $\partial[W(C_p + C'_p/K)T + WL_p]/\partial z = -2\sqrt{\pi A(1+\rho/\rho'K)}(T-T_\infty)(h+h_r)$ where, $L_p = \text{constant for } T=T_s \text{ and } L_p=0 \text{ for } T \neq T_s$, equation of force balance: $\partial A/\partial z = -FA\rho'K/\beta W$, equation of material balance: $v_z \partial A/\partial z + A \partial v_z/\partial z = 0$. Where, T : temperature, z : distance from the bottom of the molten metal toward the winding drum, W : flow rate of metal, C_p and C'_p : specific heat of metal and glass, K : weight ratio of metal to glass, L_p : heat of fusion of metal, ρ and ρ' : density of metal and glass, T_∞ : temperature of the atmosphere, h and h_r : coefficient of heat transfer at the filament surface for convection and radiation, T_s : temperature of solidification of metal, F : spinning tension, β : tensile viscosity, v_z : local velocity, A : cross-sectional area.

The solutions of the above equations corresponding to the melt spinning of copper, silver and stainless-steel using pyrex glass showed fairly good agreement with the experimentally measured values of thickness $A(z)$ and temperature $T(z)$. Compared to the melt spinning of polymers, the solidification of metal spin line is very rapid, for example, $A(z)$ becomes constant within $z=0.5$ cm from the spinneret with the cooling rate amounting to as much as about 10^5 °C/sec.

(Received April 11, 1977)

1. 緒 言

品質一定の連続した金属繊維を安価に多量生産するため高分子の溶融紡糸と同じような方法で金属を溶融紡糸することが考えられる。低粘度で表面エネルギーの大きな溶融金属を冷却固化させるための条件が長野¹⁾やButlerら²⁾によって理論的に解析され、その可紡性について報告されている。著者らはガラスの曳糸性を利用することによって各種の金属を溶融紡糸し、高強度をもつ連続し

た直径数 μ の銅、鉄、ステンレス鋼繊維を得ることができた。また $\text{Fe}_{80}\text{P}_{10}\text{C}_3\text{B}_1$ 合金を溶融紡糸して非晶質金属繊維を作ることもできた³⁾。ガラスを用いた金属の溶融紡糸は糸条の冷却と細化が行われて巻取られ、その間糸条はその紡糸系に応じた物質移動履歴、応力ならびに温度履歴を受けつつ繊維形成が行われる。これらの履歴は得られた繊維の諸物性に非常に影響を及ぼす。したがって紡糸過程において糸条の断面積、糸条内に作用する応力ならびに温度がどのように変化しつつ繊維形成がな

されるかが問題になる。本報告は高分子の溶融紡糸過程の解析⁽⁴⁻⁸⁾と同様な取り扱いによって金属のガラス被覆溶融紡糸過程の断面、応力、温度変化について解析を行う。

2. 理 論

本実験に用いた金属のガラス被覆溶融紡糸装置を写真1に示す。約1gの金属をガラス管中に入れて誘導加熱コイルで加熱溶融する。磁界と金属の作り出す渦電流のため溶融金属は小滴状を保ち一定位置に固定される。小滴の底をガラスとともに引き出し巻取り機で巻取った。

Photo. 1 Casting apparatus for glass coated melt spinning of metal

一般に高分子の溶融紡糸過程の問題は物質収支、運動量収支およびエネルギー収支の式から解析される。本紡糸法にも同様な収支式を検討した。

図1のような空間に固定した円筒座標 (r, z) を採用した。微小間隔 Δz だけ離れた z 軸に垂直な二つの空間固定平面 z および $z+\Delta z$ 平面と糸条の表面で囲まれた領域について収支を考える。式の記述を簡単にするために次の仮定を設ける。

- 1) ガラスと金属との間で化学反応、拡散等は起こらないものとする。

Fig. 1 Schematic diagram of the melt spinning of metal using the glass coordinates z and r

- 2) 糸条断面は円形でありガラスと金属は同心円状をなし中心に金属が存在する。

- 3) 流速 v_z 、糸条の温度 T などの諸量はすべて軸対称である。

- 4) 長さ方向(z 方向)での熱伝導は無視できる。

本紡糸系においてこれらの仮定はすべて満足させている。

物質収支式は金属について

$$\frac{\partial(\int_0^R 2\pi r \rho dr)}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

