

光の干渉現象を利用した熱膨張計

東芝硝子(株) 岸井 賢

光干渉熱膨張計は光の干渉現象を利用して物体の熱膨張を精密に測る装置である。この装置にはつぎのような特徴がある。

① 試料の伸びを光の波長を基準にして測るので、伸びの測定に関しては較正の必要も経年的な狂いの恐れもない。

② 膨張の基準にする物質は必要でない。逆に他の型式の膨張計の基準物質（石英ガラス、サファイヤ、コージェライト質低膨張セラミック、など）の膨張を測定できる。

③ 試料の長さ6～12mmで最良の精度で測定できる。3～6mmでもかなりの精度で測る。小型のものしか作れない材料やすでに部品に加工されてしまったものを測定できる。

④ 試料が小さいため試料内の温度分布を均一にしやすく、これが精度を高める原因の1つである。

他方、この型の膨張計はつぎのような欠点があると考えられたため、特殊な高精度を要する用途以外には普及が遅かった。

① 試料の2面を光波長程度の精度で平面にかつ互いに平行に研磨しなければならない。

② 測定中に干渉縞が移動し去ってゆくのを監視し続け、その数を間違いなく数えなければならない。

③ 公称される精度、感度の値が小さくて（精度が高過ぎ）、信用しにくい。

これらのうち①は本稿で後で説明するようにまったくの誤りである。②についていえば、現在は自動化されていて膨張が単調な試料ならばまったく問題ない。

③に関しては、この膨張計は試料の長さの絶対値ではなく、長さの伸びだけを精密に測るように工夫されたものである。そのため読み取りの精度は自動記録時に $0.1\mu\text{m}$ 、人手による場合 $0.03\mu\text{m}$ に容易に到達する。干渉膨張計の誤差の主要因は伸び測定の誤差ではなく、温度のほうにある。

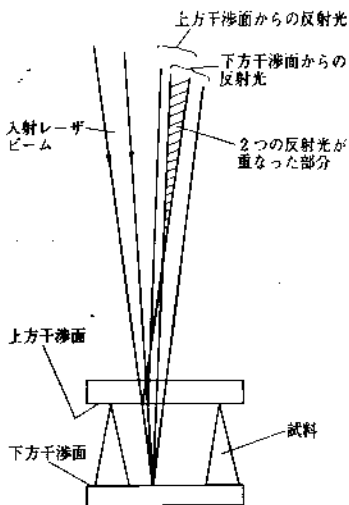


図1
集束レーザービーム型干渉膨張計の原理

1. 原理

この膨張計が利用する干渉現象は等厚の干渉であり、干渉面間の距離が等しい点を連ねて同色または明・暗の条（干渉縞）ができる。等厚の干渉はフィゾーの干渉とも呼ばれ、薄膜にニュートン環を生ずる干渉と同じである。ただし、膨張計では干渉面間距離がmmの桁なので、干渉面に垂直に光を送りかつ眺めない干渉縞が観察されない点で、ニュートン環と異なる。

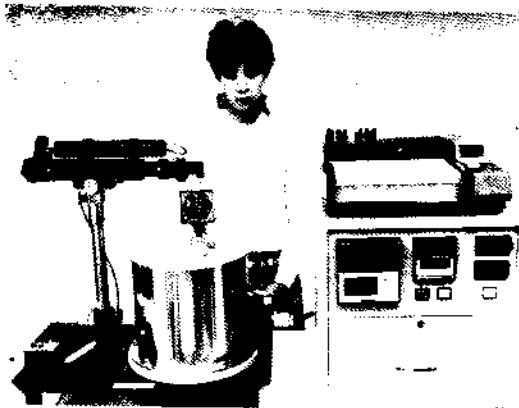


写真1 装置の外観

原理をガスレーザー光を使って自記化された装置の場合について説明する(図1参照)。

2つの干渉面が試料をスペーサーとして互にはぼ平行に保持される。上方からHe-Neガスレーザーのビームを長焦点凸レンズで集束して入射させる。2つの干渉面からの反射光は一部分を重ね合いながら上方へ進む。重なった部分では、2つの反射光が干渉し、2つの光の間の光路差によって強め合ったり弱め合ったりする。

