

コンピュータ化した化学強化 ガラス用表面応力計

東芝硝子株式会社 岸 井 貫

1. 化学強化ガラス

化学強化ガラスは10年程前から少しずつ用途が広がり、ガラス製品の信頼性向上と軽量化に役立ってきた。現在では

腕時計用カバーガラス
眼鏡レンズ
光可変色眼鏡用レンズ
溶接用保護眼鏡レンズ
フォトマスク用ガラス
高光出力光学系用ガラス
高出力レーザガラス
複写機の載物台ガラス
熱器具用覗き窓
カーブミラー
飛行場用信号灯具ガラス
ガラス瓶の一部

などが化学強化の適用例として挙げられる。

化学強化ガラスは成形品を400℃くらいのKNO₃の熔融液中に浸して作られる。この時に

ガラス中の $\text{Na}^+ \longleftrightarrow \text{液中の K}^+$

というイオン交換が起きる。交換は1対1で起き、ガラス表面層内の Na^+ の抜け穴に K^+ が入り込む。 Na^+ に比べて K^+ のイオン半径が大きいので、表面層は膨張しようとするが、内部の未変質部が表面層の膨張を妨げるために表面層は圧縮応力層になる。この層が強化層の働きをしてガラス製品の抗張強度、曲げ強度は1桁近く増し、傷もつきにくくなる。一方また製品を肉薄軽量化することや使用寿命を延ばすこともできる。

イオン交換処理条件のパラメータとしては温

度と時間がある。温度が低いと表面応力は強いが応力層は薄い。温度が高くなると表面応力は低目だが応力層は厚くなる。しかし温度が高過ぎるとガラスが流動して応力が全く緩和され、イオン交換は十分進んだにかかわらず強化の効果は全然現われない。

ガラス製品について言えば、強化度のパラメータは表面応力と応力層厚さである。表面応力は製品の強さと、応力層厚さは加傷や風化による強度低下への抵抗性と、それぞれ対応する。

2. 表面応力と応力層厚さ

表面応力の強さは、低アルカリ硬質ガラスで10~20 kg/mm²、板ガラスで50 kg/mm²、化学強化用特殊組成ガラスで100 kg/mm² くらいになりうる。

応力層厚さは短時間処理で数 μm 、実用的な処理では20~40 μm を目標にすることが多い。これより厚くしようとすると表面応力が小さくなりやすい。ヨーロッパでの眼鏡レンズの強化では表面応力を犠牲にして応力層厚さを大きくしようとすることがある。また最近では150 μm 以上の厚さが容易に得られるガラスが市販されている。

3. 表面応力計

処理条件の管理、製品品質の管理、最適処理条件の決定などには表面応力と応力層厚さとを同時に測ることが有効である。

これらは昔はガラスの薄片を作ってガラス断面を光弾性法で観察して測定された。

約10年前に非破壊的測定法が開発され、東

芝硝子(株)が唯一の供給者として表面応力計を作ってきた。

その後、被測定物や測定目的の多様化と他部門での技術の取入れによって測定器自身も発展し多様化した。特に最近ビデオ、コンピュータ技術を導入したものを発売した。

本稿では測定の原理と応力計の発展過程とを

主として述べる。

4. 応力測定の原理

4.1 応力層の組成と光学的性質

化学強化ガラスの表面層はイオン交換をしたため組成が内部の非変質層とは異なるし、深さによっても違う。K⁺ イオンは表面に多く表面層底部で零になる(図1 a)。

この組成変化に対応して、圧縮応力は表面で最大、表面層底部で近似的に零である(図1 b)。光に対する屈折率も表面で最大、深くなると小さくなり、表面層底部で一定であるが、同時に表面層内の強い圧縮応力で引き起される光弾性効果のためにガラスは複屈折性となっており、振動方向が互に直交する二つの直線偏光の間で屈折率分布が違う(図1 c)。ある深さでの屈折率差 Δn はその深さでの応力 F と

$$\Delta n = C \times F \quad (1)$$

C : ガラスの光弾性常数

という関係がある。

このように表面層は内部より屈折率が高いし、層内でも屈折率勾配がある。高屈折率部がその内部へ注入された光を発散させずに遠くへ伝える作用を持つということは、光通信ファイバー、光集積回路技術で良く知られている。化学強化ガラスの表面層も同じ働きを持っている。