ガラスについて

$$\frac{\partial(\int_R^{R'} 2\pi r \rho' dr)}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

で表わされる。ここで第1項は単位時間にこの領域内に蓄積する量、第2項は流入する量を示す。

運動量収支式は

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\int_0^R 2\pi r \rho v_z dr + \int_R^{R'} 2\pi r \rho' v_z' dr)}{\partial t} \\ &= - \frac{\partial(\int_0^R 2\pi r \rho v_z dr + \int_R^{R'} 2\pi r \rho' v_z' dr)}{\partial z} \\ &+ \frac{\partial(\int_0^R 2\pi r \tau_{zz} dr + \int_R^{R'} 2\pi r \tau_{zz}' dr)}{\partial z} \\ &+ (\int_0^R 2\pi r \rho g dr + \int_R^{R'} 2\pi r \rho' g dr) - 2\pi R' \tau_f' \\ &+ (2\pi \frac{\partial(\sigma R)}{\partial z} + 2\pi \frac{\partial(\sigma' R')}{\partial z}) \quad (2) \end{aligned}$$

ここで左辺はガラスと金属の領域内に単位時間に蓄積する運動量、右辺第1項は流れ込む運動量、第2項は張力、第3項は重力、第4項は表面に働く空気抵抗、第5項は界面張力と表面張力を表わす。

エネルギー収支式は

$$\frac{\partial \left(\int_0^R 2\pi r \rho c_p T dr + \int_R^{R'} 2\pi r \rho' c_p' T' dr \right)}{\partial t} = - \frac{\partial \left(\int_0^R 2\pi r \rho c_p v_z T dT + \int_R^{R'} 2\pi r \rho' c_p' v_z' T' dT \right)}{\partial z} - \frac{\partial \left(\int_0^R 2\pi r \rho L_p v_z dr \right) - 2\pi R' h (T' - T_\infty)}{\partial z} - 2\pi R' h_r (T' - T_\infty) \quad (3)$$

ただし L_p は $T \approx T_s$ のとき, 0

$T = T_s$ のとき, 一定とする。

左辺は金属とガラス領域に単位時間に蓄積するエネルギー量, 右辺第1項は流れ込むエネルギー量, 第2項は金属が凝固するために発生する潜熱, 第3, 4項は対流熱伝達とふく射熱伝達によりこの領域の表面を通して冷却空气中に移動するエネルギー量を示す。

金属の溶融紡糸では冷却速度が著しく大きく金属はかなり低温まで過冷却状態にあることが考えられる。過冷却液相の中にいったん固相の核が形成されればその成長はきわめて急速に進行する⁹⁾。Turnbullにより冷却速度が著しく大きい場合には純金属の過冷却 θ は $0.2 T_m$ で近似されることが報告されている¹⁰⁾。したがって本紡糸中においても金属は $0.8 T_m$ で瞬時に固化し, この温度で金属の粘度は数センチポアズから無限大になり, その結果この点以降は細化が止まり巻取速度に到達すると仮定した。第3式においては $T_s = 0.8 T_m$ で物質に固有な潜熱が発生するとした。しかし本研究の場合, この影響は他のエネルギー量に比較してきわめてわずかである。

(1)~(3)までの式はこのままでは解を求めるのに複雑すぎるため定常状態について考える。すなわち時間に関する偏微分項をゼロとおく。さらに次のような仮定をもつ。

- 5) 流速 v_z は半径方向に一定である。
- 6) 紡糸中の糸の半径方向の温度勾配は比較的わずかである。
- 7) 運動量収支式の加速度項, 重力項, 摩擦抵抗および表面張力の項によるものの寄与は無視しても大きな誤差を生じないとする。

仮定5について溶融高分子の層状をなした2層流体における厚さ方向の速度分布が Yu, Han らによって計算されている¹¹⁾。本研究では低粘度の溶融金属が層流をなしてガラス円管中を流れる場合, 半径方向の速度分布が問題となる。図1に示すように紡糸口に近い場合は一般の流体力学における円管の吸入口と前駆長内における流れと同様にはほとんど半径方向に一樣な速度分布が得られると考えられる。実際の紡糸系において前駆長は0.2 cm以上と見積もられる¹²⁾。前駆長の下流において速度分布は一

般に

$$v_r = - \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) \frac{r^2}{4\mu} + c_1 \log r + c_2 \quad (4)$$

