

ガラス繊維の紡糸に就て (第5報)

紡糸過程に関する考察

澤 井 研 究 室

工學博士 澤 井 郁 太 郎

工 學 士 嶺 正 男

1) 緒 言

先に第4報に説明した如き小型坩堝を用いた小規模の實驗から高温度のガラスが紡糸孔から出て引伸され冷却固化して纖維になる過程を考察して見たいと思ふ。

2) 紡糸孔部分の模型

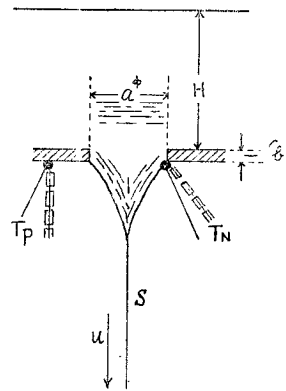
そのために先づ紡糸孔からガラスが出て來て纖維になる部分を模型的に第1圖に示す。

1) a: 孔径 1~3 mm. 白金又は白金合金の紡糸孔板を使ふ場合には米國の例では 1.2 mm と云はれてゐるが著者等の所では半熔融アルミナの紡糸孔板を用ひてゐるので工作上あまり薄くする事が出来ないために孔はこれよりも大きく現在用ひてゐるものでは約 1.5~2.0 mm であるが、この實驗の場合は 1.7~約 3 mm 位迄の間ものを使用した。

g) b: 紡糸孔板の厚さは工作焼成の便宜上 1.0~2.0 mm 位のものを普通には用ひてゐるが、この實驗には 0.5~2.6 mm 位の範圍のものを使用した。紡糸孔の形は實際の場合はガラスを出来るだけ出易くするためと工作上的の便宜のためにこの様に圓筒形ではなく上の方の角を削つたり逆に下端を擴げたりして使用上便利な形にしてゐるので紡糸孔の寸法としては a, b, 以外にその形から入る補正項を考へる必要があるが、今の場合には a, b, の影響を調べやうとするためにこの様な簡単な形にしてある。

3) U: 捲取速度は必要に應じモーターの廻轉速度を上げて毎分 3600 m 位までする事があるが、今の場合には裝置の都合で約 300 m から 1300 m までの間を使用し、後に述べる特別な目的のために 6 m と云ふ低速度まで落してみた。

第1圖 紡糸孔附近の模型圖



4) H: 坩堝内に熔けてゐるガラスのヘッドであるが、實際大型の實驗に用ひてゐるものは約 10~15 cm, この實驗には小型の坩堝を用ひたので 5 cm 以下であつた。第 4 報に述べた如くガラスの出て来る量はヘッドの影響を相當著しくうけるので一定の太さの繊維を作るためにはヘッドを一定に保つ必要があり、工業的には自動的に原料ガラスを坩堝に補給する必要がある。又ガラスをガスで加熱してゐるのでヘッドには補正項としてガラス表面に加はる爐内ガスの壓力が加はるわけである。

5) S: 糸にかかる張力で、上に述べた U, H, S はお互に獨立したものではなく捲取速度によつて張力が變つて来る事などが考へられる。

6) T (η): 次に温度と粘度であるが、假令定常状態で紡糸してゐる場合でもこれ等は紡糸孔附近の各部分によつて細く變化してゐて紡糸するには最も重要な因子の一つであるに係らずこれを精密に測定することは異常に困難である。温度は熔融ガラスの千數百度から繊維になつた場合の常温まで變化する間にそれに伴つて粘度は 10^{1-2} の程度から常温の 10^{19-20} poise の間に變化してゐる筈である。温度の方で例へば坩堝内熔融ガラスの表面の温度は光學高温計で簡単に測れるが爐内の高温ガスのための誤差が入つて来る。著者等は便宜上紡糸孔板下面の温度 T_p を標準にとり必要に應じて紡糸孔出口のガラスの温度を Pt-Pt. Rh 熱電對で測つてゐるが、この T_p は紡糸孔板の熱傳導、爐底部の熱輻射等のため必しも引出されたガラスの温度と直接的な關聯があるか否かは疑問であり、 T_n にしてもガラス中に深く挿入する程高い温度が表れ、もし熔融ガラスが熱電對の導線の部分まで附着する様な事があれば軟化したガラスの電解傳導のため一部分短絡したことになりそのための誤差が入る筈である。著者等は熱電對の接合部を出るだけ精確に半分だけガラスに浸す様にして測定してゐるが、これとても絶對的なものではない。兎に角實驗の條件を一定に保つための一つの標準として温度を測つてゐるわけである。一般にガラスから泡が除かれるのは $\eta=10^2$ poise 程度であり、 10^3 になると棒などを差込んで引き上げた場合に糸になつてついて来るので Tammann はこのときの温度を糸に引ける温度と云ふ意味で T_f と表して居る。 10^7 になると吹竿の先につけて任意の形に吹く事が出来、大體 $10^8 \sim 10^9$ が作業範圍と云はれる。温度が下つて 10^{13} になると凝固して彈性體になる、別の言葉で言へばこの粘度になる温度まで上げてやればガラスの形を變へることなくガラス中の歪みを除くことが出来る。ガラスが紡糸孔から引出されて冷却され、凝固して一定の太さの糸になる間の粘度の變化を調べる事は重要なことであると思ふが、測定の方法が極めて困難である。(著者等は白金球の沈降速度を測定し Stokes の式から計算する方法で求めた粘度—温度關係圖を参考に使ふことにした)。而して紡糸孔から出て来るガラス中に含まれてゐる泡の

