石英系光ファイバ素線紡糸条件の
紡糸張力およびネックダウン形状への影響*福谷和久^{*1}, 豊島史郎^{*2}
豊秀喜^{*3}, 山本淳^{*3}Effects of Drawing Condition on Drawing Tension and Neck-Down Profile
in Optical Fiber Drawing from Silica Glass PreformKazuhisa FUKUTANI^{*4}, Shiro TOYOSHIMA,
Hideki YUTAKA and Atsushi YAMAMOTO^{*4} Mechanical Engineering Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd.,
1-5-5 Takatsuka-dai, Nishi-ku, Kobe-shi, Hyogo, 651-271 Japan

Numerical calculation of silica glass deformation in optical fiber drawing from preform has been carried out to reveal the effects of drawing condition on drawing tension and neck-down profile. Effects of drawing condition on drawing tension in optical fiber drawing are important in designing and setting of manufacturing process, because transmission characteristics of fiber is dependent on drawing tension when it is manufactured. Drawing condition is considered to have any effect on neck-down profile in drawing furnace, but it is not well known. This report presents numerical result of drawing tension and neck-down profile. It also shows how the distribution of value in drawing direction changes by drawing condition. The parameters of drawing condition are preform diameter, drawing velocity, heater temperature and its length. The ranges of them are 0.025~0.1 m, 10~25 m/s, 2 400~2 550 K and 0.05~0.2 m, respectively.

Key Words: Computer Aided Analysis, Sensitivity Analysis, Industrial Machine, Optical Fiber, Drawing

1. 緒言

筆者らは石英系光ファイバ素線の紡糸過程について、母材の熱流動変形の数値計算を用いた検討を行っている。前報⁽¹⁾では、本研究の定常数値計算の手法を説明し、一つの紡糸条件について計算結果を示した。

光ファイバ素線紡糸の生産性向上のため、高速の紡糸、大径母材の紡糸、が従来から求められている。このためには、母材をより速く、大きく変形させる必要があるから、熱的な条件が一定のもとでは所定径の素線をえるための紡糸張力が増加する。しかし他方で素線の伝送特性を良好に維持するためには、紡糸張力を一定に保つことが必要とされている。したがって紡糸の高速化、母材の大径化をしつつ、良好な伝送特性の素線をえるためには、ヒータ温度や長さといった熱的な条件をあわせて変更する必要がある。

このようなことから、紡糸張力とそれに影響する熱

的な条件は工程において重要であるが、これらを測定することは困難である。素線は細く、もろく、高速で移動しているから、素線を破損させることなく紡糸張力を接触測定することは難しい。また工程では素線に樹脂被覆を施した後に張力を付加している⁽²⁾ので、母材にかかる真の張力は明らかではない。さらに紡糸中の母材や加熱炉の温度分布などの熱的な条件の測定は、設備の制約から困難なことが多い。

以上のことから、紡糸の条件出しでは、条件を変更して紡糸した後に、素線の伝送特性を測定し、その結果から所定の張力が付加されているか確認することを多数繰り返す必要があるという問題がある。また炉内のネックダウン形状は熱的な条件を含む紡糸条件を反映していると経験的に考えられているが、紡糸条件とネックダウン形状の関係は必ずしも明らかではない。これまでの光ファイバ素線の紡糸過程の定常状態に関する研究⁽³⁾⁻⁽⁸⁾の紡糸条件は、母材径が小さく、紡糸速度が低い条件に限られており⁽¹⁾、現在の紡糸工程に対応する紡糸条件を含む幅広い範囲について、紡糸条件と紡糸張力およびネックダウン形状の関係を調べた研究はない。

本報告では、前報⁽¹⁾の計算手法をもちいたパラメー

* 原稿受付 2003年8月7日。

^{*1} 正員、(株)神戸製鋼所機械研究所(☎651-2271 神戸市西区高塚台1-5-5)。^{*2} 正員、(株)コベルコ科研(☎660-0083 尼崎市道意町6-32)。^{*3} (株)神戸製鋼所産業機械部(☎676-8670 高砂市荒井町新浜2-3-1)。

E-mail: k-fukutani@rd.kcril.kobelco.co.jp

で一定とした。ヒータ長さ L_h を変更する場合には、その上端の位置を固定して長さを変更し、その下端から下流の壁面温度 T_w の分布は、下端からの距離により決まるとした。