試料が加熱されて膨張するにつれて反射光は強弱の変化を繰り返す。その1周期は試料の伸びが半波長相当であることを示す。温度と反射光の強さ(太陽電池で測る)とを2ペン記録計で並行記録し、それを解析して温度-伸び関係が得られる。

2. 測定技術の発展経過

フィゾーは西暦1866年に装置を発表した。そのためこの型の膨張計はフィゾーの膨張計またはフィゾーの干渉膨張計とも呼ばれる。

測定技術の細部にわたる報告が1933年に米国国立標準局(略称NBS)から出された。同所はそれ以後も測定技術の開発、特に自動化の工夫に努力し、1941年に流し写真(競馬の着順判定用のものと同じ原理である)で干渉縞の移動を自動記録する方式、1951年には2次電子増倍管による干渉縞移動記録方式、をそれぞれ発表した。

これらの装置は現在でも同所に保管されている。NBSが発売している熱膨張の標準試料は1,000K(823℃)以下の温度域では干渉膨張計で値づけされている。

わが国ではガスレーザー光源と2次電子増倍管とを組合せた自記装置が販売されている。

筆者は1964年に測定操作、特に干渉面間の平行を容易に出す方法を報告した。また1971年にはガスレーザ

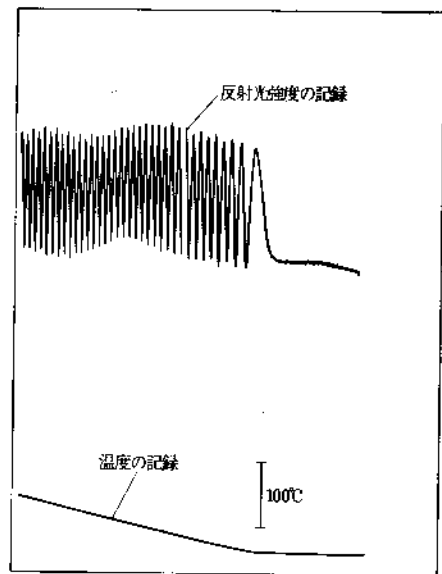


図2 長さ10mmの金の膨張測定記録の一部

光を発散光に変えることなく集束して利用する方式を工夫した。集束ビーム方式により、測光が容易であり、簡単に自動記録型にでき、試料が白熱温度であっても測定できる。また、現在1,400℃まで技術的に可能、レーザー出力増加により高温限界は上り得る、という新しい利点が現われた。

3. 集束ビーム型干渉膨張計

写真1は最近製作した装置である。大別して干渉計、試料加熱用電気炉、電気炉用調節系統、記録計に分けられる。

4. 測定の例

図2は長さ10mmの金を測定した記録の一部である。10℃当り干渉縞が約5個移動する。干渉縞1個は試料の $0.316\mu\text{m}$ (レーザー光波長 $0.6328\mu\text{m}$ の半分)の伸びに対応するので、記録された波形の周期の1/10を読めば $0.03\mu\text{m}$ が読めることになる。

図3は示差膨張計の構成・標準物質としてよく使われる石英ガラスの測定例である。長さ11mmで常温から800℃までの間に干渉縞が約9個動いた。膨張曲線は図4のように得られた。

5. 試料の形の例

試料は2枚の干渉板の間にスペーサーとなって干渉板を安定に保持する必要がある。人手できる形に従って工夫する。写真2に管型、サイコロ型、板(金属板)、板(繊維強化プラスチック：厚さ方向の膨張測定)の

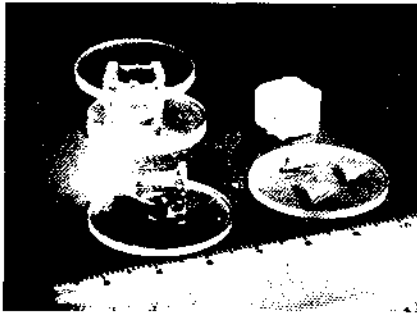


写真2 試料の形の例。(a)管形石英ガラス管から、(b)サイコロ型セラミックから、(c)金属板から、(d)繊維強化プラスチック(厚さ方向膨張測定のため)から作ったもの

