光学ガラスの押し込みかたさ

鈴木 勲・泉谷 徹郎

((株)保谷硝子 技術研究所)

Indentation Hardness of Optical Glass

By

Isao SUZUKI and Tetsuro IZUMITANI

(Hoya Glass Works Ltd.)

This investigation was made to clarify how the indentation hardness of optical glass depends upon the effect of densification or plastic flow.

To examine the effect densification has upon indentation hardness, optical glasses with Knoop indentations were heat-treated at temperatures below their transition temperature. After heat-treatment, the percentage of change in the longer diagonal length of Knoop indentations was measured. These experiments were carried out on fused silica, BK, K, KF, F, SF, SK, SSK, BaF and BaSF glasses. Indentation recovery was found to be very small in optical glasses. Further, it was found that SF glasses which have the largest indentations show little or no change, while BK glasses which have small indentations show a much greater percentage of change. These results show that indentations in optical glasses are not always related to densification.

Using an interference microscope, Knoop indentation perimeters were observed in BK, KF, LLF, LF, F, SF, SK and SSK glasses. Without exception, a hump was found to be formed entirely around each indentation. This humping phenomenon shows that plastic flow occurs during indentation. Moreover, it was found that the ratio of the width (c') of the hump around the shorter diagonal to the shorter diagonal length (a') is approximately proportional to c/a calculated from Hill's theory on plastic-elastic materials, where (a) is the spherical radius of the cavity generated by a pressure and (c) is the spherical radius of the plastic region around the cavity. This means that Hill's theory can be applied to the indentation phenomenon of optical glass and accordingly the indentation of optical glass is always related to plastic flow.

The relationship between Young's modulus and glass composition was found to be almost parallel to the relationship between Knoop hardness and glass composition. Both Knoop hardness and Young's modulus increased with the content of net-work former. This supports Hill's theory. It was also found that c/a decreases with the content of glass net-work former.

From these experimental results, it would be concluded that the indentation hardness of optical glass, which contains a large amount of net-work modifier, is far more an expression of resistivity to plastic flow than densification.

[Received March 8, 1972]

1. 緒 言

微小押し込みかたさは、比較的簡単に測定できる材料の物性値の1つで、その実用的な意味の他に、ガラスの構造および機械的性質に関する情報を得る重要な手段としても用いられてきた¹⁾。

しかしながら、ガラスでは、圧子の押し込みによる変形過程・機構は、まだ充分には明らかにされておらず、圧子の押し込みによる圧痕の形成が、ガラスのどのような性質に基づくものか、どのような性質を意味するもの

か明らかにされていない。この圧子の押し込みによる圧痕の形成に関しては、従来、主な説として、それが材料の densification によるものとする説^{2)~4)}と、ガラスの microplasticity と結びつけ、材料の plastic flow によるものとする説がある^{5)~7)}。例えば、Neely, Mackenzie³⁾は、石英ガラスについて、転移点以下の温度でビッカース圧痕を熱処理し、その時に圧痕の大きさが減少する。つまり回復するということから、圧子の押し込みによって形成された圧痕部分は密度が増大しており、したがって石

Fig. 1. Spherical shell model of Hill's theory on plastic-elastic material.

英ガラスの押し込み圧痕は、材料の densification によって形成され、その押し込みかたさ値は、材料の densification に対する抵抗として定義すべきであるとしている。

一方 Marsh^{6),7)} は、従来から知られているガラスの microplastic な挙動を示唆する実験結果⁶⁾から、押し込み圧痕は、ガラスの塑性変形によるものとし、押し込みかたさ値からガラスの降伏応力を計算し、強度との関係を論じた。すなわち、金属などの押し込みかたさは、通常、塑性理論で解釈されているが、Marsh は、ガラスは金属に比べてヤング率が低く、一方その降伏応力が高い材料と考えられるので、押し込み過程での材料の弾性変形も考慮に入れ、Hill の弾塑性体に対する球殻の理論⁸⁾を修正して降伏応力を求めた。その結果、この降伏応力と flawless glass fiber の強度がよく一致すると報告している。

