

ガラス工業に利用される光弾性技術

千葉工業大学 岸 井 貫
折原製作所 折 原 芳 男
株式会社ルケオ 吉 村 泰 信

はじめに

ガラス工業では、ガラス製品に内在する応力とその分布を知りたい、という強い要求がある。応力が残るような条件で製造すると、冷え固まった後で、製品が自発的に破壊する怖れがある。また逆に管理された方法で、製品の表面に強い応力を作り込み、製品を強化している。

このように、製品に作り込まれた内部応力を測定・管理することが必要であり、それには光弾性の原理を利用した測定技術が使われている。

また近年は超精密・超大型・極低熱膨張の材料として、石英ガラス・シリカガラス・ガラスセラミックスなどが大型天体望遠鏡・宇宙科学用耐熱材料・光通信ファイバー用材料に使われ、その熱膨張特性を知ることが必要になった。これには光干渉式膨張計が使われている。

このように、ガラス工業では特有ともいえる光学技術が開発され、使われている。本稿では、その中で光弾性技術について、暫く本誌の紙面を借りて述べて行きたい。

ガラス工業と光弾性技術

「光弾性技術」、「光弾性測定法」は、物体が力（外力・外部応力・内部応力またはこれらの中の複数を同時に）を受けて、その光学的性質を変える事を利用する力の観察・測定法である。このため実際には適用範囲は透明体に限られていて、透明物質（プラスチック）で構造物の模型を造り、力を与えて模型内の応力の強さと分布を調べる、という模型実験が力学・機械工学で実行されている（図1）。現在ではその技術も応力分布の解析法も高度に発達し、科学的にも工業的にも有用な結果を与えているのは、周知のことである。

集中加重を受ける両端支持ばりの光弾性像

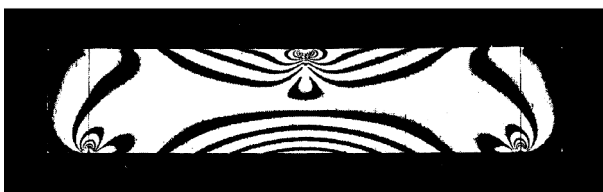


図1 透明プラスチック製模型に外力を加えて光弾性模様を現した例

しかしその適用範囲は外力への材料の応答に限られ、特殊な場合（「散乱光光弾性」・「応力凍結法」など）を除くと、解析される応力も二次元的で、光の通過方向には一定、という形で分布する場合だけである。実用材料・実用製品の多くのものは、仮に透明体であったとしても、その内部応力の三次元的分布を、破壊・加工することなしに、通常的光弾性技術で定量的に測定することはできない。

「光弾性技術」は応力によって固体が複屈折性を帯びることを利用しているから、透明であり複屈折性を持たない材料に限って適用できる。それはガラスと立方晶系に属する透明な単結晶とに限られる。

ガラス製品への光弾性測定適用の必要性

ガラス製品は普通は三次元的な内部応力分布を持つし、その内部応力が強い場合には自発的な破損をする恐れさえある。従って内部応力を管理する必要がある、その前提として応力の強さと分布を測る方法を開発する必要がある。

他方でガラス工業では、管理された状態でガラス製品に強い応力、特に表面に強い圧縮力を導入して「強化ガラス」製品を作っており、これは広く工業的に製造・使用されている。この場合も製品の品質管理のために、特に表面応力を測定する必要がある。

ガラス製品の応力を測定する場合に、対象を切断・加工したり、外力を加えたりすることは、内部応力を変えるので測定を無意味なものにするから、非破壊で測定する工夫が絶対条件である。

またもう一つのガラスの特徴的な点は、異種ガラスの融着や、ガラス／金属、ガラス／セラミックスの組み合わせ・融着によって多くの工業製品が作られており、それは長期に亘って機械的に安定で、気密性を保持することが絶対に必要だ、ということである。それには構成材料中の応力が充分小さいこと、特にガラス部分の応力が小さくて破損の恐れがないことを要する。

このような製品中の応力とその分布を測定・管理する目的に、ガラス工業では特有の光弾性的方法が開発され、使われている。

ガラスは多くの場合透明であるため、光弾性法で応力

分布を調べることが原理的には可能である。しかしその応力は多くは製造・加工工程が原因で発生・分布したもので、外力が加えられているためではない。また通常の光弾性実験の場合と違い、応力分布が平面的でなく、例えば表面が張力、内部が圧縮力で、光を透過させたときに観察される力は、張力と圧縮力との代数和で、張力・圧縮力の絶対値より遥かに小さい見かけの値しか観察されないことも普通である。そのために測定・解析法に工夫が必要であった。