で現わされる¹²⁾。

$\partial p / \partial z$ は z 方向の圧力勾配を示し, c_1 と c_2 は積分常数であり軸上における速度は有限であるから $c_1 = 0$ でなければならない。 $r = R$ で $v_r = v_R$, $r = 0$ で $v_r = v_0$ とすると

$$v_0 - v_R = \frac{(\partial p / \partial z)}{4\mu} R^2$$

で表わされる。今(2)式において $(\partial p / \partial z)$ に相当する項として界面張力項が関係する。 $z = 0.2$ cm 以上では

$$(\partial p / \partial z) \times \frac{R^2}{4\mu}$$

は高々20 cm/secと見積もられ, 管の中心と管壁の速度の差は平均の流速に比較して小さく, v_z は半径方向に一樣であると仮定される。

仮定6に対してはHeislerによって計算されているように¹³⁾半径方向の温度分布が若干存在するが表面と繊維中心の差はわずかであるのでその平均を T として直径方向に一定として扱う。仮定7は後述するように本紡糸法において満足している。

これらの仮定を式(1)~(3)に代入すると

物質収支式は

$$\frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad w = \rho A v_z = \text{一定}$$

$$\frac{\partial w'}{\partial z} = 0, \quad w' = \rho' A' v_z' = \text{一定}$$

すなわち

$$v_z \frac{\partial A}{\partial z} + A \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \quad v_z \frac{\partial A'}{\partial z} + A' \frac{\partial v_z'}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

運動量収支式は

$$F = \int_0^R 2\pi r \tau_{rz} dr + \int_R^{R'} 2\pi r \tau'_{rz} dr$$

一方レオロジーの式から引張り応力と変形速度の間には

$$\tau_{rz} = \langle \beta \rangle \frac{\partial v_z}{\partial z}$$

の関係がある。ここで $\langle \beta \rangle$ は引張り粘度を示す。金属の粘度は液体状態では数センチポアズでガラスの粘度に比較して非常に小さいため, τ_{rz} はガラスのみにかかる応力を考えると, $F = A' \langle \beta \rangle \frac{\partial v_z}{\partial z}$ となる。

(5)式と $w/w' = K$ を用いて

$$\frac{\partial A}{\partial z} = - \frac{F A \rho' K}{\langle \beta \rangle w} \quad (6)$$

となる。

エネルギー収支式は

$$\frac{\partial \{w(c_p + c'_p/K) + w L_p\}}{\partial z}$$

$$= -2\sqrt{\pi A(1 + \rho/\rho'K)}(T - T_\infty)(h + h_r) \quad (7)$$

と表わされ、(6)、(7)を連立させて解を求めることができる。

3. 実験方法

パイレックス・ガラスの曳糸性を利用して銅(99.9%純度)銀(99.99%純度)、ステンレス鋼(市販 IN 856)の熔融紡糸を行った³⁾。写真1に示した紡糸装置を用いて、約1gの金属をガラス管中で加熱熔融する。小滴状となった熔融金属の底をガラスとともに引き出し巻取機で巻取った。紡糸後被覆ガラスをカセイソーダあるいはフッ化水素で除いた。処理前後の重量を測定してガラスに対する金属の重量割合 K を求めた。紡糸中の繊維直径を写真法によって測定した。すなわち紡糸中の繊維をカメラで撮影しそのフィルム像を顕微鏡で100倍に拡大し、さらに4倍に引伸ばして印画紙に焼きつけて測定した。繊維面積 A は写真の直径から $A + A'$ を計算し、これを上述の K を用いて、 $1 + K$ で割り、 A を算出した。 A_0 は図1に示すように熔融金属の小滴の曲線と z 方向の交点での直径から、算出し、 A_w は繊維の直径が一定となった値を用いて求めた。この A_w は実際に巻取った繊維の直径から求めた値とほぼ一致した。質量流速 w は巻取速度 v_w を用いて $w = A_w v_w \rho$ から算出した。紡糸張力は小型テンシロンを改良した記録式張力計により最大荷重10gで測定した。本紡糸法では数10 μ のガラス被覆繊維が1本のみ走行し、さらに $z = 1$ cmの間には加熱コイル等が付設されているため正確な繊維温度の測定はできなかった。参考として $z = 5$ cm以遠で熱電対の温度をあらかじめ糸の温度に等しく保ち走行繊維に接触させ指示のふれなくなる温度を読み取った。

