

# ガラスファイバーの2点曲げ強度

(滋賀県立大学)○井上雅仁・吉田智・松岡純(日本電気硝子(株))加藤嘉成・山崎博樹

**2-point bending strength of glass fibers** / ○M. Inoue, S. Yoshida, J. Matsuoka (U. Shiga Pref.) Y. Kato, H. Yamazaki (Nippon Electric Glass Co. Ltd.) / Failure strains of some glass fibers are measured by 2-point bending test at liquid nitrogen temperature. The failure strength is calculated with failure strain and Young's modulus of glass. At a face-plate rate of 50  $\mu\text{m/sec}$ , failure strains are 12 % (failure strength is 8.3 GPa) for silica glass, 15 % (10 GPa) for soda-lime glass and 16 % (10 GPa) for lead glass, respectively. High failure strength of lead glass fiber suggests that 2-point bending strength of glass fiber is determined not only from interatomic bond strength but also from inelastic energy dissipation on fracture.

## 1. 緒言

ガラスの強度はその表面上の微細な傷によって支配される。原子間の結合力から求められるガラスの理論強度は 10 GPa を超えるのに対し、製品ガラスの強度は 100 MPa 程度である。これはガラス表面に存在する傷の先端に応力が集中し、負荷応力が理論強度以下であっても傷の先端の応力が理論強度を超えることが原因であるとされる。そのため、表面に微細な傷の存在しないガラス試料の強度測定を行う事ができれば、ガラス本来の強度(本質強度)の測定が可能となると考えられる。本研究ではガラスの本質強度の測定を目的として、空気以外に触れないように作製したガラスファイバーの2点曲げ強度測定を試みた。

## 2. 実験方法

図 1 にファイバー作製機の模式図を示す。試料ガラスは粉碎後、白金坩堝中で再熔融して電気炉内で一定温度に保持した。次に、坩堝から白金棒でガラスを引き上げ、一定速度で回転するケージに巻きつけガラスファイバーを作製した。その後ケージに接触していない部分のファイバーを試料として用いた。ファイバーの直径はガラス融液の温度と引き上げ速度をパラメータとして決定できるが、本実験では、引き上げ速度を 8.5 cm/sec とし、直径が 100~150  $\mu\text{m}$  となる試料を作製した。測定に用いたガラスはシリカガラス、ソーダ石灰ガラス、鉛ガラスとした。シリカガラスは線引きを行わず市販の光ファイバーを用いた。光ファイバーのポリマー被覆は 180 °C の熱濃硫酸に 10 秒浸することで除去した。

図 2 に2点曲げ試験機に用いる試料治具の模式図を示す。ガラスファイバーは U 字型に折り曲げ 2つのプレートに挟み、液体窒素中にセットした。片側の平行板をファイバーが折れるまで移動させ、破断時の平行板距離をアコースティックエミッションにより決定した。ファイバー破断時の平行板距離  $D$  とファイバーの直径  $d$  から破壊ひずみ  $\varepsilon_f$  を求めた<sup>1)</sup>。

$$\varepsilon_f = 1.198 \frac{d}{D-d} \quad (1)$$

また、平行板の移動速度は 50  $\mu\text{m/sec}$  および 2000  $\mu\text{m/sec}$  とした。

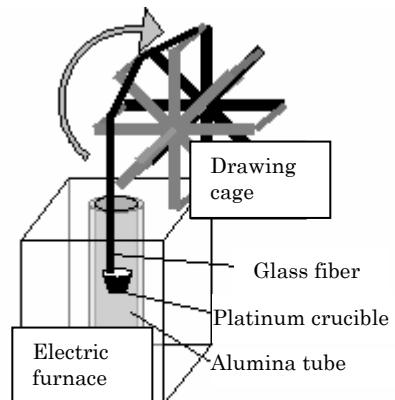


Fig. 1 Layout of fiber puller.

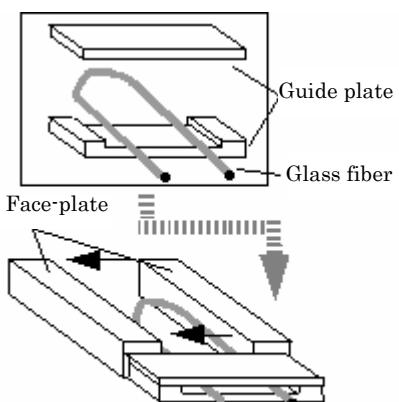


Fig. 2 Schematic of 2-point bender.