舉動などから考へてもこの邊では 10^4 程度ではないかと想像され、一定の太さになる點はガラスの組成、溫度殊にノズルから引出された部分の外氣及び爐底の熱輻射等により變化するが、著者等の實驗では坩堝底から 10 mm 以内の所にある様であり、この粘度がガラス、樹脂等の粘稠性液體に全て共通であると云はれる凝固粘度 10^{10} 附近にあるのではないかと考へられる。又引出されて圓錐形になつてゐる部分では斷面の方向にも粘度勾配がある（外面と中心部では粘度が異なる）と考へられ、流動する粘性液體の粘度の値は流動する速度にも無關係ではないと考へられる。

7) G: ガラスの粘度—溫度特性は組成によつて著しく影響され、表面張力、密度、彈性的性質及びそれ等の溫度特性等も紡糸條件に影響を與へるものと考へられるので、假にガラスの組成的、物理的特性等を總括して G で表す事にした。

8) M: 又紡糸装置の構造から入る因子も種々複雑なものがある。

以上考へた所からガラス纖維の太さ捲取量等は假に

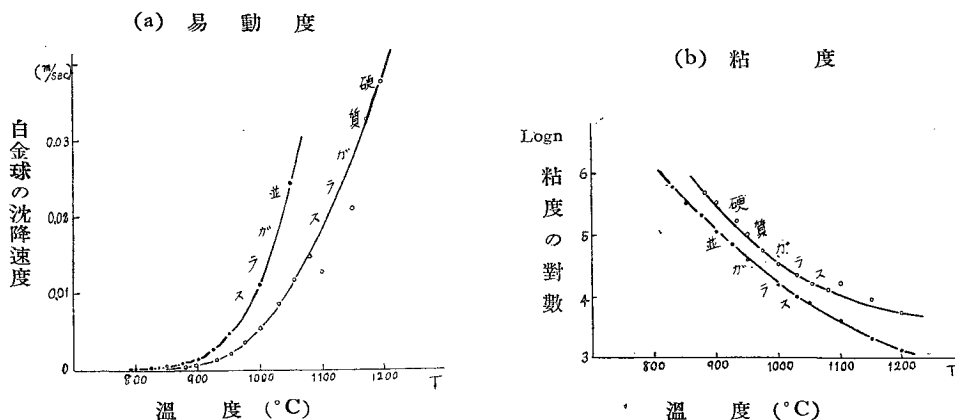
$$D = F(a, b, u, H, S, T, N, G, M \dots\dots\dots) \dots\dots\dots (1)$$

で示した如く著しく複雑な原因の函數であり、これ等の個々の原因の一つ一つに就いて出来るだけ再現性のある實驗條件のもとに調べて行かうとするわけであるが、未だいくらか實驗が進んでゐないので今までに調べた二、三の結果から糸の太さ及び捲取量について實驗式を作つてみようとした。

3) 試料ガラスの粘度

先づ熔融ガラス中に白金球を沈めその沈降速度から Stokes の法則に従つて計算し試料ガラスの紡糸溫度附近の粘度と溫度の關係を求めた。第 2 圖(a)は白金球の沈降速度(mm/sec), (b)は粘度の對數に換算したのである。尙試料 A は第 3 報の連續紡糸實驗に用ひた Na_2O 18% ガラス、B は第 4, 5 報の實驗に用ひた Na_2O 10, B_2O_3 8% 含有のガラスである。紡糸溫度の測定値と對照して A, B 兩方のガラス共紡糸孔上面附近の粘度は凡そ 10^9 poise 程度、孔から引出される附近では粘度の對數値で 4.2~4.6 程度であることが判る。又白金球の沈降速度と溫度の關係を表す曲線は一定の力を加へた場合に各溫度でガラスがどれだけ變形し易いかを表すものと考へることが出来、紡糸孔から引出されたガラスが引伸されて一定の太さになる圓錐形の部分の形狀と何等かの聯關があるのではないかと思はれる。實際この部分の形狀はガラスの種類、周圍の空氣の溫度勾配等により放感に變化し、紡糸の安定さと密接な關係があることが經驗されてゐる。