また測定のために切断・加工することは応力が切断面・加工面で面に垂直な成分がゼロになるように、全体の応力が再分布して大幅に解放・緩和されてしまうので、測定の目的自体が無意味になってしまう。

このような事情から、測定・解析は非破壊で実行されなければならない。

「応力」と言う言葉は、外から加えられた「ひずみ(歪み)に応じて発生する力」、というのが原義であるが、ガラス製品の場合には、外から加えられたひずみは無くても力が発生している。本稿では「応力」とは単に「単位面積当たりに働く力の強さ」というだけの意味で使う。

1. 強化ガラスの表面応力測定

1.1 ガラスの強度と「遅延破壊」

ガラスは「脆性材料」であり、普通、壊れやすく機械的に弱いものと思われている。弱いことの原因の一つは、ガラス製品の表面に「傷」が本源的に、例えば他物との接触や空気中の水蒸気による化学的浸食によってできていることである。傷がある箇所に引っ張りの力が働くと傷の先端が応力集中領域になり(図2)、それは塑性流動で緩和されることがない。

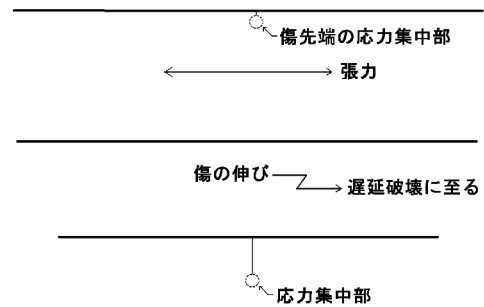


図2 ガラス表面の傷と傷の先端での応力集中、及び傷の延伸によるガラスの遅延破壊の説明図

傷の先端で水蒸気により「応力誘起浸食」が起きて傷が伸び、更に応力集中が進み、浸食が進み、……という悪循環の繰り返しで傷が伸び、破壊に到る。力の大きさによっては、破壊までの時間が数時間・数日・数ヶ月かかることがあり、いわゆる「遅延破壊」といわれるものになる。製品の在庫中の破壊はしばしば経験することである。

1.2 ガラスの強化

ガラス製品の表面に圧縮応力を作り込んでおくと、傷先端の応力集中が無くなり、応力誘起浸食も進まないのので、表面の圧縮応力を打ち消すまでの外力に製品が耐えるようになり、見かけ上ガラス製品が「強化」されたことになる。

「強化」は同時に、製品の表面に張力の部分が露出しないように行われる必要がある。

強化のための工業的な方法は「熱強化」と「化学強化」とである。本編では熱強化ガラスについて述べる。化学強化については第3章で記す。

1.3 熱強化(図3)