Hill によれば、均一な無限の拡がりをもった材料中に、図-1 に示したような空洞になった球を考え、その内部から一様な圧力をかけて球殻を押し上げた場合に、球殻の半径が 0 から a に押し上げられたときの圧力を H 、その時に球殻の外側に形成される塑性領域の端までを c とすると、次の関係が求められる。

$$\left(\frac{c}{a}\right)^3 = \frac{E}{3(1-\nu)Y} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$H = \frac{2}{3} Y \left\{ 1 + 3 \ln \left(\frac{c}{a} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 E はヤング率、 ν はポアソン比、 Y は降伏応力である。 H を押し込みかたさと考え、Hill の理論では (2) 式に示されたように、かたさは、材料の降伏応力が高いほど、また押し込み量 (a) に対する塑性変形領域の拡がり (c) の割合を示す c/a が大きいほど、大きな値を示す。また c/a は、(1) 式に示されるように、ヤング率と降伏応力によって決定されるので、結局かたさは降伏応力とヤング率の関数であり、降伏応力、ヤング率の高いほど大きな値を示す。

本研究では、種々の光学ガラスについて、押し込み圧痕の熱処理による回復の割合を測定し、また圧子の押し込みによる圧痕周辺部の「盛り上り」の有無を干渉顕微鏡で観察し、実際に使用されている光学ガラスで材料の

densification および plastic flow が、押し込み圧痕の形成にどのように寄与しているのかを明らかにすることを目的とした。更に、弾塑性体に対する Hill の理論を光学ガラスの押し込みかたさに適用できるかどうかを検討し、光学ガラスの押し込みかたさと物性の関係をより明確にすることを試みた。またガラス組成の面からも押し込みかたさを検討してみた。

2. 実験方法

2.1 押し込み圧痕の作成

当社で製造されている光学ガラスのブロックから適当な大きさに切り出し、研磨して、厚さ 10 mm 前後に仕上げたガラスプレートを試料に用いた。圧痕の作成には、自動負荷微小硬度計 (島津製作所製 NT-M001) を用い、室温で、ヌープ圧子を研磨された試料の測定面に 100~1000 g の荷重で押し込み、圧痕を作成した。負荷時間は 15 秒である。圧子に対角角が $172^\circ 30'$ と 130° のダイヤモンド四角錐であるヌープ圧子を用いたのは、通常の方法で研磨された試料の場合、ビッカース圧子では 50 g 程度の荷重でも圧痕からクラックが発生し、クラックを伴わない圧痕を得ることがかなり困難であるのに対し、ヌープ圧子では、比較的高い荷重まで、クラックを伴わない圧痕を容易に得ることができるためである。得られた圧痕の大きさとして、硬度計付属の金属顕微鏡を用いて 400 倍でヌープ圧痕の長い方の対角線長さを測定した。測定は、各試料で、7 個の圧痕について行ない、その平均値を圧痕の大きさとした。各測定値の平均値に対するばらつきは、 $\pm 1\%$ 程度である。

また、ヌープかたさ値は、圧痕を作成したときの荷重を、この圧痕の長い方の対角線の長さから求めた圧痕の投射面積で除した商 (つまり平均圧力) で表わされ、次式より求められる。

$$\begin{aligned} \text{ヌープかたさ} &= \frac{P}{\frac{1}{2} \cdot \cot \left\{ \frac{1}{2} (172^\circ 30') \right\} \cdot \tan \left\{ \frac{1}{2} (130^\circ) \right\} d^2} \\ &= 14.23 \frac{P}{d^2} \text{ (kg/mm}^2\text{)} \quad \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

ただし、 P は荷重 (kg)、 d は長い方の対角線長さ (mm) である。

2.2 圧痕の熱処理

圧痕の作成された試料を、所定の熱処理温度の電気炉中で 2 時間熱処理し、その後、2.1 で述べたのと同様に 400 倍の金属顕微鏡でヌープ圧痕の長い方の対角線の長さを測定し、熱処理による圧痕の大きさの変化を求めた。

2.3 圧痕の干渉顕微鏡観察

圧子の押し込みにより形成された圧痕並びに圧痕周辺部の形状を求めるために、反射干渉顕微鏡 (Leitz, Wetzlar) を用いて 500 倍の倍率で、ヌープ圧痕を観察

Fig. 2. Block diagram of apparatus for measuring Young's modulus⁹⁾.