4. 結果および考察

パイレックス・ガラスを用いて各金属の熔融紡糸を行

った。その時の紡糸条件を表1に示す。本紡糸法では最初に熔融金属をガラスとともに引き出す際の温度と金属の比重が紡糸繊維の直径と被覆ガラスに対する金属の割合 K に大きな影響を及ぼす。 K の値は金属の比重が大きく、熔融温度が小さく被覆ガラスの粘度が大きいほど大きくなる。金属の熔融温度はガラスの粘度を決定するため本紡糸法では一番重要な因子であり、管送り速度を調整して加熱コイルに対する小滴の位置を一定にすることにより制御している。しかしこの温度制御は非常に微妙であり、巻取速度や、金属の量や種類により変化し、 $\pm 25^\circ\text{C}$ の温度変動は免れない。表1の紡糸条件では固化直前の液体金属のレイノルズ数は約100以下で下限臨界レイノルズ数以下であり紡糸中、金属流の乱流は起きていないと考えられる。被覆ガラスを除いた繊維の表面を写真2に示す。繊維はなめらかな表面をし局部的なくびれ等はみられない。

Photo. 2 Stainless-steel filaments

張力項を除いた加速度項、重力項、表面張力項、空気抵抗の最大値は表1の紡糸条件で表2のようになる。ここでガラスと金属の界面張力がわからないため金属の表面張力で代用した。また空気抵抗の値はSakiadisの境界層理論値を代用し¹⁴⁾、佐居、折居の提出した抵抗係数 $c_f = 0.68 R_{ew}^{-0.8}$ を用いて算出した¹⁵⁾。表2においてNo. 4, 5

Table 1 Spinning condition of the melt spinning of metal by making use of the spinnability of pyrex glass

Number	Metal	Melting Temperature (°C)	Solidification Temperature (°C)	Winding Speed (m/min)	Flow rate of metal (g/sec)	Cross-sectional area of metal A (cm ²)		Weight ratio of metal to glass K	Tensile force (g)	
						at Z=0	at Z=z _w		cal.	obs.
1	Copper	1300	990	477	3.2 × 10 ⁻⁴	3.2 × 10 ⁻⁵	4.5 × 10 ⁻⁸	0.0401	2.3	2.1
2	Copper	1300	990	238	2.5 × 10 ⁻⁴	6.6 × 10 ⁻⁵	4.9 × 10 ⁻⁸	0.0903	2.2	1.8
3	Copper	1300	990	90	3.8 × 10 ⁻⁴	1.0 × 10 ⁻⁴	3.8 × 10 ⁻⁷	0.3039	1.1	1.2
4	Silver	1230	930	477	1.0 × 10 ⁻³	3.8 × 10 ⁻⁴	1.3 × 10 ⁻⁷	2.805	2.2	2.1
5	Silver	1230	930	57	7.8 × 10 ⁻⁴	4.3 × 10 ⁻⁴	7.9 × 10 ⁻⁷	1.031	2.7	1.3
6	Steel	1350	1025	477	3.0 × 10 ⁻⁴	7.8 × 10 ⁻⁵	4.9 × 10 ⁻⁸	0.0884	1.5	1.3
7	Steel	1350	1025	90	2.2 × 10 ⁻⁴	7.8 × 10 ⁻⁵	2.0 × 10 ⁻⁷	0.1611	0.8	0.7

の金属の割合の大きい場合比較的大きな表面張力項の値を示すけれども張力の実測値に比較してこれらの値は小さく無視して扱った。

以下の計算に用いた金属の物性値を表3^{16, 17)}に、各温度に対する金属とガラスの比熱を図2に示す^{16, 17, 19)}。IN856の詳しい物性値は不明のため一般の鋼の値を用いた。

ニュートン流体の場合、Troutonにより引張り粘度 $\langle\beta\rangle$ は剪断粘度 η_0 と $\langle\beta\rangle=3\eta_0$ で表わされている⁴⁾。さらに佐野らにより高分子の場合もこの関係が成立することが確認されている¹⁸⁾。本報告では $\langle\beta\rangle$ がガラスの粘度 η にのみ依存するものとしTroutonの3倍則が成立するものと仮定し $\langle\beta\rangle=3\eta$ で近似した。パイレックス・ガラスの場合、温度 T における η は