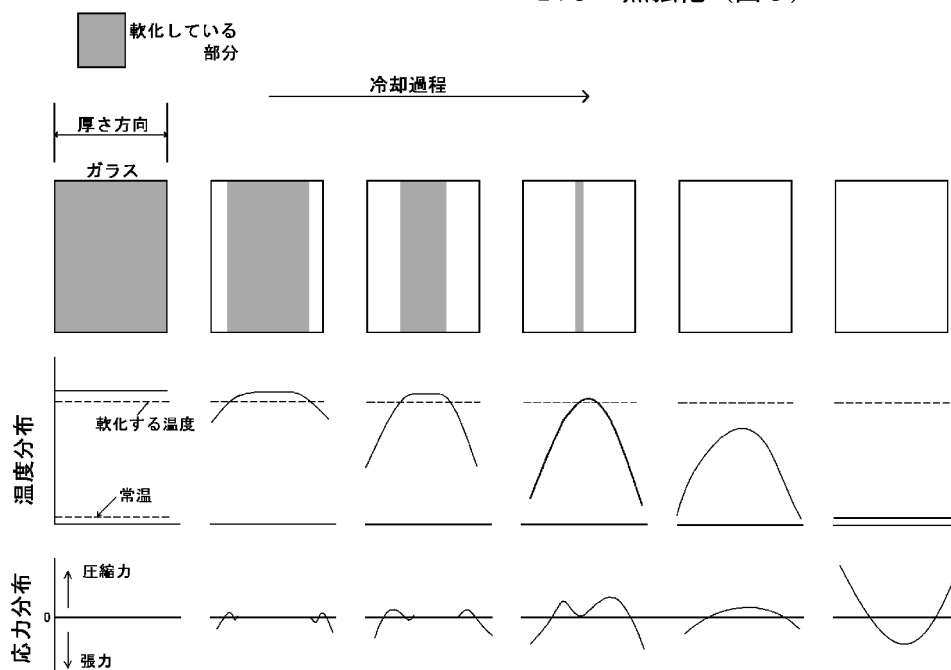


図3 ガラスの熱強化過程の説明図

ガラス板を僅かに軟化するような温度にまで加熱する。そこへ冷風を強く吹き付けると、表面が低温になり固化する。内部は表面より遅れて冷え、遅れて固まる。最後に全体の温度が均一になると、内部は先に固化した外表部で熱収縮を妨げられ、反対に外表部は内部から縮めようとする力を受ける。その結果として外表面は内部からの力に抵抗するように圧縮応力が発生し、内部にはこれと釣り合うように引っ張りの応力が発生する。

熱強化の目的はいろいろあって、強い抗張強度を得るために強い表面応力が求められることもあるし、適度の、比較的弱い応力が求められることもある。板ガラスならば、強い強度が必要な場合のほかに、日照に原因する熱応力に耐えることが目的であったり、機械的に破損したときの破片の大きさや割れ目のこまかさを管理したい場合もある。これは人体が衝突したときに細片に砕けると、人体が建物外へ飛び出し転落・死亡する怖れがあるからである。

何れにしても、強化ガラスの品質管理のために、表面に作り込まれた圧縮応力を非破壊で定量的に測定しなければならない。

JIS R 3220-1990では弱く強化したガラスを「倍強度ガラス（強化しないガラスの二倍くらいの強さのガラスの意味）」と名付けて、「フロート法板ガラス（フロートガラス）」の場合に、次に説明する表面応力測定法を規定している。

2. 熱強化フロートガラス

2.1 「光導波路効果」

現在多くの板ガラスは「フロート法」で作られていて、「フロートガラス」と略称されている。

このガラスの製造工程では、還元性雰囲気中でガラス融液が溶融錫の浴上に置かれて平坦に成形される過程がある（図4a）。

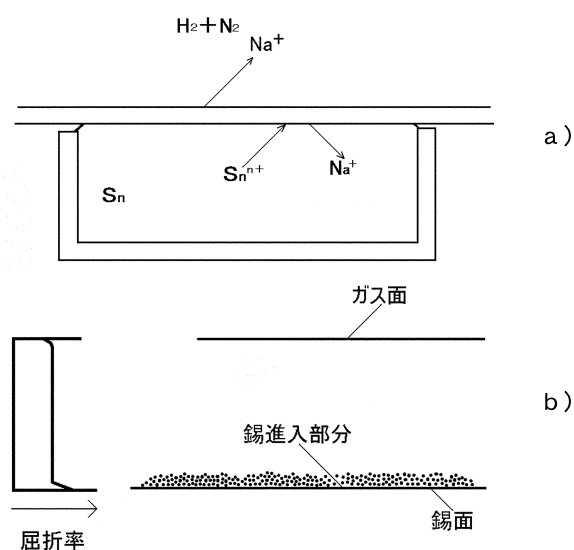


図4 フロート法板ガラスの製造工程の説明図

この時にガラスの下面は錫浴に接し（錫面）で、ガラス中のナトリウムイオンが溶け出し、それと交換に錫イオンがガラス中に拡散・侵入する。錫が入り込んだ層は高屈折率層になる。また錫の濃度分布に対応して屈折率は表面で高く、内部でガラス本来の屈折率に近づくという深さ方向の屈折率勾配を有する（図4b）。

反対側の、製造中にガス雰囲気中に接していた面（ガス面）では、ナトリウムイオンが雰囲気中へ蒸発して屈折率が低くなっている（図4b）。

錫進入面の高屈折率層は、光通信ファイバーと同じように、光を中に閉じこめて巨視的な距離に亘って伝播させる性質がある。またその層の厚さ（普通は数 μm ないし十数 μm ）が光の波長に較べて余り大きくないので、光は離散的な「モード」の形で分布し、進行する（図5a）。

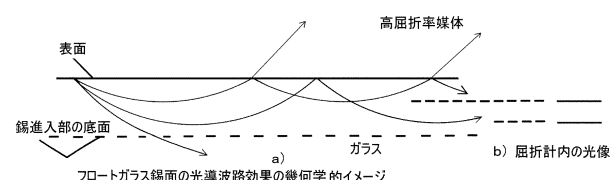


図5 フロート法板ガラスの錫進入面での厚さ方向の屈折率分布

a) フロートガラス錫面の光導波路効果の幾何学的イメージ

このような性質は導波管内のマイクロ波の挙動で知られているものと同じ機構で現れるのであるから、光通信ファイバーの場合に「Optical waveguide effect（仮に「光導波路効果」と訳す。）と呼ばれる。