した。光源はタングステンランプで、546 mμ の干渉フィルターを使用した。

2.4 ヤング率の測定

弾塑性体に対する Hill の球殻理論によると、押し込みかたさは降伏応力とヤング率の関数として表わされるので、光学ガラスのヤング率を測定した。ヤング率・ポアソン比は、パルス重畳法⁹⁾でガラス中の縦波および横波の音速を測定し、(4)~(6) 式の関係を用いて算出した。

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \text{.....(4)}$$

$$v_l = \sqrt{\frac{G}{\rho} \cdot \frac{4G-E}{3G-E}} \quad \text{.....(5)}$$

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1 \quad \text{.....(6)}$$

ただし、 v_s は横波音速、 v_l は縦波音速、 ρ は試料ガラスの密度、 E はヤング率、 G は剛性率、 ν はポアソン比である。

測定装置のブロックダイアグラムを図-2 に示した。変換子には、縦波には X-カット、横波には Y-カットの水晶を用いた。この変換子の共振周波数は 5 MHz である。

25×20×100 mm と 25×20×70 mm の2種類の大きさの試料を用いて測定し、その平均値から縦波および横波の音速を求めた。このヤング率の測定に伴う誤差は 1% 以内である。

3. 実験結果

3.1 圧痕の熱処理

Mackenzie らが石英ガラスのビッカース圧痕について行ったのと同様に、石英ガラスおよび $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-R}_2\text{O-(RO)}$ 系の BK、 $\text{SiO}_2\text{-R}_2\text{O-PbO}$ 系の KF・F・SF、 $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-BaO}$ 系の SK・SSK・BaF・BaSF などの種々の光学ガラスについて、ヌープ圧痕の熱処理による回復を測定した。図-3 は、荷重 200g、負荷時間 15 秒の条件で作成したヌープ圧痕を各試料ガラスの転移点以下の各温度で 2 時間保持し熱処理したときの圧痕の回復の割合を示したものである。光学ガラスでは、各ガラスの転移点近傍まで処理した。熱処理による圧痕の回復は処理温度の上昇とともに大きくなり、石英ガラスの圧痕は、Mackenzie

Fig. 3. Change in the longer diagonal length of Knoop indentation by heat-treatment.

らの測定結果とほぼ同程度の回復の割合を示した。しかし、光学ガラスでは、熱処理による圧痕の回復が、一般に石英ガラスのそれに比べてずっと少なく、最も大きな回復の割合を示した BK 7 でも 500°C での熱処理後で 2% 程度の回復を示したにすぎない。BK 系のガラスは、 $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-R}_2\text{O-(RO)}$ 系からなり、光学ガラス中では、網目形成酸化物（特に SiO_2 ）の含有量の最も多い部類に属するガラスである。また更に、 PbO を多量に含有した SF 系のガラスでは、熱処理による圧痕の回復がほとんど認められなかった。

図-4 は、荷重 100 g で各硝種に作成したヌープ圧痕を、400°C で 2 時間熱処理したときのヌープ圧痕の回復の割合と処理前の圧痕の大きさの関係を示したものである。図-4 は、圧痕の大きな SF ガラスがかえって圧痕の回復が少なく、逆に、圧痕の小さい BK ガラスがかえって大きな圧痕の回復のあることを示しており、圧痕の大きさが圧痕の回復、つまり densification 量に比例しないことを示している。なお、SF 系のガラスの転移点は、425°~435°C、BK 系のガラスの転移点は 550°~555°C で、図-4 は、SF 系のガラスの転移点付近で熱処

Fig. 4. Relationship between diagonal length of Knoop indentation and the percentage of change by heat-treatment.