$\log \eta = -1.12 + 5100/(T-240)$ で表わされる¹⁹⁾。対流熱伝達係数 h は加瀬、松尾による式を適用した²⁰⁾。すなわち半径 d の円柱に平行に空気流が当たる場合、ヌッセット数 N_u とレイノルズ数 Re は $N_u = 0.42 Re^{0.334}$ で表わされる。 $N_u = h d / k_F$, $Re = d v_z / \nu_F$ で定義されるので $h = 0.473 \times 10^{-4} A_0^{-0.333} v_z^{0.334}$ となる。但し、 $A_0 = \frac{\pi}{4} d^2$ とし、空気の特徴値 $k_F \nu_F^{-0.334}$

$= 1.22 \times 10^{-4}$ を代入した。さらに本報告では $A_0 = A + A' = A(1 + \rho/\rho'K)$ であるから

$$h = 0.473 \times 10^{-4} A^{-0.667} (1 + \rho/\rho'K)^{-0.333} \times w^{0.334} \rho^{-0.334}$$

となる。

ふく射による熱伝達係数 h_r は外気の温度 $T_\infty = 20$ とし、 T_∞' を無視して、 $h_r = \epsilon s T_a^4 / (T-20)$ とおくことができる²¹⁾。ここで s はStefan-Boltzmannの定数で 1.36×10^{-12} cal/cm²·sec·°K⁴である。ガラスのふく射率 ϵ はパイレックス・ガラスの場合、表4に示すようにガラスの厚さと温度に依存する¹⁹⁾。計算の便宜上ガラスの厚さの項を次のように近似して $\epsilon = A^{-0.667} A_N^{0.667} \epsilon'$ とし、 ϵ' を温度のみによるふく射率とし、表4の1/4インチの厚さの値を用いて外そうした。すなわち、

Table 2 The maximum value of the components of spinning tensions due to acceleration, gravity, surface tension and air resistance on the same spinning conditions shown in Table 1

Number	Acceleration (g)	Gravity (g)	Surface tension (g)	Air resistance (g)
1	0.0067	0.0064	0.027	0.018
2	0.0012	0.0062	0.038	0.0073
3	0.00025	0.0013	0.047	0.0025
4	0.0011	0.0047	0.062	0.013
5	0.00015	0.0077	0.069	0.0014
6	0.003	0.0073	0.029	0.017
7	0.00024	0.0043	0.029	0.0024

Table 3 Physical properties of metal and pyrex glass

Material	Melting point (°C)	Heat of fusion (cal/g)	Density (g/cm ³)	Surface tension (dyne/cm)
Copper	1083	49.3	8.93 (20°C) 7.80 (1250°C)	1300 (1200°C)
Silver	960.5	24.6	10.49 (20°C) 9.09 (1200°C)	923 (995°C)
Steel	1260	57.3	7.6 (20°C) 7.1 (1300°C)	994 (1318°C)
Glass	-	-	2.23 (20°C)	350 (1250°C)

Fig. 2 Isobaric specific heat of metal and pyrex glass

Table 4 Total emissivity as a function of pyrex glass thickness¹⁹⁾

Thickness	1/4 in.			1/2 in.		
Temperature	253 °C	451 °C	693 °C	253 °C	451 °C	693 °C
Emissivity	0.90	0.88	0.78	0.90	0.89	0.81

$h_r = A^{-0.667} A_N^{0.667} \epsilon' \times 1.36 \times 10^{-12} \times T_a^4 / (T-20)$ となる。以上の関係を(6), (7)式に代入すると

$$\frac{\partial A}{\partial z} = F A \rho' K / 3 \eta w \quad (8)$$

$$\frac{\partial \{(c_p + c_p' / K) T + L_p\}}{\partial z} = \frac{2 \sqrt{\pi} A (1 + \rho / \rho' K) (T - 20) A^{-0.667}}{w} \times \{0.473 \times 10^{-4} (1 + \rho / \rho' K)^{-0.334} w^{0.334} \rho^{-0.334}$$

$$+A_N^{0.667} \varepsilon' \times 1.36 \times 10^{-12} \times T_0^4 / (T-20) \} \quad (9)$$

加瀬, 松尾の方法に準じて(8)を(9)で割り数値計算により F を求め, $A(z)$, $T(z)$ を求めることができる。

各金属の表1に示した紡糸条件で実測した K , A_w , A_0 , w を用いて計算した F , $A(z)$, $T(z)$ をそれぞれ表1, 図3~8の曲線に示す。また実測値を表1と図3~7の点で表わす。張力の実測値はNo.5を除き理論値とはほぼ一致する。No.5の場合は表2の表面張力の項が若干影響しているためと考えられる。 $A(z)$ の参考値も理論曲線と同じ傾向を示している。

Fig. 3 Cross-sectional area of copper filament vs. distance z . Circles represent the experimental results and curves are calculated results.

