

# 東 芝 光 干 渉 膨 脹 計

## 1. 熱膨脹測定 of 歴史

熱膨脹は試料の長さに対して $1/1000$ ないし $1/100$ という小さな量であり、また試料を高温または低温に保持して測らなければならないので、相対精度を高くすることが他種の量に比べて難しい。そのため昔から多くの人々が測定法を工夫してきた。たとえばラプラスーラポアジェの方法、デュロンーブチの方法など、著名な学者の名を冠した方法が伝えられている。

## 2. 光干渉膨脹計 of 歴史

光速度測定 of 試みなどで知られるフィゾーは薄膜の干渉現象を熱干渉測定に利用することを工夫した。これはフィゾーの干渉膨脹計と呼ばれる。例えば芝亀吉先生の著書に第1図のようなものが引用されている。<sup>1)</sup> 試料の光学研磨面と干渉面とで空気薄層を作り、その厚さの変化を干渉を使って測ることで、試料と干渉面支持体との膨脹差を知りうる。支持体の熱膨脹は、支持体をねじ下げて上下の干渉面を近づけ、干渉面間に空気薄層を作って測る。この2回の測定結果を対照して試料の伸びを算出できる。

フィゾーの方法は、ショット・ガラス会社（ドイツ）や米国国立標準局（略称NBS）で光学ガラスの熱膨脹や屈折率の温度特性を求められるように工夫し利用された。これらはアッパーフィゾーの方法と呼ばれる。

## 3. NBSにおける光干渉膨脹計 of 開発

NBSでは干渉膨脹計 of 改良、開発に力を注ぎ、1950年頃までに次に記すような成果を挙げた。

まず、干渉現象を薄膜だけでなく $cm$ のオーダーの厚さのものでも観察でき、試料を研磨する必要がない型式の膨脹計を採用し、これらについての取扱い、試料の調整法、測定法、膨脹計算の方法を詳しく発表した。次に液体窒素温度域での測定法を完成した。また測定を自動化する努力を続け、1945年には干渉縞の動きを流し写真で自動記録する方法、1951年には二次電子増倍管による方法を発表した（これらについては第6節参照）。NBSでは光波長による長さ基準の確立も当時の主要業務であった。この仕事との交流が干渉膨脹計 of に役立ったと想像される。特に計量技術で干渉縞の次数の絶対値を求めるための合致法を光干渉膨脹計にも適用したのはその一例である。

#### 4. 材料の熱膨張の大きさ

試料の長さ10cm、温度差500℃の条件での伸びは第1表の通りである。伸びは長さに比べて小さい値であるが、材料の接合や熱衝撃に起因する応力は概略

$$\text{ヤング率} \times (\text{伸びの差}) \div \text{長さ}$$

であり、ヤング率が破壊応力に比べて1000倍くらいであるため

(伸び、又は伸びの差) ÷ 長さ が相当に小さくないと破壊につながる。材料の膨張係数が最近重要視され始めた原因の一つはこれであろう。

#### 5. 東芝光干渉膨脹計の歴史

##### 5-1) レーザー以前

継続的な取り扱いには昭和20年代後半に始まった。照明灯、電子管工業において、ガラスや金属材料の気密封着に正しい(10<sup>-7</sup>℃<sup>-1</sup>の桁の)膨張係数の測定が必要なことが端緒であった。膨脹計の形式はNBSのものを踏襲した。これは試料の長さが0.5mm~15mmの範囲で選べ、標準試料の必要はなく、被測定試料の膨脹が直接に測られ、被測定試料を研磨する必要もない、という幾つもの利点があり(第2図)、この型式は現在まで変わっていない。

試料一干渉板系を干渉径にかけて単色平行光束を投射すると干渉縞模様が現われる(第3図)。試料の伸びまたは縮みに対応して干渉縞模様が平行移動するので、干渉面に目標点を刻みつけておき、これを通過する黒条の数を温度と対応して数える。条の数の端数(小数点以下)は、干渉縞模様と目標点との相対位置を観察して目測で読み取る。