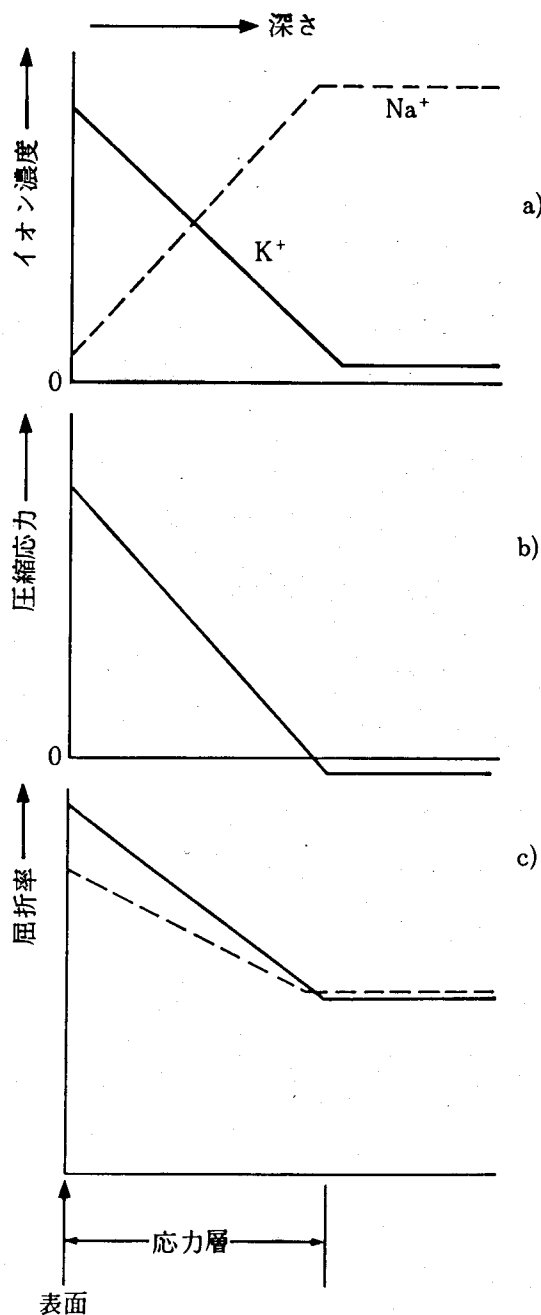


図1 化学強化ガラスの強化層(圧縮応力層)内の a) イオン濃度, b) 圧縮応力, c) 屈折率分布

表1 表面応力、応力層厚さ計算の過程

二つの偏光による 光像 ($N, n_s - n_b$) の観察	
↓	
二つの偏光のそれ ぞれに対する屈折 率分布と存在するモードの数	
↓	屈折率分布のある層
	式(2) (表面圧縮応力層)
表面での二つの 偏光の間での屈 折率差	の厚さ
↓	
式(1)	
↓	
表面の圧縮応力	

4.2 光ウェーブガイド効果

細い線状、あるいは薄い層状の高屈折率部に閉じ込められて伝わる光は、波動光学的な境界条件の影響を強く受けるために、広い空間内を伝わる光とは違う性質を見せる。これは導波管内を伝わるマイクロ波の性質と全く同じ原因で起きた似た現象であるため光導波路効果（光ウェーブガイド効果）と呼ばれる。

層状導波路を伝わる光は光ウェーブガイド効果のために

1. 1個または有限整数個の特定の電磁波動特性を持つ波だけで存在し得、また遠くへ伝わり得る。

2. 伝播速度は波の間で違うのが普通である、

という性質がある。導波路内を伝わり得る波をマイクロ波技術から言葉を借りてモードと呼ぶ。

ここで（真空中の光速／モードの速度）の比をそのモードの実効屈折率と呼ぶ。これらについて、

3. 存在し得るモードの数とモードの実効屈

折率とは、表面層内の屈折率分布と表面層厚さとによって決まる。

という関係がある。

4.3 光ウェーブガイド効果の観察と解析

化学強化ガラスの表面に入射プリズムを使って光を注入すると、表面層を伝わる光波（モード）が励起される。有限距離を伝わらせてから射出プリズムを経て外へ取り出すと、モード数に等しい数の線から成る光像が得られる（図2, 3）。線の配列はモードの実効屈折率の分布と対応する。