Fig. 5. Interferogram of a hump around indentation perimeter in SF 5 glass. ($\times 500$)

理した結果を示したものである。

3.2 圧痕の干渉顕微鏡観察

種々の光学ガラスのスープ圧痕に「盛り上り」が存在するかどうかを確かめるために、スープ圧痕並びに圧痕周辺部の形状を反射干渉顕微鏡で観察した。

図-5 はその1例で、荷重 1 kg、負荷時間 15 秒の条件で SF 5 に作成したスープ圧痕の干渉顕微鏡写真である。圧痕の周辺部で明瞭な干渉縞の変化が認められる。しかも周辺部の干渉縞が圧痕内部における干渉縞と逆の方向に変化していることから、この圧痕周辺部分が盛り上っていることがわかる。この干渉顕微鏡写真から圧痕中央部（短い方の対角線上）での横断面の形状を求めたのが図-6 である。圧痕の深さ 3.3μ に対し、「盛り上り」の高さは 0.3μ 、また「盛り上り」領域は左右で 85μ にも及んでいる。この盛り上り領域は、ほぼ一様に対称に形成されている。SK 系のガラスおよび 3.1 の熱処理実験で比較的大きな圧痕の回復を示した BK ガラスなどでも同様に明瞭な盛り上りが観察された。荷重 500 g、負荷時間 15 秒の条件で各硝種に作成されたスープ圧痕の干渉顕微鏡写真（350 倍）から、短い方の対角線方向における盛り上り領域の幅を、投影機（日本光学製、10 倍）により拡大し、ノギスで測定した。同様に、圧痕の

Fig. 6. Shorter diagonal cross section profile of Knoop indentation.

横幅（短い方の対角線長さ）と長い方の対角線長さを測定し、その結果を表-1 にまとめた。ただし、圧痕の短い方の対角線長さ a_0 、盛り上り領域の幅 c_0 は、上記の様に測定された値であり、これらは、圧子がガラス面から除去され、圧痕が弾性回復した後の各々の大きさを示すものである。圧子の押し込み中でのこれらの値（それぞれ a' 、 c' ）を正確に測定することは困難であるが、弾性回復が少ないとされている長い方の対角線長さと圧子の形状から圧痕の短い方の対角線方向における弾性回復量を求め、実測値 a_0 、 c_0 を補正して、圧子の押し込み中での圧痕の短い方の対角線長さ・盛り上り領域の幅を推定した。すなわち、圧痕部分は、圧子が押し込まれている間は、圧子の形状にならうものとして、 a' をスープ圧子の幾何学的形状から長い方の対角線長さをを用いて

Table 1. Width of the hump around shorter diagonal and shorter diagonal length of Knoop indentation made under a load of 500 g for a 15 sec duration.

Glass Type	Indentation			Hump	
	$l(\mu)$	$a_0(\mu)$	$a'(\mu)$	$c_0(\mu)$	$c'(\mu)$
BK 7	117.5	12.4	16.5	47.6	51.7
KF 4	128.0	13.5	18.0	51.5	55.0
LLF 1	129.6	14.1	18.2	45.8	49.9
LF 6	132.5	14.2	18.6	48.0	52.4
F 4	136.3	14.8	19.2	60.2	64.6
SF 4	144.2	16.7	20.3	70.5	74.1
SF 5	139.9	15.5	19.7	66.1	70.3
SF 6	145.9	17.4	20.5	80.7	83.9
SSK 1	119.0	14.0	16.7	62.9	65.6

l : observed longer diagonal length

a_0 : observed shorter diagonal length

a' : calculated shorter diagonal length value from l

c_0 : observed width of the hump around shorter diagonal

c' : calculated value of the hump width around shorter diagonal from $c' = c_0 + (a' - a_0)$

計算で求めた. また c' は, $c' = c_0 + (a' - a_0)$ として補正した.