形で得られたものをスパーサーに加工した例を示す。

6. 干渉板の平行度の出し方

試料の型を調整してそれを挟む2つの干渉面を互いに平行にするのは、つぎのように比較的簡単にできる。上方から単色光を投射し、上方から干渉面を眺められるような試料調整器が装置の一部にあるので、それを利用する。干渉面に移る光源の虚像を目印にして2面をほぼ平行にすると、フィゾーの干渉縞群が現われる(写真3(a)参照)。縞群は同心円状に並んでおり、同心円の中心が存在する方向に干渉面間距離が開いていることを表わしている。この判断をもとにして試料の形を微調整すると同心円の中心が干渉板面に出現する(写真3(b)参照)。この程度に干渉面が平行になると十分に測定できる。

7. 干渉計内の干渉像

平行度を出した試料-干渉板系を干渉計内へ入れて

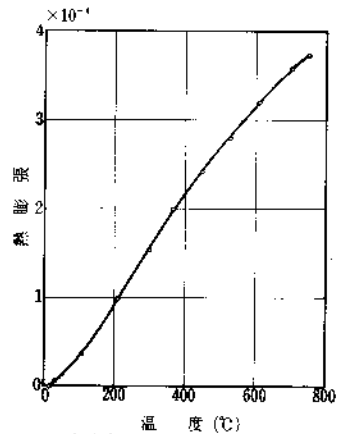


図4 石英ガラスの温度-熱膨張曲線

レーザー光を投射する。レーザー光をビームのまま投射すると、ビームが干渉面へ集束され、干渉面で反射されている状況が1つの輝点となって眺められる(写真4(a)参照)。自動記録測定はこの状態で実行される。

レーザー光の経路に光散乱体(すりガラス、プラスチック半透明膜など)を挿入すると、干渉面全体に光が投射されて干渉縞図形が見られる(写真4(b)参照)。干渉縞の曲りは干渉面の平面度の悪さによるものであるが、この程度であれば自動記録測定には問題がない。

精度を上げるために手動測定をする場合には、干渉面の平面度はもっと良くなければならない。平面度が良いと干渉縞は互いにほぼ平行な直線群になる(図5参照)。干渉板にはあらかじめ目標になる印を刻んでおく。目標およびそれを挟む2本の暗条の位置を接眼測微計で読み取り、干渉縞の暗条を整数に値づけたときの目標位置の値を比例計算で算出する。