この光像は非破壊的に得られ、これから表面層内の屈折率分布を簡単に推算することができる（図4）。すなわち

光条の数 $\longleftrightarrow$ モード数

光条の位置 $\longleftrightarrow$ モードの実効屈折率

と対応する。またこれらから外挿により

表面の屈折率 n_s

表面層底部の屈折率 n_B

も得られる。

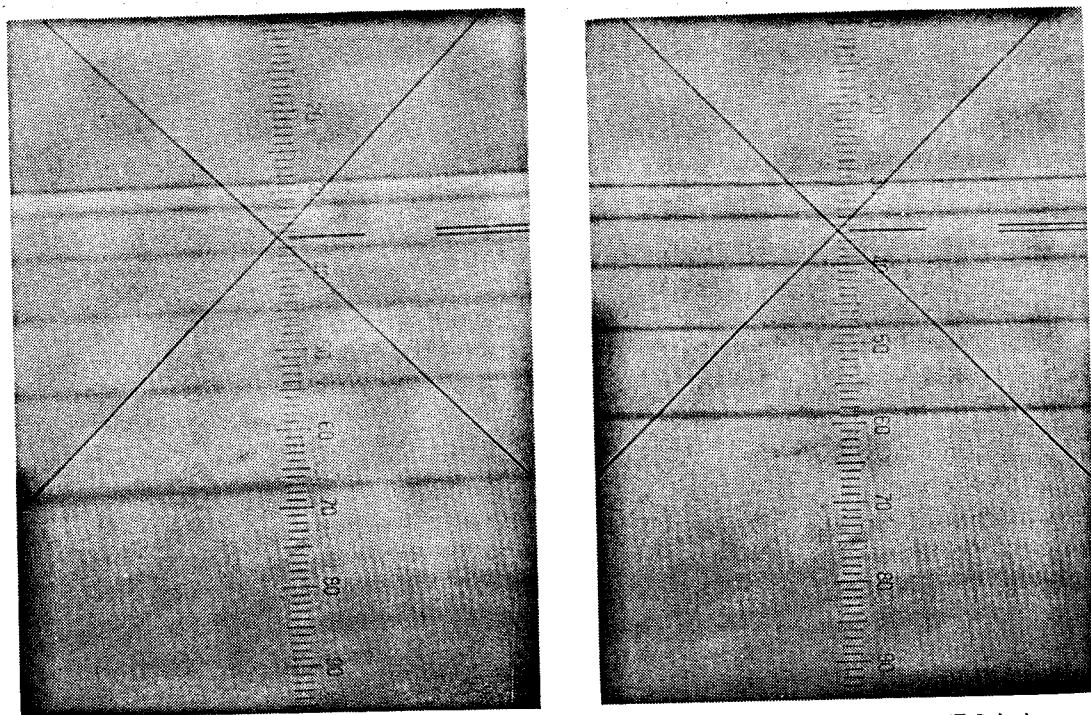


図2 5～6本の暗条を持つ光像の例。二つの図は検光偏光板を90°回転して得られた

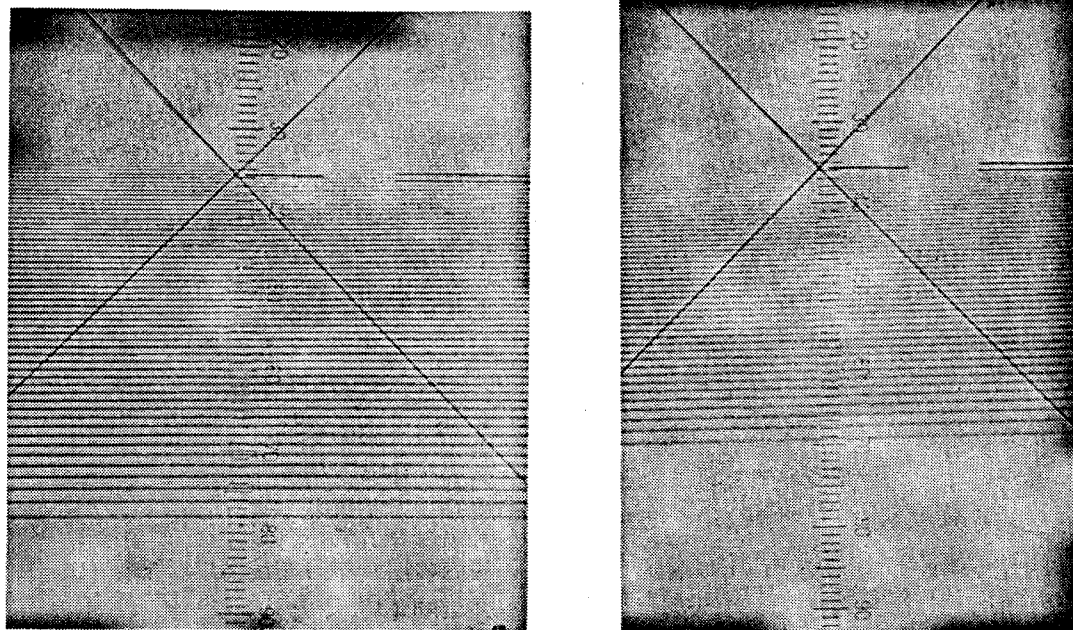


図 3 50 本以上の暗条を持つ光像の例. 二つの図は検光偏光板を 90° 回転して得られた

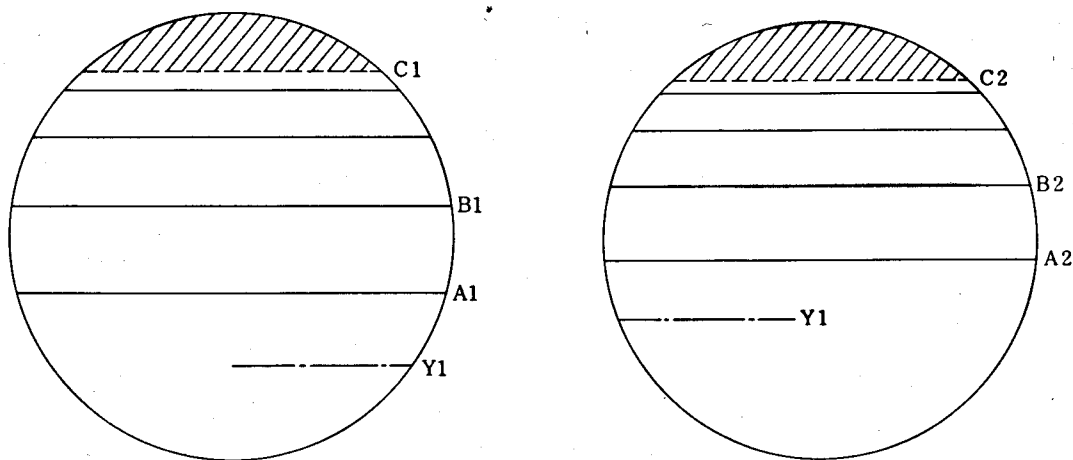


図 4 光像の読み取り方

二つの像は検光偏光板の 90° の回転で得られたものである。

C1, C2: 光像上の明暗の境界で表面層底部 (非変質層と同じ) の屈折率 n_B に対応する。

A1, A2: 表面層のもっとも浅い所を伝わるモードにより形成された条で, その位置は表面層から約 $3\mu\text{m}$ 内部のガラスの屈折率に対応する。

B1, B2: A1, A2 のそれぞれについて浅い所を伝わるモードにより形成された条

Y1, Y2: A, Bからの外挿で得られる仮想的条の位置で, 表面の屈折率 n_s に対応する。

4.4 計 算 法

表面層内に強い圧縮応力があるために, 光弾性効果により n_s, n_B は互に直交する方向に振動する二つの直線偏光の間で違う。従って一つの化学強化ガラスから偏光板(検光子)を 90° 回転することにより二つの光像が得られる。そうして表 1 のような過程を経て表面応力と応力層厚

さが得られる。表面層厚さはモード数 N から

$$\text{表面層厚さ } (\mu\text{m}) = 0.26(\mu\text{m}) \times \frac{N}{\sqrt{n_s - n_B}} \quad (2)$$

により求められる。 $n_s - n_B$ は通常 $0.005 \sim 0.015$ くらいである。従ってモード数 1 個あたり応力層厚さの $3 \sim 4\mu\text{m}$ に対応する。