Fig. 4 Cross-sectional area of silver filament vs. distance z . Circles represent the experimental results and curves are calculated results.

固化完了時においては紡糸速度は巻取速度に等しいと考えられ, $T(z)$ 曲線の T_0 点の接線から温度勾配を求めその時の巻取速度を掛けて冷却速度とすることができ。図6~8の $T(z)$ 曲線は銅のNo.1の K が非常に小さい場合を除き, 巻取速度に影響せずほぼ同一の曲線を示しているので固化完了時の冷却速度は巻取速度にはほぼ比例し, 約 $10^5 \sim 10^6$ °C/secの値を示す。

一般の高分子の溶融紡糸においてはノズル口より約30 cmで糸は固化し, ノズル付近の冷却速度は $10 \sim 10^2$

Fig. 5 Cross-sectional area of stainless steel filament vs. distance z . Circles represent the experimental results and curves are calculated results.

Fig. 6 Temperature of copper filament vs. distance z . Circles represent the experimental results and curves are calculated results.

Fig. 7 Temperature of silver filament vs. distance z . Circle represents the experimental results and curves are calculated results.

Fig. 8 Calculated temperature of stainless-steel filament vs. distance z .

℃/secである。金属の場合には図3～5にみられるように約0.5 cm以内、特に銀の場合は0.1 cm以内で完了している。細化においては(8)式の $1/\eta$ が大きく影響し、本実験では約1300℃～800℃の間で $\eta=10^4\sim10^8$ の粘度変化を共なって繊維形成がなされるのに対し、高分子の場合、約300℃以下で $\eta=10\sim10^4$ ポアズの粘度範囲で行われる。 η が 10^8 以上では $1/\eta \approx 0$ となり $\partial A/\partial z=0$ で固化完了するため、ガラスの高粘度が金属の細化を早くし、特に銀の場合には η が 10^5 以上で紡糸され、 K が大

きいため、固化が非常に速い。高分子に比較して冷却速度が大きいのは(9)式中のふく射による熱伝達が対流によるものの約10倍ほど大きいためと考えられる。

以上のとりあつかいはすべて K =一定として行った。しかし図1のように実際には紡糸線の始まりの所で K は減少してある値に落ちつくものと考えられ、その間は複雑で不明なメカニズムがあるものと考えられる。工学的に重要な意味をもつ K の値の決定メカニズムについては今後さらに検討が必要である。

5. 結 論

金属のガラス被覆熔融紡糸過程の解析を物質収支式、エネルギー収支式、応力収支式から行った。

定常状態ではそれぞれ次の関係を得た。

$$v_z \frac{\partial A}{\partial z} + A \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial \{w(c_p + c'_p/K) + wL_p\}}{\partial z} = -2\sqrt{\pi A(1 + \rho/\rho'K)} (T - T_\infty)(h + h_r)$$

但し、 $L_p = \text{const.}$ $T = T_s$
 $L_p = 0$ $T \neq T_s$

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -FA\rho'K / \langle \beta \rangle w$$

これらの関係は、パイレックス・ガラスの曳糸性を利用した銅、銀、ステンレス鋼の熔融紡糸過程の実験結果をよく説明した。金属の紡糸では融体以下0.5 cm以内で繊維は固化完了し、この時の冷却速度は約 $10^5\sim10^6$ ℃/secであった。

記 号 説 明

- z 小滴状の金属融体から巻取機までの距離 (cm)
- r 糸条の半径 (cm)
- v_z 流速の z 成分 (cm/sec)
- T 糸状の温度 (℃)
- t 時間 (sec)
- R 金属繊維の半径 (cm)
- R' 被覆ガラス状態の繊維の半径 (cm)
- ρ 金属の比重 (g/cm³)
- ρ' ガラスの比重 (g/cm³)
- w 金属の質量流速 (g/sec)
- w' ガラスの質量流速 (g/sec)
- τ_{zz} 引張り応力 (g/sec²・cm)
- g 重力の加速度 980 (cm/sec²)
- τ_f 金属とガラスの界面に働く摩擦抵抗 (g/sec²・cm)
- τ'_f 空気の摩擦抵抗 (g/sec²・cm)
- σ 金属とガラスの界面張力 (g/sec²)