手動測定をする場合には、試料を一定温度に保持して干渉縞が動かなくなってから読み取る。NBSでの標準試料の値づけはこの方法で行なわれる。目標の位

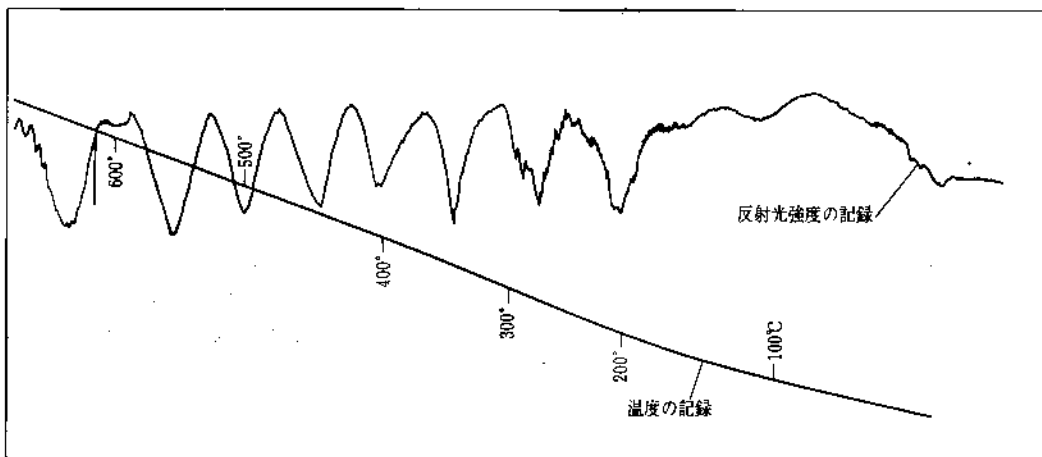


図3 長さ11mmの石英ガラスの測定記録

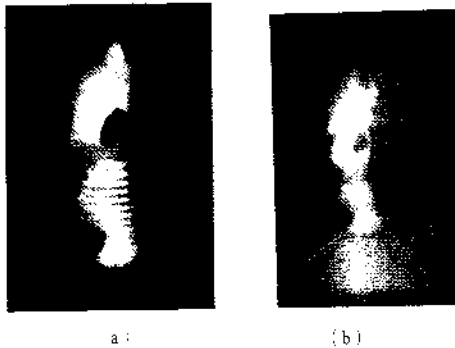


写真3 ファイバーの干渉縞の観察
a) 干渉面相互の平行度がまだ不十分。
b) 平行度が非常に良い。

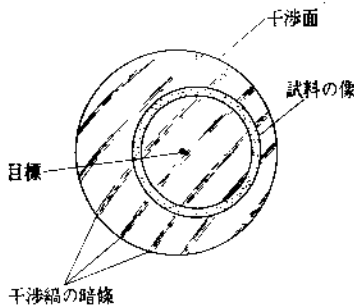


図5
手で特に精密に測定する場合の説明図

置は干渉縞間隔の1/20またはそれよりももっと詳しく決められる。これは伸びに換算して0.02 μ mまたはそれ以上の高精度である。

8. 膨張係数測定の精度

平均膨張係数の精度として、温度差300 $^{\circ}$ Cがとれるならば $\pm 1 \times 10^{-4} / ^{\circ}$ Cと公称している。

測定誤差の主な要因は、

- ① 熱電対の熱接点と試料との間の温度差
- ② 試料が熱的に安定でない場合の測定中の試料の伸縮

であり、その他の要因はずっと小さい影響を与えるだけである。2項の例は焼結不十分、焼結温度より高い温度で測定する、試料がガラス相を含みそのガラス転移点が測定温度域内になる、などである。

①項による誤差は伸びを測るごとに試料を一定温度に保つと非常に小さくなる。

実用的には一定速度で温度を上げながら測るのが便利である。この場合には温度上昇速度が遅い程精度が上がるであろう。また、常温付近では熱電対と試料間の熱伝達が遅くて温度差がつきやすく、精度が悪いと予想される。高膨張金属である金を試料にしてこれら

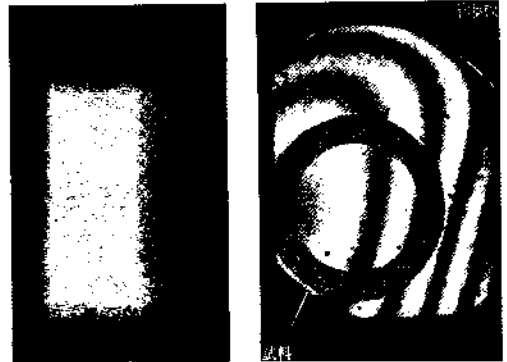


写真4 干渉計像
a) 集束ビームを投射して自動記録する場合
b) ビームを発散光に変えて干渉縞を観察する場合

の影響を調べた。

つぎの2つの温度プログラムでそれぞれ測定した

- ① 常温から4 $^{\circ}$ C/分で温度を上げる。
- ② 常温から150 $^{\circ}$ Cまで2 $^{\circ}$ C/分で、150 $^{\circ}$ C以上では4 $^{\circ}$ C/分で温度を上げる。

膨張曲線を図6(a)に示す。この尺度ではプログラムによる差は見えない。常温付近を拡大して図6(b)とした。プログラム②では試料温度が熱電対より遅れていたと推測された。

金の膨張特性についてつぎのような2つの参考資料がある^{11),12)}。

$$(1) l_{\theta} = l_0 (1 + 0.00001416 \theta + 0.0000000215 \theta^2)$$

θ : 温度, $0 \leq \theta \leq 520^{\circ}$ C,

l_{θ} : 温度 θ での長さ

l_0 : 0 $^{\circ}$ Cでの長さ

$$(2) \text{熱膨張率 } \alpha (\times 10^6)$$

20 $^{\circ}$ C —

100 $^{\circ}$ C 14.2

500 $^{\circ}$ C 15.2

900 $^{\circ}$ C 16.7

.....(2)