5. 計算結果および考察

5.1 紡糸張力への影響 母材直径 D_0 と紡糸張力 F_f の関係を図 2 に示す。紡糸張力は母材直径に対して一次関数的に増加した。

Figure 10 is a plot of the normalized force F_j [N] versus the normalized diameter D_c [m]. The plot shows four data series for different temperatures T_h : 2400K (circles), 2550K (triangles), 2500K (squares), and 2450K (diamonds). The force generally increases with diameter for all temperatures. The 2400K series shows the highest force, while the 2550K series shows the lowest. The 2500K and 2450K series are intermediate. The plot includes a dashed line for the 2400K series and a solid line for the 2550K series. The y-axis ranges from 0 to 2.5 N, and the x-axis ranges from 0 to 0.12 m. The legend indicates T_h values: 2400K (circle), 2550K (triangle), 2500K (square), and 2450K (diamond). The plot also includes the parameters $W_f = 15\text{m/s}$ and $L_h = 0.1\text{m}$.

Fig. 2 Drawing tension vs. preform diameter

つぎに紡糸速度と紡糸張力の関係についてみる。この関係については Pack and Runk⁽⁸⁾および Vasiliev ら⁽⁹⁾が計算結果を示している。これらの報告では、紡糸張力は紡糸速度にほぼ比例し、紡糸速度の増加につれて比例関係とのずれが拡大している。しかし前者は下方に、後者は上方にずれており方向が異なっている。なおネックダウン形状とその部分の温度分布が紡糸速度によらず一定であるとする、紡糸張力は紡糸速度に比例することを基礎式から解析的に確認することができる。

本計算により得られた紡糸速度 W_f と紡糸張力 F_f の関係を図3に示す。図中の破線は比例関係を表す直線である。紡糸張力は紡糸速度にほぼ比例し、紡糸速度の増加につれて、比例関係から下方にずれた。これは

Figure 10 is a plot of the force F_f [N] versus the velocity W_f [m/s] for a particle with diameter $D_o = 0.05$ m and length $L_h = 0.1$ m. The plot shows four data series for different temperatures T_h : 2400 K (open circles), 2450 K (open squares), 2500 K (open triangles), and 2550 K (open diamonds). Each series is accompanied by a dashed line representing a linear fit. The force increases with velocity for all temperatures, with higher temperatures resulting in lower forces for a given velocity.

$D_o, D_w = D_0 + 0.01 \text{ m}$
 $T_o = 1000 \text{ K}$

Reform

Neck-down

Radiation

Wall

Convection

Gas

g

$T_g = 800 \text{ K}$

$F_p D = 125 \mu\text{m}, W_f$

0

T_w

T_g

High Temperature Zone

L_h

z

$z_f = 1.9 \text{ m}$

Fig. 3 Drawing tension vs. drawing velocity

Pack and Runk⁽³⁾と同様の傾向であった。これは後に示すように、紡糸速度の上昇とともに、母材温度の低下する領域において、母材の高温、低粘性の領域が下流側に広がるためである。

つぎにヒータ温度 T_h およびヒータ長さ L_h と紡糸張力 F_f の関係を図 4 および 5 にしめす。紡糸張力はこれらの値と反比例的な関係となった。

図 2 から 5 によると、ヒータ温度 T_h が低いほど紡糸張力が高く、条件による紡糸張力の差も大きいことが分かる。これは母材の温度が低いほど、母材の粘性率とその温度依存性が大きいため、条件による母材の温度分布の変化が、紡糸張力の差としてあらわれやすくなるためである。

Fig. 4 Drawing tension vs. heater temperature

Fig. 5 Drawing tension vs. heater length

5.2 ネックダウン形状への影響

各パラメータのネックダウン形状への影響を、基準条件との直径の差の分布からみていく。図 6 から 9 に各パラメータを変更したときの基準条件 Case (a) [母材径 $D_0=0.05\text{m}$, 紡糸速度 $W_f=15\text{m/s}$, ヒータ温度 $T_h=2450\text{K}$, ヒータ長さ $L_h=0.1\text{m}$] との直径の差 ΔD の分布の変化を示す。図中の波線は Case (a) の直径の分布である。また縦軸に平行な破線はヒータ長さ $L_h=0.1\text{m}$ の時のヒータ上端 HU と下端 HL の位置を示す。

図 6 によると母材直径 D_0 が大きくなるのにもなつて、ヒータ上流からヒータ下端 HL 付近にかけて直径差 ΔD が大きくなっている。この差はヒータ領域 (HU から HL) では上端 HU 付近で最大であり、下端 HL から下流ではきわめて小さかった。これは下端 HL から下流の母材温度は母材直径 D_0 にほとんど依存しないためである。上端 HU での直径差は最大で 0.01m 程度であった。