σ' ガラスの表面張力 (g/sec²)
 c_p 金属の定圧比熱 (cal/g・°C)
 c_p' ガラスの定圧比熱 (cal/g・°C)
 L_p 金属の凝固熱 (cal/g)
 h 対流による熱伝達係数 (cal/cm²・sec・°C)
 h_r ふく射による熱伝達係数 (cal/cm²・sec・°C)
 T_∞ 外気の温度 (°C)
 T_s 金属の凝固温度 (°C)
 T_a 糸条の絶対温度 (°K)
 T_{ma} 金属の融点 (°K)
 θ 過冷却度
 A 金属糸条断面積 (cm²)
 A' 被覆ガラスの断面積 (cm²)
 K 紡糸糸条内のガラスに対する金属の重量割合
 F 紡糸張力 (g・cm/sec²)
 $\langle \beta \rangle$ 引張り粘度 (g/cm・sec)
 η ガラスの粘度 (g/cm・sec)
 Re_w レイノルズ数
 k_F 空気の熱伝導率 (cal/cm・sec・°C)
 ν_F 空気の動粘性係数 (cm²/sec)
 ϵ ガラスのふく射率
 ϵ' ガラスの温度のみに依存するふく射率
 v_r 流速の直径成分 (cm/sec)
 μ 熔融金属の粘度 (g/cm・sec)
 添字 下つき N : $z=0$ の位置の値
 下つき w : 巻取り位置の値

謝辞: 本報文の全般にわたり有益なる御討論, 御指導を賜りました東洋紡績 K. K. 堅田研究所 松尾達樹博士に深謝いたします。

文 献

- 1) 長野正満: "織学誌" **28**, 23 (1972)
- 2) I. G. Butler, W. Kurtz, J. Gillot and B. Lux: *Fibre Sci. & Tech.*, **5**, 243 (1972)
- 3) 後藤共子: "日本金属学会会報" **15**, 633 (1976)
- 4) 繊維学会編: "繊維の形成と構造の発現" 化学同人 (1969)
- 5) A. Ziabicki and K. Kiedzierska: *Kolloid. Z.*, **171**, 51 (1960), **175**, 14 (1961)
A. Ziabicki: "Fundamentals of Fibre Formation", John Wiley & Sons, (1976)
- 6) E. H. Andrews: *Brit. J. Appl. Phys.*, **10**, 39 (1959)
- 7) S. Kase and T. Matsuo: *J. Poly. Sci.*, **A3**, 254 (1965), *J. Appl. Poly. Sci.*, **11**, 251 (1967)
- 8) 山田信夫, 佐野雄二, 南部俊之: "織学誌" **22**, 197 (1966)
- 9) 日本金属学会編: "金属便覧" 丸善 (1972) p.194
- 10) D. Turnbull: *J. Chem. Phys.*, **18**, 764 (1950)
- 11) T. C. Yu and C. D. Han: *J. Appl. Poly. Sci.*, **17**, 1203 (1973)
- 12) 岡本哲史: "応用流体力学" 誠文堂新光社 (1952)
- 13) M. P. Heisler: *Trans. ASME.*, **69**, 227 (1947)
- 14) B. C. Sakiadis: *A.I.Ch.E. Journal*, **7**, 221, 467 (1961)
- 15) 佐野雄二, 折居晃一: "織学誌" **24**, 212 (1968)
- 16) 日本化学会編: "化学便覧" 基礎編 (1966) 丸善 (株)
- 17) 日本金属学会編: "金属データ・ブック" 丸善 (1974)
- 18) 佐野雄二, 折居晃一, 山田信夫: "織学誌" **24**, 147 (1968)
- 19) E. B. Shand: "Glass Engineering hand book" (1958) McGraw Hill, New York
- 20) 加瀬 晋, 松尾達樹: "繊維機械学会誌" **18**, 188 (1965)
- 21) J. M. McKelvey, 伊藤勝彦訳 "高分子加工工学" (1964) p.175 丸善