第2圖 試料ガラスの易動度及粘度



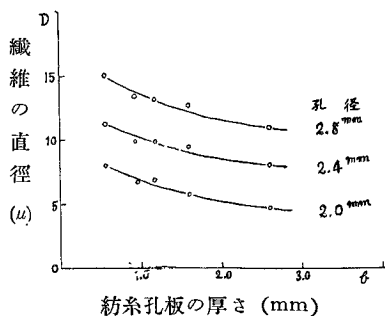
4) 紡糸基礎実験の結果の整理

1) a-D 第4報 4, 5, 6 圖に示した如く a₀ に収斂する直線群で表されこの様に挿外する事が許されるとすれば a₀ 點は紡糸孔板の厚さ b が一定の場合に a₀ より細い孔からは糸が引けないと云ふ極小の孔の直径を表す事になり厚さ b が厚くなる程 a₀ は大になる傾向がある。演者等の實驗した厚さ 0.5 mm~3.0 mm の範圍で a₀ は約 1.0 mm から 1.35 mm の間に増加する。又これらの點を直線で假りに結んでゐるが上に曲る曲線の一部のみが表れてゐるのであるか否かは疑問の餘地があり、著者等の結果に於ても u の小さいものでは上の方が曲る傾向があるのではないかと思はれる結果も得られてゐるが、實驗した範圍内では假りに直線にのるものとして取扱ふ。

兎に角他の條件が一定であれば糸の直径 D と孔径 a の間には (1) $D = k_1(a - a_0)$, $W = K_1(a - a_0)^2$ なる關係がある。但し k, K は以下全てある常數とする。

2) b-D ガラスのヘッド及び温度を一定にして種々の孔径、捲取速度の場合の紡糸孔板の厚さ b と糸の太さ D との關係をみると第3圖の如くなり大體この様になだらかな下向の曲線に乗る。この曲線から板の厚さが厚い程直径が細くなり、孔径が大きくなると規則的に上にづれる。又速度が上ると下に移つて來る。兩邊の對數をとると第4圖の如く大體直線の上のりこの直線の傾斜

第3圖 紡糸孔板の厚さと纖維の直径



と a, u の関係は明瞭でないが、兎に角 $D = \frac{k_2}{b^2x}$ なる形式で表され W に直せば $W = \frac{k_2}{b^2x}$ で $2x$ は $0.4 \sim 0.7$ の間にある。

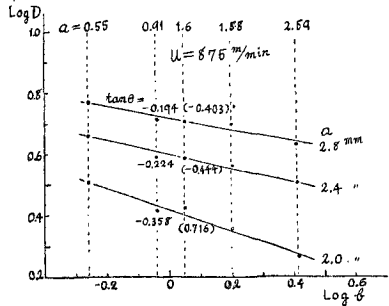
3) $u-D$ この関係は u を變へた場合の a と D の関係圖(第4報4, 5, 6圖)から書き直す事が出来るが第4報第1, 2圖に例示した如く双曲線型の曲線群になる。

4) $u-W$ 捲取速度によつて引出されるガラスの重量が如何に變るかに就ては以前の報告¹⁾に於て、捲取速度が速くなると糸が細くなりその影響が打消し合つて結局

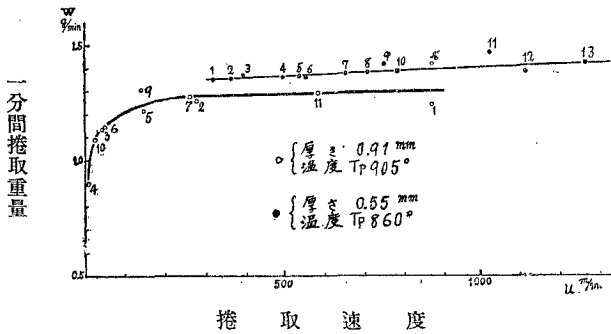
速度を變へても捲取量は殆ど變化しない事を述べた。今回はその點を更に詳しく知る爲にヘッ

ドの影響の入らない方法を構じて捲取速度約 6 m/min から 1300 m/min の間で調べてみた。捲取量は孔径、プレートの厚さ、ヘッド、溫度等によつて變つて來るが例へば $b = 0.91 \text{ mm}$ の紡糸孔板を使つた場合には第5圖下の曲線の如くなり $b = 0.55 \text{ mm}$ の紡糸孔板を使つた場合には上の線の如くなる。即ち捲取速度が早くなれば著者等の實驗では約 300 m までは W の増加の仕方が急であるが、それ以上速くなつても極めて徐々にしか増加しない。實驗した普通の捲取速度の範圍では近似的に W は變化しないと考へると式の如く D は u に逆比例するわけで $D-u$ 曲線は近似的に2次の双曲線であると云ふ事が出来る。