この層へは、光集積回路の場合と同じように、外部から光を注入したり外部へ光を取り出したりすることができる（図5a）。

2.2 応力誘起複屈折

ガラスに応力があると、その部分は「複屈折性」になる。すなわち屈折率が二つ（電場が力に平行に振動している光の成分に対するものと、電場が力に垂直に振動している光の成分に対するもの（図5b）がある状態になる。

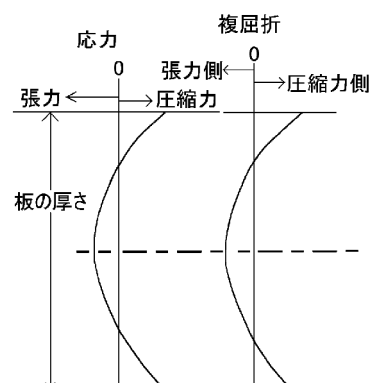


図5b) 熱強化フロートガラスの厚さ方向の複屈折率の分布の説明図

ガラスの屈折率は
(真空中の光の速度) / (ガラス中の光の速度)
であるから、「複屈折」は光の速度も二つあることを意味する。

2.3 光弾性常数

応力によってガラスに生ずる二つの屈折率の間の差「複屈折」の大きさはガラスの「光弾性常数」で表わされる(表1)。

ガラスの光弾性常数の概略値		
単位 (nm/cm) / (kg/cm ²)		
ソーダ石灰ガラス		2.4-2.6
板ガラス		2.6
鉛 (pb0 20%) ガラス		2.6
ホウケイ酸ガラス		3.6-3.9
石英ガラス		3.5
光学ガラス	ホウケイクラウン	2.7
	軽フリント	3.2
	重フリント	2.7
	超重フリント	1.4
	軽バリウムフリント	2.8
	重バリウムフリント	2.2

表1 ガラスの光弾性常数の概略値

表1では (nm/cm)/(kg/cm²) または 同じことであるが、10⁻⁷/(kg/cm²) の単位で光弾性定数を示している。

この単位は、1kg/cm²の応力が働いているガラスの中に光が1cm進むごとに、二つの成分光の間に、進行距離にして1nmの差(光路差)が発生することを示しているし、また他方で1kg/cm²の力が働くと、二つの光に対するガラスの屈折率の間に10⁻⁷の差が生ずることを表わす(図6)。

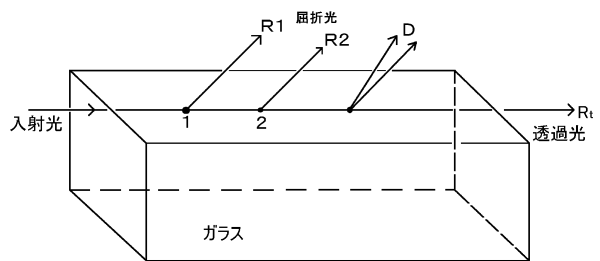


図6 複屈折のあるガラス表面を伝わる光の光路差変化と屈折挙動

- R 1 : 点1での表面伝播光の光路差および点1で屈折された光の光路差
- R 2 : 点2での表面伝播光の光路差および点2で屈折された光の光路差
- D : 二つの光成分が屈折された時の屈折角の差
- R t : 表面を伝わって出てきた光の光路差

複屈折Δnが測定され、光弾性常数Cが知られていれば、次のように応力Fを計算できる。

$F = \Delta n / C$ (1)

また光路差Rからは

$F = R / (C \times \text{光が通過した距離} L)$ (2)

RがLの関数として測られていれば、式(2)の微分形として

$F = dR / (C \times dL)$ (3)

によって応力が求められる。

2.4 弾性固体の表面に働く力に関する一般則

弾性固体内の各点に働いている力は、数学で「テンソル」と呼ばれるものと同じ性質を持ち、三つの「主応力軸」方向にそれぞれ働く三つの成分応力(主応力)の「テンソル和」で表現できる(図7a)。