Fig. 6 Effects of preform diameter on neck-down profile

つぎに紡糸速度 W_f が上昇するにつれて (図 7), ヒータ付近の直径差 ΔD が大きくなった。その差はヒータ上端 HU 付近において最大となり、下流に向かって減少したが、ヒータ下端 HL より下流においても差が認められた。上端 HU 付近の直径 D が拡大するのは、母材半径方向の温度差が大きくなり断面平均の粘性率が上昇するためである。下端 HL よりも下流については、母材が高温、低粘性に保たれる領域が下流側に拡大するためである。これらの分布の変化は後に示す。上端 HU および下端 HL 付近の直径差は、それぞれ最大で 0.004m 程度および 0.001m 程度であった。

Fig. 7 Effects of drawing velocity on neck-down profile

ヒータ温度 T_h が上昇すると (図 8), ヒータ付近の直径差 ΔD が減少した. その差はヒータ上端 HU 付近において最大であり, 下端 HL 付近では差は比較的小さかった. このようにヒータ領域の直径が減少するのは, ヒータ温度の上昇にともなう, この領域の母材温度が上昇し, 粘性率が低下するためである. しかしこのとき下端 HL より下流では温度上昇は小さいため, 直径の差は比較的小さかった. 上端 HU 付近の直径差は最大で 0.004 m 程度であった.

Fig. 8 Effect of heater temperature on neck-down profile

最後にヒータ長さ L_h が長くなると (図 9), ヒータ領域の直径差 ΔD が大きくなるとともに, 差が認められる領域が下流側に拡大した. これは後に示すようにヒータ長さに対応して, 母材の高温領域が拡大するためである. 図 7 および 8 ではヒータ上端 HU 付近で条件による直径差が最大であったが, 図 9 ではそれが最大となる位置も変化している. このことから他のパラメータに比べて, ヒータ長さの変化によるネックダウン形状の変化は特徴的であるといえる. このときの直径差は最大で 0.005 m 程度であった.

Fig. 9 Effect of heater length on neck-down profile

5.3 諸量の分布の変化 四つの変数から紡糸速度 W_f およびヒータ長さ L_h の二つを取り上げ, これらにより諸量の分布がどのように変化するかをみていく. ここで紡糸速度は紡糸張力との関係が既存文献⁽³⁾⁽⁵⁾と比較できるため, ヒータ長さは前節においてネックダウン形状への影響が特徴的であったため, それぞれ取り上げた. 紡糸速度 W_f およびヒータ長さ L_h の諸量の分布への影響をそれぞれ図 10 および図 11 に示す. 炉壁面温度 T_w は計算条件として仮定した分布である. 図中の記号の NU, NL, HU, HL および VGM は前報⁽¹⁾と同様にそれぞれ Case (a) のネックダウン領域の上流端, 下流端, ヒータ領域の上流端, 下流端および速度勾配の最大位置を示す.

まず母材中心温度 T_c および断面平均粘性 η_m の分布に着目すると, いずれの条件についても, ネックダウン領域 (NU から NL) をつぎの領域 I から III に分けることができると考えられる.

領域 I: 母材が加熱され温度が上昇し, 粘性率が低下する領域 (NU から HU 付近)

領域 II: 温度および粘性率がほぼ一定に保たれる領域 (HU 付近から HL 付近)

領域 III: 母材が冷却され温度が低下し, 粘性率が上昇する領域 (HL 付近から NL)

ここで領域 II では, 粘性率および張力がほぼ一定であるから, 直径が指数関数的に減少している⁽¹⁾.

紡糸速度 W_f が増加すると (図 10), 領域 I および II の母材中心温度 T_c および断面平均粘性率 η_m の分布はほとんど変化していないが, 領域 III においてこれらの勾配が小さくなっている. このとき直径 D はほぼ全領域において大きくなるが, その変化の割合は領域 III において最も大きい. これは紡糸速度の上昇にともなう, 主に領域 III の平均粘性率 η_m が低下しているためである. これらのことから, 紡糸速度の上昇にともなう, 主に領域 III の高温, 低粘性の領域が拡大し, この領域の直径が拡大して, 紡糸速度と紡糸張力の関係が図 3 のように比例関係から下方にずれるものといえる.