4.5 光ウェーブガイド効果を示さないガラス

上記の方法は、表面層の屈折率が高くて光ウェーブガイド効果を示す化学強化ガラスだけに適用できる。

表面が低屈折率である化学強化ガラスは次の2種類が今のところ判明している。

1. 化学強化されたホトクロミック（光可変色）ガラスレンズ：

これは強化処理が

ガラス中の $\text{Ag}^+, \text{Na}^+ \longleftrightarrow$ 液中の K^+ のイオン交換を起すからである、

2. ガラス中の $\text{Li}^+ \longleftrightarrow$ 液中の Na^+ のイオン交換の強化ガラス：

現在工業的製品としては実例がない。

これらには光ウェーブガイド効果を利用する測定法を利用できない。

5. 表面応力計のシリーズ

化学強化ガラス用表面応力計は、光像を結像させるための光学系、二つの偏光で像を眺めるための検光子、光像を観察、解析するための系を組み合わせたものである。

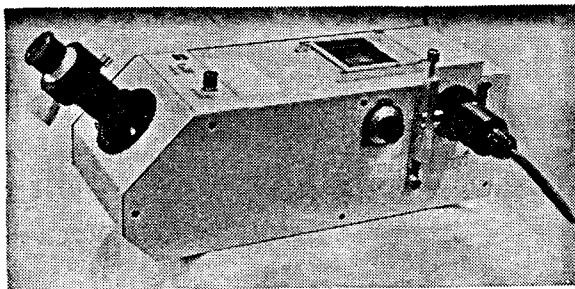


図 5 小形、平面ガラス用表面応力計 FSM-10

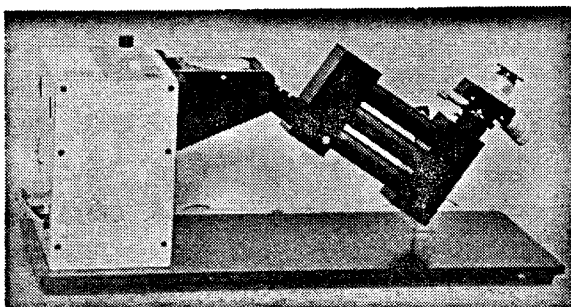


図 6 小形、曲面ガラス用表面応力計 FSM-40

表面応力と応力層厚さの計算は比較的簡単であるため、肉眼で光像を観察し、電卓、プログラマブル電卓などで計算する方法でも実用的である。

図5は、50×50 mm 以下の小形平面ガラス専用の応力計であり、時計用カバーガラスなどを対象にする。

図6は小形で平面、凸面の双方の面を測定できる応力計で、眼鏡レンズ、ガラス瓶（小片を切出して測る）などに利用されている。

図7はやや大形の平面ガラス用で、フォトマスクガラス、複写機用ガラスに使われるが、特別仕様では曲率半径 100 cm 以上の凸面ガラス用にもなる。