第4圖 紡糸孔板の厚さと繊維の直径



第5圖 捲取速度と捲取量

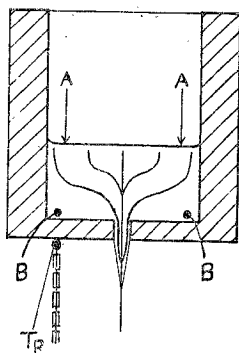


5) ヘッドの影響

ガラスが小さな孔から引出される場合にはヘッドは餘り影響しない様にも考へられるが、捲取り得る條件の下に於ては實際にはこの影響は相當に大きい(第4報第7圖)。即ち紡糸孔板が薄い程ヘッドの影響は大きくなり溫度の高い程大になる。これらの曲線は足の方で曲つて複雑な形をして居り、ヘッドが 1 cm 内外まで減つて來ると紡糸孔板下面の溫度は一定に表れてゐるのにいづれの場合もかへつて流出量が多くなる。この原因は或ひは次の様なことではないかと想像される。即ち第6圖の如き流線を以てガラスが孔から引出されるものと考へられるが増埒

1) 化研講; 12, 45, 昭16.

第6圖 紡糸孔を流出するガラスの流線の想像圖



内ガラス表面の温度はガラス内部の温度より高いものと思はれ、底の方の孔から遠いBの如き部分のガラスは孔の中心線に近い部分ほど動かない。ヘッドがある程度小さくなると表面の高温の部分が孔の中に引込まれるためにBの部分の温度、従つて T_p に表れる温度は殆ど變らないにも拘らず孔から出て来るガラスは高温のものになり従つて流出量が増しそのため糸が太くなるのではないかと考へられる。實際問題としては孔はもつと多數にあげてあり更に孔もガラスの出易い形にしてある上に第一この様にヘッドの低い状態で紡糸することはないのでこの現象は實際的には餘り重要性がない。

著者等の實驗ではヘッドと捲取量の關係を示す曲線は5 cm以下と云ふ低い所しかやつてないので確かなことは言へないが、兎に角ヘッドの影響は相當に大きく、 T_p に表れるあまり鋭敏でない温度變化よりも遙に影響の大なるものであることから實際に製品を作る場合には自動的に原料ガラスを補給する装置を使はないと太さの揃つた糸を作り難い事が判る。この曲線の大体規則的な部分を用ひ兩邊の對數を取つてその大体の直線の傾斜から $W = K_1 H^y$ の形式の y を求めると大体0.4~0.6になる。

以上得られた個々の場合を綜合すると結局

$$D = k \frac{(a - a_0) H^{0.2-0.3}}{b^{0.2-0.35} \sqrt{u}}$$

$$W = K \frac{(a - a_0)^2 H^{0.4-0.6}}{t^{0.4-0.7}}$$

なる形式の式が得られる。

さて毛细管から粘性を持つた液體が流出する場合の流出量は粘度があまり大きくない場合には Poiseuille の式で表され、著者等の場合と同一の記號を用ひて表せば

$$W = K \frac{a^4 H}{b \eta}$$

なる式で表され、管の直径の影響が非常に大きいことがわかる。Richardson¹⁾が直径1~2 cm、長さ5~7.5 cmの白金合金のダイスから1050~1300の間で流出するNa²D 14~22%のガラスの量を測つた實驗では

$$W = K' \frac{a^{2.5} H^{0.5}}{b^{0.5} \eta^{1.6}}$$

なる式を得てゐる。結局粘度の高い液體ほど孔の徑、管の長さ、ヘッド等の影響が少くなる事

1) Richardson; J. Amer. Ceram. Soc., 17, 1934.

が判り、孔の寸法やガラスの組成が著者等の場合と比較にはならないが、大體同一形式の實驗式で表され、特に違ふ點は著者等の式では孔径が2乗の形で入つてゐることである。直径がそのまま2乗の形で入つて來れば素麵や粘土の様なものゝ孔から押し出す場合に示す塑性を表してゐることになるがa。なる極小の孔径を持つてゐる所がこれ等と異なる。又粘度は前にも示した通り次第に増加して行つてゐるのでこの2例の場合とはその點が異つて居り、如何なる場合にも當はまる實驗式を得ることは難しいと考へられる。以上を要するに著者等の用ひた組成のガラスでこの様に特に簡単な形の孔から引き出されるガラスに就て限られた範圍でこの様な實驗式を得ることが出來たに過ぎない。今後は更にガラスの組成を變へ孔の形を變へて更に詳しく調べてみたいと思ふ。

(附記 以上第3-5報の實驗に當り終始熱心に御援助下さつた本間一雄・内山日吉兩氏に厚く感謝の意を表す)