干渉縞模様で、隣り合う黒条はその間で干渉面間距離が光の半波長だけ違っていることを表わす。従って条数を0.1の桁まで読めば、伸縮を0.25μmまで読み取ったことになり、長さ10mmの試料で長さの2.5×10<sup>-5</sup>倍まで読めることになる。

当時は干渉縞の動きを肉眼で監視し続けたので、測定には肉体的拘束を伴っていた。この対策として改良された合致法を提案したけれども<sup>2)</sup>、温度を停止して測るような特別な場合を除き実行はできず、問題は解決されなかった。この時期に貯えたノウハウは機会を見て発表した。<sup>3)</sup> ジュメット封入線のような異方性材料の膨脹を測定したり、<sup>4)</sup> 外販して96%シリカガラス(非常に低膨脹である。)や高電流密度電解用炭素電極(低膨脹であることを要するが熱処理によりグラファイト化すると高膨脹化する。)の測定に利用して頂いた。

## 5-2) レーザー以後

昭和40年代に入ると複合材料が実用化され、それらの異方的膨脹が重視される場合が生じた。プリント配線用基板では厚さ方向の膨脹係数は内面方向に比べ10倍以上大きく、これがまたスルーホール内面に施された導電メッキの断線原因になった。厚さ1mm前後のもの膨脹測定には光干渉膨脹計が適していたため、いくつかの要望があった。その他にも構造用複合材料に適用された。

当時の御顧客の一人からレーザーを適用するという示唆を頂いた。実行してみると次のように多くの利点があることがわかった<sup>5)6)</sup>。

He-Neガスレーザーは単色のビームを出し、ビームをそのまま(広げないで)使うかぎり光束密度が高いので干渉計のコリメーションが容易になり、高温炉中での熱輻射の妨害を相対的に小さくできた。また干渉性が良いので、試料の長さを10cmまで大きくしても干渉が起き測定に利用できることがわかった。しかし最大の利点は自動記録が比較的簡単に実現できたことである。

第4図に示すように、ガスレーザーのビームを干渉部に集束し落射させると、落射点で生ずる干渉の効果が反射ビームに現われる。落射点での干渉面間距離が試料の伸縮に伴って光の半波長変わること、反射光強度が強弱変化の1周期を生ずる。従って反射ビーム強度を太陽電池で測って温度と共に並行記録すると、在来型の装置で目標点を過ぎる黒条を監視続けるのと同じ効果が得られる(第5図)。

このようにして光干渉膨脹計の難点がかなりの程度まで解決されると同時に取扱いが容易になった。加えてその後、新素材の熱膨脹特性が関心を惹き、また新素材の中に異方膨脹性(複合材料に多い)、低膨脹性(光ファイバー用シリカガラス、炭素繊維、結晶化ガラスなど)、負膨脹性のものが多いので、膨脹計の御要求も多くなって現在に至った。

集束ビーム型の光干渉膨脹計について、別の立場からまとめ<sup>7)</sup>あるいは技術的な細部の発表も行われた。<sup>5)</sup>現在のところ、1650℃まで干渉を観察でき、干渉縞模様をビデオ表示、ビデオ記録できるものの納入実績がある。

## 5-3) 今後

画像センサーや画像処理技術が発達したので、干渉縞模様の記録、処理に各種の方式を適用できるようになった。すでに干渉縞模様をビデオ表示することは容易である。多種のセンサー(リニヤセンサー、フォトダイオードアレイ)の利用とそのデータ処理も原理的な困難はない。光干渉膨脹計に適したデータ処理のアルゴリズム開発が今後の重点であろう。(第6図)