図8は建築用など極端に大きいサンプルのため

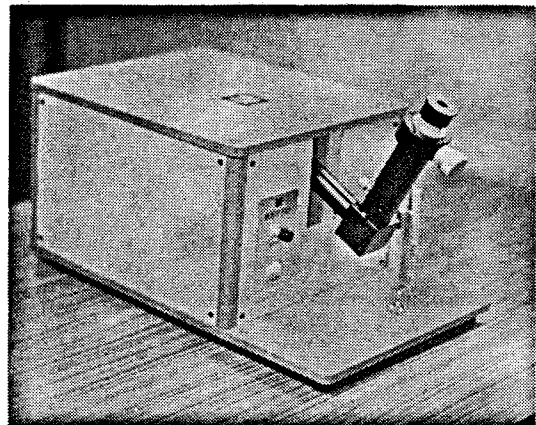


図 7 中形ガラス用表面応力計 FSM-60

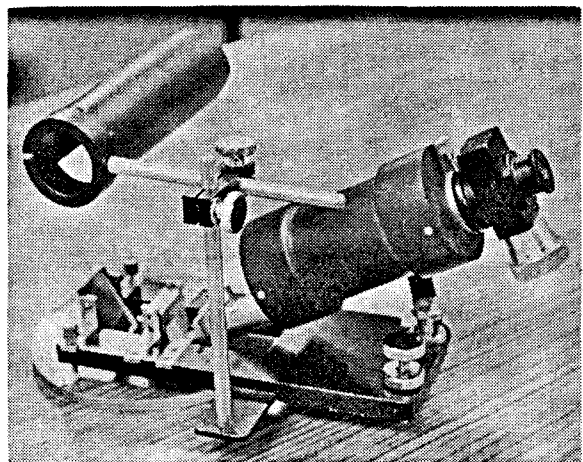


図 8 大形ガラス用表面応力計 FSM-30

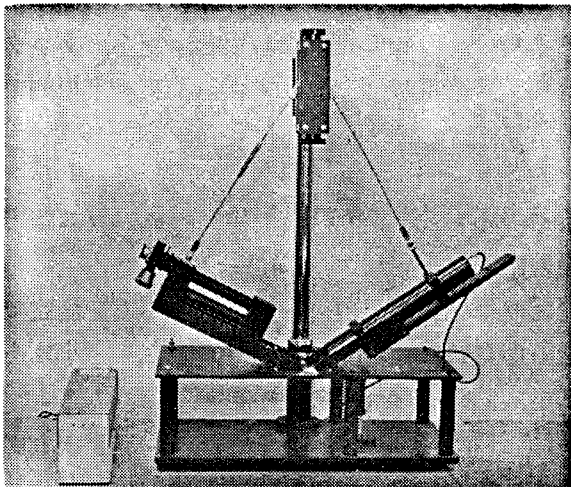


図 9 特殊用途の表面応力計 FSM-50

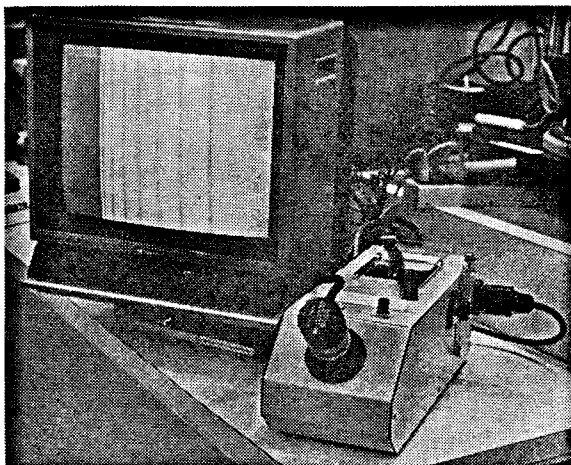


図 10 ビデオ表示化した FSM-10 応力計

めの応力計で、サンプル上に応力計を載せるように設計されている。曲率半径 100 cm 以上の凹面、30 cm 以上の凸面と平面とを測ることができる。

図 9 は、ガラス質ではあるが不均質で整った明るい光像を得にくいサンプル（例：陶歯）に対し、ガスレーザを光源にして測定を可能にするように作られた。

6. ビデオ・コンピュータ化した表面応力計

光像を肉眼で接眼鏡を覗き込んで観察するかわりに、ビデオ装置によりテレビ受像機上に表示して解析する方式は要望が多く、すでに多数使われている（図 10）。

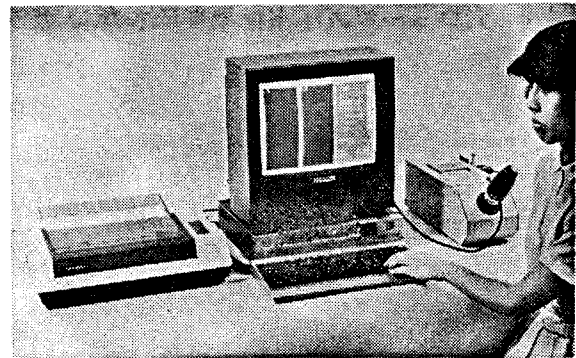


図 11 コンピュータ化した FSM-10 応力計 FSM-10-V

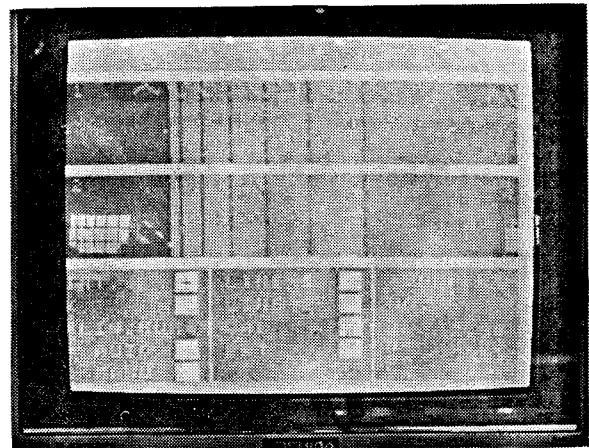


図 12 光像とコンピュータ画面との重ね合わせ

さらにその延長として、受像機上の像から直接に計算に必要な数値を読み込み計算するという考えは早くからあったけれども、実現は、それに適したハードウェアの市販を待つため最近にまで持ち越された。