ここで図 7 のネックダウン形状の差について考える. 紡糸速度が上昇すると, 半径方向の温度差 ($T_r - T_c$) が拡大しており, その幅はヒータ上端 HU の上流において大きい. このため, この領域の断面平均の粘性率が上昇し, 直径の減少勾配 ($-dD/dz$) が小さくなる. ヒータ上端 HU 付近の勾配は領域内で最大である⁽¹⁾ため, 勾配の変化が図 7 の上端 HU 付近の直径の差として表れている.

つぎにヒータ長さ L_h が長くなると (図 11), 領域 I

Fig. 10 Effects of drawing velocity on drawing process

Fig. 11 Effects of heater length on drawing process

の母材中心温度 T_c および断面平均粘性率 η_m の分布、および領域 III のこれらの勾配はほぼ一定であるが、領域 II がヒータ長さと対応して長くなる。このとき直径 D はほぼ全領域において大きくなるが、その差は領域 II において大きい。これは領域 II が長くなるのにもなっており、ヒータ上端 HU 付近の直径の減少勾配 ($-dD/dz$) が小さくなるためである。このように図 9 の特徴的な直径の差が生じている。

筆者らは母材直径 D が小さい領域の母材変形の程度を表す量として速度勾配 dW/dz の分布に注目している⁽¹⁾。本報告では、紡糸条件によるその分布の変化を指摘しておく。まず紡糸速度 W_f が増加したとき (図 10)、速度勾配が増加し始める位置はほとんど変わらないが、それが卓越する領域は下流に広がる。それが最大となる位置は下流に移動し、最大値は若干大きくなる。つぎにヒータ長さ L_h が長くなると (図 11)、速度勾配が増加し始める位置が下流に移動し、それにもなっており卓越する領域と最大位置も下流に移動する。このとき最大値は若干大きくなる。ここで紡糸速度およびヒータ長さによらず、速度勾配の最大位置の直径は $200\mu\text{m}$ 程度であり、前報に述べた近似的な算出方法⁽¹⁾が依然として有効であることが確認できる。速度勾配の分布の重要性については外径変動と関連づけながら次報において詳しく報告する。

6. 結言

本報告では、前報⁽¹⁾の計算手法をもちいて、石英系光ファイバ素線の紡糸条件が紡糸張力およびネックダウン形状に与える影響と、紡糸条件による諸量の分布の変化を、紡糸の条件出しを合理的に行うための材料として示した。

紡糸条件と紡糸張力およびネックダウン形状の関係について次のような結果を得た。

- (1) 紡糸張力は母材直径に対して一時間数的に増加する。
- (2) 紡糸張力は、紡糸速度にほぼ比例して増加し、速度の上昇にもなっており比例関係から下方にずれる。

これは母材温度の降下領域において高温、低粘性の領域が下流側に広がるためである。

- (3) 紡糸張力は、ヒータ温度およびヒータ長さと反比例的な関係にある。
- (4) (1)から(3)のときの紡糸条件による紡糸張力の差は、ヒータ温度が低いほど、大きくなる。
- (5) 母材径が大きくなると、ヒータ上流からヒータ下端にかけて直径が拡大する。しかしヒータ下端付近から下流では直径差はほとんどない。
- (6) 紡糸速度の上昇にともない、ヒータ付近の直径が拡大する。このときの直径差は、ヒータ上端付近において最大となり、下端から下流においても差が認められる。
- (7) ヒータ温度が上昇すると、ヒータ付近の直径が小さくなる。このときの直径差は、ヒータ上端付近において最大となり、下端から下流では比較的小さい。
- (8) ヒータが長くなると、ヒータ付近の直径が大きくなり、直径差の認められる領域が拡大する。これはヒータ長さに対応して、この付近の母材の高温領域が広がるためである。

次報ではこれまでの計算結果をもとにして、素線の外径変動の数値計算を行う。

参考文献

- (1) 福谷ほか3名, 機論 C 編, 69(2003), 1670-1677.
- (2) Murata H., Handbook of Optical Fibers and Cables 2nd ed, Marcel Dekker, Inc., (1996), 101-108.
- (3) Pack, U. C. and Ruck, R. B., J. Appl. Phys., 49(1978), 4417-4422.
- (4) Hornsby, G. M. and Walker, K., Glass Technology, 20(1979), 20-26.
- (5) Vasiliev, V. N. et al, Glass Technology, 30(1989), 83-90.
- (6) Lee, S. H.-K. and Jaluria, Y., ASME/JSME Thermal Engineering Conference, 4(1995), 85-93.
- (7) Choudhury, S. R. et al, ASME HTD, 306(1995), 23-32.
- (8) Lee, S. H.-K. and Jaluria, Y., Journal of Heat Transfer, 118(1996), 350-358.