3.3 押し込みかたさと Hill の球殻理論

弾塑性体における Hill の球殻理論 (1), (2) 式から, 降伏応力 Y を消去すると次式が求められる.

$$H = \frac{2}{9} \cdot \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{1 + \ln\left(\frac{c}{a}\right)}{\left(\frac{c}{a}\right)^3} \dots\dots\dots (7)$$

(7) において, 圧力 H を押し込みかたさ値と考えると, この (7) 式から, 各材料の c/a 値が, 押し込みかたさ値, ヤング率およびポアソン比から計算で求めることができる.

図-7 は, パルス重畳法で測定した ヤング率・ポアソン比および荷重 100 g 荷重時間 15 秒の条件で測定したヌープかたさ値を用いて (7) 式から算出した c/a と, 表-1 に示された, 除荷による圧痕の弾性回復量を考慮し補正された盛り上り領域の幅 c' と圧痕の横幅 (ヌープ圧痕の短い方の対角線長さ) a' の比 c'/a' との関係を示したものである. 図-7 から, Hill の理論から計算で求められた c/a の値と実測された c'/a' の値はほぼ比例していることがわかる. すなわち, 分極性に富む PbO

を多量に含有した SF 6 などのように, 大きな盛り上り領域を示し, 圧痕の大きさに対する盛り上り領域の大きなガラスでは, 計算値 c/a の値が大きくなり, また計算値 c/a の値の小さな BK 7 などでは, やはり, 盛り上り領域も小さく, 実測値 c'/a' が小さくなっている. ただし, 図-7 において, c'/a' と c/a に 1:1 の対応がないのは, Hill の理論が, 球殻に対して誘導されたものであるのに対し, 実験では菱形のヌープ圧子が用いられたことによるものであろう.

また, (7) 式では, 押し込みかたさは, ヤング率と c/a の関数で, ヤング率に比例している. 図-8 は, 光学ガラスのヌープかたさとヤング率の関係を示したものである. ヌープかたさは, ヤング率の高いガラスほど高くなっており, ある幅をもってはいるが, 両者が比例していることがわかる. 同図におけるこの幅, つまりヤング率が同一でも, ヌープかたさの異なるガラスが存在するのは, 硝種によって c/a が異なるためであらう.

3.4 押し込みかたさとガラス組成

図-9 に, ガラス組成中の SiO_2 , B_2O_3 などの網目形成酸化物の含有量 (cationic%) とヌープかたさの関係を, ガラスを構成する成分から光学ガラスを分類したガラス系列¹⁰⁾に従って整理して示した. すなわち, 図-9 中の各ガラス系列は, ほぼ同一の種類成分から構成されており, 例えば, KF-SF 系は, SiO_2 - R_2O -PbO 系のガラスであり, SK-BaSF 系は, SiO_2 - B_2O_3 -BaO 系のガラスである. このようなガラス系列に従って両者の関係を検討してみると, 各ガラス系列内では, 両者の関係はかなり密接で, 網目形成イオンの含有量の増加と共に, 押し込みかたさが高くなっている. また, 各ガラス系列間

Fig. 7. Comparison of the calculated value of c/a from Hill's theory, with the observed value of c'/a' from the hump width and diagonal length of Knoop indentation.

Fig. 8. Relationship between Knoop hardness and Young's modulus.

Fig. 9. Relationship between Knoop hardness and glass net-work former content.

Fig. 10. Relationship between Young's modulus and net-work former content.

Fig. 11. Relationship between c/a and glass net-work former content.

では、網目形成イオンの含有量が同一でもヌープかたさに差が認められるが、これは、ヌープかたさが修飾酸化物の種類によって副次的に影響されることを示している。修飾酸化物として、主として BaO を含有している SK-BaSF 系の方が、分極性に富む PbO を含有する KF-SF 系よりヌープかたさが高くなっている。

Hill の理論から導いた (7) 式では、押し込みかたさは、ヤング率と c/a の関数であるが、図-10 は、ヤング率と網目形成イオンの含有量 (cationic%) の関係を示したものである。ヤング率もヌープかたさと同様に、網目形成イオンの含有量に支配され、網目形成イオンの含