ビデオ撮像機やテレビジョン放送からの画像をコンピュータの画面と共に分割表示できるホーム・コンピュータを使用する（図 11）。

コンピュータ画面の一部に明けられた窓に光像が表示される（図 12）。コンピュータ画面に作られたポインタをカーソル・キーで動かして光像上の必要な位置（図 12 では左方の明暗の境界、最右方の暗線とそれに隣る暗線、の三つ）にそれぞれ合わせてキー・インすると、これらの位置がドット数を単位として読み込まれる（図 13）。

これに加えて画面の指示により暗線の数（モード数に等しい。）とガラスの光弾性常数を

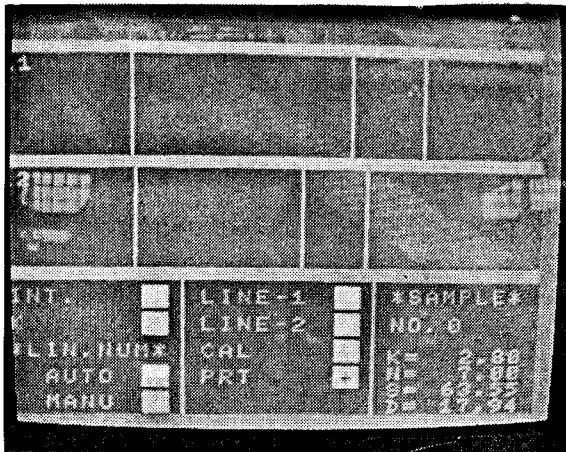


図 13 光像の A1, B1, C1, A2, B2, C2 の位置を入力した後のコンピュータ画面

入れると、表面応力と応力層厚さが瞬時に画面に表示され（図 13 右下と図 14）、必要ならばプリンタに打出されて記録、保存できる。

このようにして

肉眼視による数値的読み取りは（暗条数を除けば）不要、
測定に熟練不要、
計算の手間と時間は実質的に零、
測定結果の保存と統計的处理に好都合、
製品品質と強化工程の管理に役立つ。
という利点を得られた。

7. 結 び

表面応力計の発売から 10 年近く経過した。その間に多くの方々に利用して頂き役立ったのは嬉しいことである。逆に利用される方々からのご教示、ご要望を受けて応力計のシリーズを開発し続けることができた。

コンピュータ化した応力計も幸いにご好評を頂いている。既納の応力計をコンピュータ化す

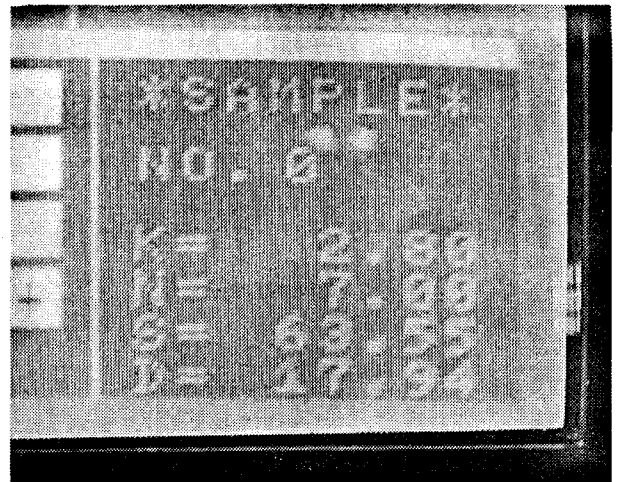


図 14 計算結果の表示部

K : ガラスの光弾性常数 $(\text{nm/cm})/(\text{kg/cm}^2)$

N : 条の数

S : 表面応力 kg/cm^2

D : 応力層厚さ μm

K, N はキーボードから入力する。

S, D はコンピュータが算出し表示する。

るというご希望も受けている。

今後も活用して頂き、ご教示を寄せて下されば幸いです。

謝 辞

表面応力計シリーズの開発に永年協力されている折原製作所の方々に謝意を表します。

〔著 者 紹 介〕



岸井 貫（きしいとおる）

昭和 25 年 3 月東京大学理学部物理学科卒業、同年 4 月東芝入社、硝子技術部（現東芝硝子）、昭和 38 年 8 月東芝中央研究所。同総合研究所を経て計測器の販売と開発に従事。昭和 58 年 10 月東芝硝子（株）入社。昭和 46 年～47 年カリフォルニア大学ロサンジェルス校客員研究員、工学博士（東京工業大学）