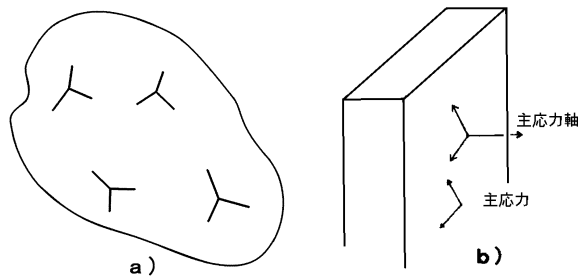


図7 弾性固体内の応力の分布の一般則と表面の応力分布の説明図

- a) 各点で互いに直交する三つの主応力軸がある。
- b) 表面では表面に垂直に働く主応力の強さはゼロである。それに伴って、主応力軸の一つは表面に垂直であり、他の二つは表面内にある。

大気圧を無視してよい場合には、ガラス製品の他物に触れていない表面は「自由表面」であり、表面に垂直な方向の力はゼロである。また、そのような表面での応力分布の場合には、表面にある互いに直交する三つの主応力軸のうち、一つは表面に垂直であり、此の方向の主応力がゼロである(図7b)。

他の二つの主応力軸は表は表面内にあり、その主応力は有限の値(ゼロのこともある)を持つ。このように分布する応力を「表面応力」と呼ぶ。

広い板ガラスを均一に近く強化した場合には、縁に近い部分を除くと、表面に平行な方向の応力は、等方的であると近似できる。この場合には面内にある二つの主応力軸の方向が不定で、主応力の値は方向によらずに一定(ゼロを含む)である。

2.5 複屈折性媒体中の光の伝播

表面応力があるガラスの表面には複屈折性があり、表面を伝わり進む光は、二つの成分光(電場が表面に平行

に振動するものと、表面に垂直に振動するものと)に分かれてそれぞれ互いに違う速度で進む。此の二つの光は異なる速度で進むから、進むにつれて一方が他方より遅れる(「光路差」 R が発生する。図6の $R1$ 、 $R2$)。また屈折させてガラス外に取り出すとき、二つの光の間に屈折角に差がある(図6の D)。この複屈折性は、表面に平行に、かつ光の進路に垂直に働く応力成分に対応する値を持つ。表面に垂直に(光の進路にも直角に)働く力はゼロなので、その効果は考慮する必要がない。

2.6 複屈折の大きさ

強化ガラス表面に発生する複屈折を結晶の複屈折と較べる図8のようである。

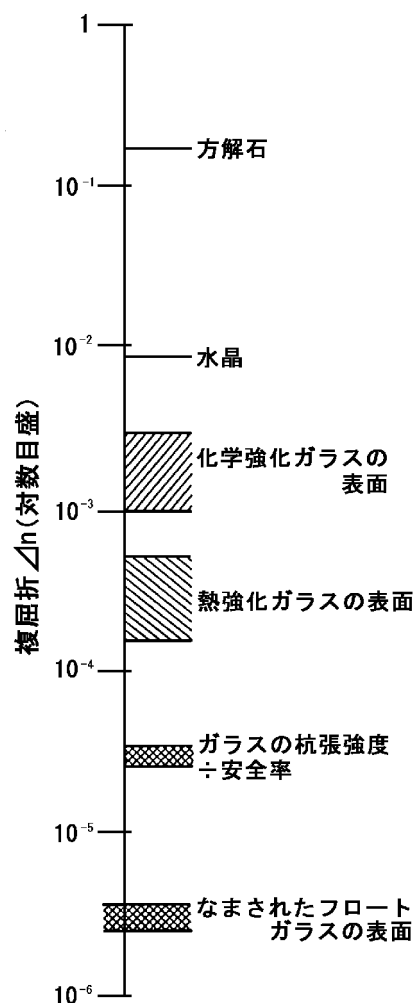


図8 強化ガラス表面の複屈折と結晶の複屈折との比較

市販の屈折計の精度は 10^{-4} くらいと考えられる。ガラスの表面応力を測る目的で屈折率差を測る場合には、屈折率の絶対値は必要ないから、測定器の感度を 10^{-5} 、或いはそれよりも高感度に設計できる。

熱強化ガラス・化学強化ガラス(後述)の表面応力は測定可能大きさであると判断できる。(以下次号)

筆者紹介

岸 井 貫

千葉工業大学 教授

東京都杉並区高井戸東3-14-11

TEL 03-3329-3537

FAX 03-3329-3890

E-mail: toruki@ma2.justnet.ne.jp

折 原 芳 男

有限会社折原製作所 専務

東京都豊島区東池袋5-47-15

TEL 03-3985-9531

FAX 03-3985-9532

吉 村 泰 信

株式会社ルケオ 取締役社長

本社 東京都板橋区大山金井町30-9

TEL 03-3956-4111

FAX 03-3956-2335

URL <http://www.luceo.co.jp/>