有量の増加と共に高くなっている。またこの場合も、修飾酸化物の種類によってヤング率が影響され、ガラス系列間に差が認められる。図-11 には、(7) 式から計算で求めた c/a と網目形成イオンの含有量 (cationic%) の関係を示した。 c/a は、網目形成イオンの含有量が増加すると減少しており、また網目形成酸化物として B_2O_3 を比較的多量に含有している SK-BaSF 系は c/a が大きくなっている。

4. 考 察

4.1 densification と押し込みかたさ

densification が光学ガラスの圧痕の形成に寄与する割合を、圧痕の熱処理による回復の割合から検討した。図-2, 図-3 に示したように、網目形成酸化物、特に SiO_2 の含有量の多い BK ガラスなどでは、熱処理による圧痕の回復の割合が、他の光学ガラスに比べて比較的大きな値を示しているが、石英ガラスに比べるとずっと少なく (約2%), これらのガラスでも圧痕の形成に densification が寄与する割合はごくわずかであると考えられる。また、熱処理によってほとんど圧痕の回復を示さない SF ガラスなどは、圧痕の形成に densification がほとんど寄与していないと思われる。

また更に、図-3 に示されたような、SF ガラスのように大きな圧痕の形成されるガラスで熱処理による圧痕の回復がほとんどなく、逆により小さな圧痕の形成される BK ガラスの方がより大きな回復の割合を示すという実験結果は、光学ガラスの押し込み圧痕が材料の densification だけで形成されるとするのは困難であるということを示すものと考えられる。もし、押し込み圧痕が材料の densification だけによって形成されるとすれば、転移点の低い SF ガラスの熱処理による回復の割合は、すくなくとも、転移点の高い BK ガラスの回復の割合と同程度以上でなければならないと思われるからである。したがって、以上の熱処理による実験結果は、一般に修飾酸化物を多量に含有した光学ガラスの押し込みかたさを材料の densification というだけで解釈することはできないことを示したものであると考えられる。

4.2 plastic flow と押し込みかたさ

一般に、光学ガラスの押し込み圧痕に、図-5 に示したような明瞭な盛り上りが認められたことは、圧子の押し込みによってガラスが流動したことを示しており、圧痕の形成にガラスの plastic flow が寄与していることを直接示したものであると考えられる。したがって、光学ガラスの押し込みかたさは、材料の densification より、むしろ plastic flow に影響されていると考えられる。

また 図-7 は Hill の理論における球殻の大きさ (a) として押し込み圧痕の大きさ (a') を、また塑性変形傾

域の拡がり (c) として圧痕に形成される盛り上り領域の大きさ (c') をとり、弾塑性体を前提とした Hill の球殻理論がガラスの押し込みかたさに適用できるかどうかを検討したものである。Hill の理論では、空球を一樣な圧力で押し並び、応力・歪分布が、空球の中心からの距離だけの関数になり、一樣に球状に分布しているとしており、ヌープ圧子のような形状の圧子で押し込んだ場合に、このような仮定で Hill の理論をそのまま用いるのは多少無理があるかも知れないが、図-7 に示されたように、Hill の式から計算で求めた c/a とヌープ圧痕に形成された盛り上り領域に基づく c'/a' がほぼ対応しているので、少なくとも定性的には、Hill の理論が光学ガラスの押し込みかたさに適用できると考えられる。同図において勾配が 1 になっていないが、これは圧子の形状によるものであろう。また図-8 に示されるように、ヌープかたさとヤング率に比例関係のあることも Hill の理論から理解される。したがって、光学ガラスの押し込みかたさは、弾塑性体における塑性流動によるものであり、降伏応力とヤング率の関数として表わされる。