### 3. 実験結果・考察

図3に平行板移動速度 50 μm/sec で得られたファイバー2点曲げ破壊ひずみのワイブルプロットを示す。図4は2000 μm/secで測定した破壊ひずみのワイブルプロットを示している。ここでは、(2)式を用いてワイブル係数  $m$  を求めた。

$$-\ln(1-F) = \left(\frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_0}\right)^m \quad (2)$$

ここで、 $F$ は累積破壊確率、 $\varepsilon_0$ は定数である。いずれの平行板移動速度においても、シリカガラス、ソーダ石灰ガラス、鉛ガラスの順に破壊ひずみは大きな値を、ワイブル係数は小さな値をとった。

シリカガラスについて2点曲げ破壊ひずみの値から破壊応力を算出した。平行板移動速度 50 μm/secにおけるシリカガラスの平均破壊ひずみ  $\varepsilon_{f\_ave} = 12$  (%)、ヤング率  $E = 72$  (GPa)<sup>2)</sup>を用いて(3)式より破壊応力  $\sigma_f$  を算出したところ 8.6 GPa となった。

$$\sigma_f = E \times \varepsilon_f \quad (3)$$

ここで、ファイバーに存在する傷（亀裂）を平板表面の長さ  $2c$  の二次元亀裂と仮定すると、破壊応力と破壊靱性値は(4)式の関係となる。

$$K_{Ic} = \sigma_f \sqrt{\pi \cdot c} \quad (4)$$

得られた破壊応力と破壊靱性値  $K_{Ic} = 0.81$  (MPam<sup>1/2</sup>)<sup>2)</sup>を用いて亀裂長さ  $2c$  を算出したところ 5.6 nm となった。この亀裂長さは、ガラス構造の構成単位 0.5~1 nm と比較すると大きいが、理論強度に近いものが得られたと考えている。また、シリカガラスのワイブル係数が、他のガラスに対して大きいのは自作炉で線引きしておらず、亀裂長さのばらつきが小さかったためだと考えられる。

表1に、用いたガラスのヤング率、算出した破壊応力、破壊靱性値、ビッカース硬度を示す。ファイバー作製機を用いて線引きした鉛ガラスとソーダ石灰ガラスを比較すると、ヤング率や破壊靱性値に差があるにもかかわらず破壊応力が同程度であることがわかった。ファイバー作製条件は同じであることから、ガラス間の亀裂長さの差は小さいと仮定すると、この結果はガラスの破壊強度が原子間結合力によってのみ決定されるのではなく、破壊時の非弾性的なエネルギー散逸による影響を受けることを示唆している。

Table 1 Young's modulus, failure strength, fracture toughness and Vickers hardness of glass.

Glass	Young's modulus /GPa	Failure strength / GPa at a face-plate rate of 50μm/sec	$K_{Ic}$ / MPam <sup>1/2</sup>	Vickers hardness / GPa
Silica	72 <sup>2)</sup>	8.3	0.81 <sup>2)</sup>	7.0 <sup>3)</sup>
Soda-lime	71	10	0.75	5.6
Lead	63	10	0.66	4.5

1) M. J. Matthewson and C. R. Kurkjian, *J. Am. Ceram. Soc.* **69** [11] 815-21 (1986).

2) S. M. Wiederhorn, *J. Am. Ceram. Soc.* **52** [2] 99-105 (1969).

3) S. Yoshida, J.C. Sangleboeuf, and T. Rouxel, *J. Mater. Res.* **20** [12] 3404-12 (2005).

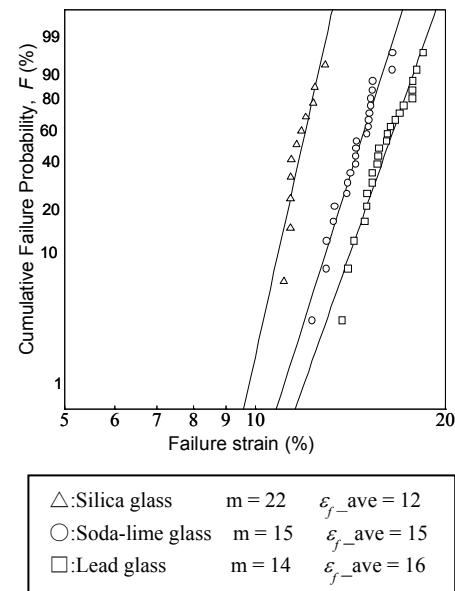


Fig. 3 Weibull plot of failure strain at 50 μm/sec.

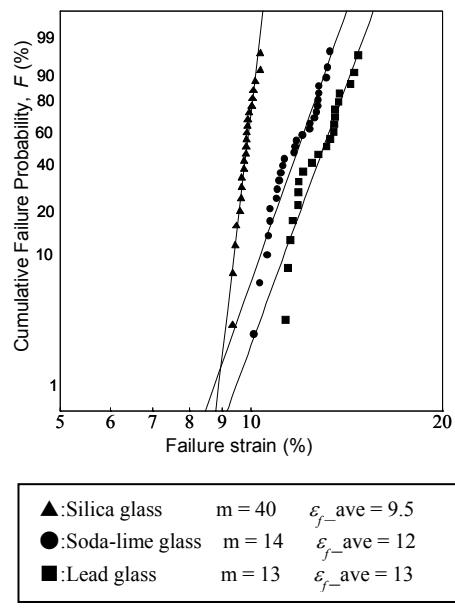


Fig. 4 Weibull plot of failure strain at 2000 μm/sec.