## 6. 自動記録化の歴史

測定には温度対目標点での干渉縞の絶対次数の関係を知らることが最終の目的である。絶対次数のかわりに相対次数であっても一応は良い。絶対次数は合致法を使えば原理的には求められるが、測定項目が多くなり計算が煩雑で実用的でなかった。(この点は現在のコンピュータ技術の発達で少し変わったと言える。)相対次数を求めるには干渉縞の移動を監視し続ける必要がある。この問題はレーザーの適用で解決に近づいたことは5-2)で述べた。しかし、試料が測定中に伸び 縮みの転換を起こす場合、この転換を100パーセント確実に検出し、正しい相対次数を数え続けるという点に不満足さが残っている。

計算技術において干渉縞次数の増減転換を検出する方法は確立されている。しかし光干渉膨脹計では、試料の伸びは特性の不均一のために干渉縞の黒条間距離は必ずしも一定でなく、黒条の伸びる方向が一定とも限らない。従って光干渉膨脹計に適した方法を工夫する必要がある。

### 6-1) 流し写真方式<sup>8)</sup>

干渉縞模様の実像を結ばせて、その黒条を横切る角度に目標点を含んで細長いスリットを持つ遮光板を置く。スリットに直角な方向へ長い写真フィルムを一定速度で動かす。(第7図)。干渉縞模様が静止していればフィルム上にフィルム移動方向に平行な像、移動していれば傾いた像が焼き付けられる。フィルムを現像、観察して干渉縞が目標点を通る状況を知りうる。干渉縞移動方向の逆転は確実に検出できよう。

### 6-2) 二次電子倍像管方式<sup>9)</sup>

干渉縞模様の実像の位置にピンホール絞りを置き、ピンホールを通した光量を倍像管で測光する(第8図)。ピンホールを黒条が通過すると光量は極小になる。光量と温度とを平行記録する。

干渉縞の移動量が大きく移動方向の逆転がない場合はこの方法は満足なものである。縞移動量が少なく、または移動方向の逆転がある場合には、この逆転を検出し損う可能性が何十パーセントか残っている(第9図)。

ガスレーザーを光源とし、ビームを拡散してから大面積の平行光束としてこの方法を適用した市販例がある。

これらの方式は光の利用率が極端に小さいため増幅とS/N比を良くするためにとに注意を払う必要がある。

### 6-3) 集束レーザービーム方式

5-2) に述べた方法である。ビームを集束して落射させることでピンホールを使わずにすみ、光の利用率が良くて測光が簡単になる。その他の点では6-2) で述べたことがあてはまる。移動方向の逆転を検出する補助手段がなんらか必要になる。この必要が予見される場合には肉眼視を時々併用するのが実用的である。

## 引用文献

- 1) 芝 亀吉 熱学 第11版 P21 (昭和19年) (岩波書店)
- 2) 岸井 貞 東芝レビュー 13 [1] 59 (昭和33年)
- 3) 岸井 貞 窯業協会誌 72 [11-2] C756 (昭和39年)
- 4) 岸井 貞 東芝レビュー 12 [3] 265 (昭和32年)
- 5) 同 上 同 上 27 [2] 162 (昭和47年)
- 6) 同 上 Japan. J. Appl. Phys. 14  
Suppl. 14-1 P397 (1975年)
- 7) 同 上 センサー技術 4 [11] 44 (昭和59年)
- 8) J. B. Saunders J. Res. NBS 35 157 (1946年)
- 9) R. N. Work 同 上 47 80 (1951年)

第1表

長さ10cm、温度差500℃の場合の伸び

材 料	平均膨脹係数 (代表値又は概略値) 単位： $10^{-7}^{\circ}\text{C}^{-1}$	伸 び
石英ガラス	5	25 $\mu\text{m}$
硬質ガラス	40	200 $\mu\text{m}$
軟質ガラス	100	500 $\mu\text{m}$
タングステン	45	225 $\mu\text{m}$
白金	90	450 $\mu\text{m}$
鉄	123	0.6mm
銅	162	0.8mm
アルミニウム	237	1.2mm