次にヌープかたさ・ヤング率並びに c/a とガラス組成の関係を検討した結果、まずヌープかたさとヤング率は、図-9、図-10 に示されたように、修飾イオンの種類に影響されているけれども、共に網目形成イオンの含有量に支配されており、網目形成イオンの含有量の増加と共に高くなっている。しかも、図-9 と 図-10 は、全く同一ではないが、よく類似している。この結果は、Hill の (7) 式から予想される結果と対応するもので、図-9 と 図-10 の差は、ガラスのヌープかたさがヤング率の他に c/a にも影響されることを示すものであると考えられる。この c/a は、図-11 に示したように、網目形成イオンの含有量の増加とともに減少しているが、このことは、流動性の減少、降伏応力の増大を意味し、したがって、網目形成イオンの含有量が増加すると plastic flow しにくくなることを示していると考えられる。つまり、ガラス構造中に修飾イオンが導入され、網目構造が切断されるほどガラスが流動しやすくなるということは、当然考えられることである。したがって、これら、ヌープかたさ、ヤング率および c/a と網目形成イオンの含有量の関係 (図-9~11) は、押し込みかたさを Hill の球殻理論に基づいて解釈することの妥当性、つまり、材料の microplasticity に基づいて解釈することの妥当性を示したものであると考えられる。

5. 総括および結論

光学ガラスの押し込み圧痕がガラスの densification によるものなのか、または、plastic flow によるものなのかを明らかにするために、ヌープ圧痕の熱処理による回復量を測定し、干渉顕微鏡によってヌープ圧痕・圧痕

周辺部の形状を観察した。また更に、光学ガラスの押し込みかたさに、弾塑性体に対する Hill の球殻理論を適用することの可否を検討した。その結果次のことがわかった。

(1) 光学ガラスでは、一般に熱処理による圧痕の回復が非常に少なく、特に SF ガラスでは、大きな圧痕が形成されるにもかかわらず、熱処理による圧痕の回復はほとんどない。

(2) 一般に、光学ガラスの圧痕周辺部には、明瞭な「盛り上り」が認められる。

(3) この圧子の押し込みによって圧痕周辺部に形成された盛り上り領域の広さ (c') と圧痕の大きさ (a') の比は、弾塑性体に対する Hill の理論から導びかれた c/a とほぼ対応し、Hill の理論が光学ガラスの押し込みかたさに適用できることを示した。

(4) ヌープかたさは、ガラスを構成する成分中の網目形成イオンの含有量に支配され、網目形成イオンの含有量の増加と共に高くなる。また修飾イオンの種類に副次的に影響される。Hill の理論から、押し込みかたさは、ヤング率と c/a の関数としても表現できるが、ヤング率と網目形成イオンの含有量の関係は、ヌープかたさと網目形成イオンの含有量の関係によく対応しており、また c/a は、網目形成イオンの含有量の増加と共に減少し、降伏応力の増大、流動性の減少と関係していることを示した。

したがって、光学ガラスの押し込み圧痕は、ガラスの densification よりむしろ plastic flow によって形成され、また押し込みかたさには、弾塑性体に対する Hill の球殻の理論が適用でき、その理論に従って、押し込みかたさはヤング率と降伏応力によって決定されると考えられる。

文 献

- 1) L. Ainsworth, *J. Soc. Glass Technol.* **38**, 479T-547T (1954).
- 2) W.B. Hillig, "Advances in Glass Technology" Plenum Publishing Corp., New York (1963) Part 2 p.p. 51-52.
- 3) J.E. Neely and J.O. Mackenzie, *J. Materials Science* **3** [6] 603-09 (1968).
- 4) F.M. Ernsberger, *J. Am. Ceram. Soc.* **51** [10] 545-47 (1968).
- 5) E.W. Taylor, *J. Soc. Glass Technol.* **34** 69T-76T (1950).
- 6) D.M. Marsh, *Proc. Roy. Soc. A* **279**, 420-35 (1961).
- 7) *ibid.*, **A 282**, 33-43 (1964).
- 8) R. Hill, "The Mathematical Theory of Plasticity" Oxford University Press (1950) p.p. 97-127.
- 9) T. Inamura, *Japan J. Appl. Phys.* **6** [7] 802-07 (1967).
- 10) 泉谷徹郎, "光学技術ハンドブック" 朝倉書店 p.p. 568-74.

(3/8/1972 受付)