いずれからも平均膨張係数を算出することができるので、それらと実測値とを比べた(図7参照)。

プログラム①、②とも常温と300 $^{\circ}$ C以上の温度との間の平均膨張係数はバラツキが小さく、互いに合致し、文献値とも近い。しかし、150 $^{\circ}$ C以下ではバラツキがある。バラツキはプログラム②のほうがプログラム①に比べて遙かに小さい。

上記の結果は測定のための昇温プログラムを決めるときに参考になる。

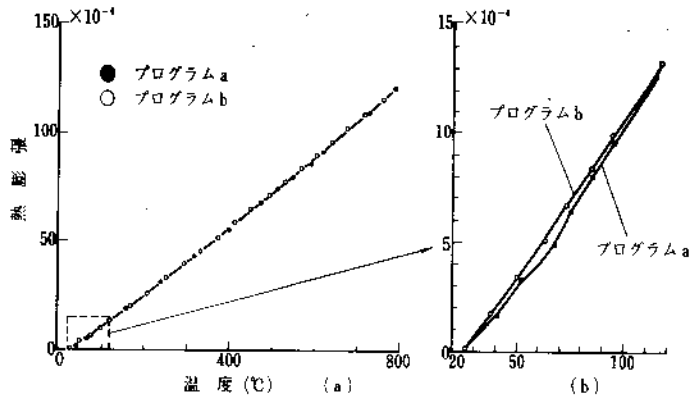


図6
2つの温度プログラムで得た
金の膨張曲線の比較

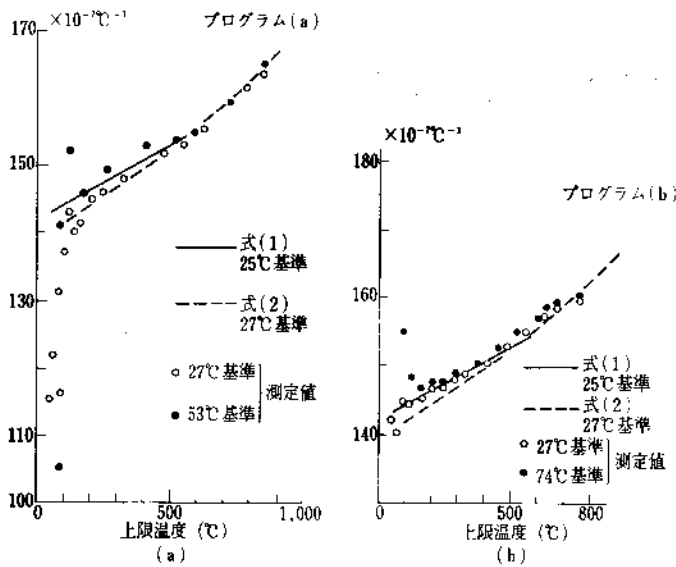


図7
(a)プログラム(a)および(b)プログラム
(b)により得られた平均膨張係数

□……………□

多くの研究者による研究と工夫の積み上げによって干渉膨張計は昔に比べてずっと使いやすくなった。しかしまだいくつか実現したいと筆者が考えている改良事項がある。それは、

1. 熱膨張特性が温度に対して非単調な試料の場合に、膨張→収縮、収縮→膨張の遷移を確実に検出した。
 2. 干渉縞の次数(干渉面間距離÷半波長)を任意のときに決定できるようにしたい。
- ということである。

1項について言えば、現状でも多くの場合遷移の検出は可能であるが、一部確認できないことがある。均一で熱的に安定な試料であり、干渉縞の配列(暗条間の間隔と条の伸びている方向)が測定中に変わらない、という前提があればこのような改良は原理の上では可

能である。

2項について言えば、これは根本的な改良であり、干渉膨張計のすべての問題を解消する。しかし、現状では実行できる案がない。将来に期待したいと思う。干渉膨張計の改良のために示唆を頂いた多くのユーザーの方々に謝意を表します。

参考文献

- (1) 芝亀吉:熱学, 第11版, 岩波書店, p.25 (昭和19年)
- (2) 日本金属学会編:金属データブック, 丸善, p.13, 昭和49年7月

東芝硝子(株) 技術部
〒421-03 静岡県榛原郡吉田町川尻3583-5
TEL (05483) 2-1211