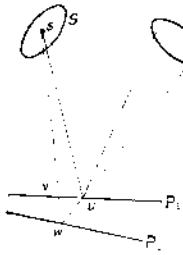


V. 光の干渉を利用した熱膨脹計

V. 1. フィゾーの干渉膨脹計

V. 1.1. 原理

ほぼ平行に置かれた2平面 p_1, p_2 に、光源面 S からの単色光を当て、瞳 B に入った反射光を観察したとする(図-1)。 S 上の点 s から出た光のあるものは、 p_1 上の点 u で反射して B に入り、他のものは経路 wvu を通ってやはり B に入る。この一対の光は、 u に焦点を合わせた眼では、網膜上の同一点に集まり干渉する。その結果、もし一対の光の光路差が波長 λ の整数倍に近ければ u 点は暗く見え、(整数 $\times 0.5$) 倍に近いと明るく見える。(注)したがって、眼には光路差が等しい点をつなぐ、明または暗のすじからなる干渉



S:光源, p_1, p_2 :平面, B:入射瞳

図-1 干渉膨脹計の原理図

縞が見える。 p_1, p_2 間の距離が変わると u が移動する。 p_1, p_2 の間に膨脹を測ろうとする物質を入れておくと、 u の移動から膨脹量がわかる。

V. 1.2. 構造

実際の膨脹計では、観測しやすいように二、三の工夫がされている。すなわち、(1)干渉部を一つのレンズの焦点において無限遠に像を作り、これを望遠鏡で眺める。(2)レンズは同時に焦点に置かれた光源からの光を干渉部に平行に投射するにも利用される。(3)光源開口と、瞳に相当する絞りとを密接させる。これによって干渉部の光線は自然に干渉面と垂直にコリメーションされ、コリメーションされていないと干渉縞自体が見えないようになる(図-2)。

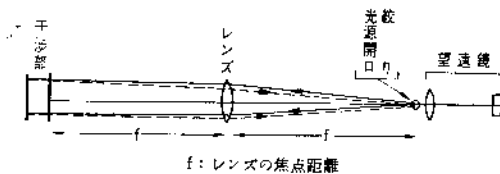
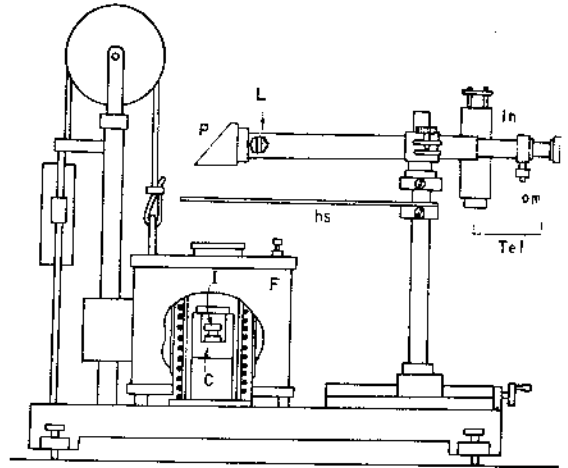


図-2 干渉膨脹計の構成の説明図

配置図と実物写真の例を 図-3 および 4 に示す。 図-2 のような位置関係を保つことが必要である。絞りの大きさは試行によって決める。光源開口と絞りが一つの円のそれぞれ半円に相当するように工夫するとよい。東芝、溝尻光学でそれぞれ特色のある製品を作っている。

V. 1.3. 構成上の注意

前記のような簡単な構造で、可動部がないから、原理的には手作りのものでも精度よく測ることができる。し



lh:ランプハウス, om:接眼測微計, P:直角反射プリズム, F:電炉, hs:熱遮断, I:干渉部, C:炉心, L:レンズ, Tel:望遠鏡

図-3 実際の干渉膨脹計の配置図

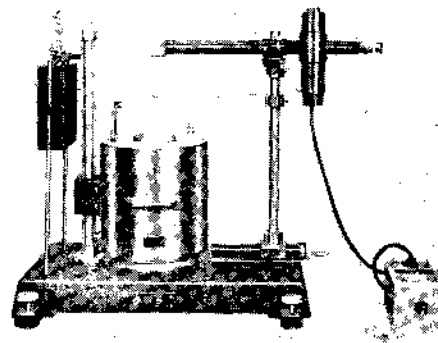


図-4 干渉膨脹計

かし取扱い上の不便はまぬがれない。干渉計は堅固な支柱に取り付け、全体としての前進、後退、固定、水平面内の廻転、前後傾およびプリズムの前後傾、干渉計のその軸の廻りでの廻転が楽で、かつ必要ある運動は微動させられると都合がよい。また、炉の加熱、膨脹が干渉部分を傾けたりしないように設計に注意する。また試料部分の温度分布を均一にし、その温度を正確に測れるような考慮も必要である。炉は炉心を残して上方へ取外せるようにする。

光源にはスペクトル用水銀またはカドミウム放電灯を使う。ナトリウムランプ、超高圧水銀灯などは、スペクトル線の二重性、半値幅の広がりのため適当とは言えない。前記の放電灯をそのまま使えば、それぞれの線線を利用することになる。フィルタで他のスペクトル線を出して利用することもできる。

干渉計のレンズはわずか軸を干渉計のそれと傾け、レンズ面からの反射光をそらせる。干渉板の下方のものは下の面を曇らせる。上方のもの2面は2°ぐらい傾けておく。

干渉膨脹計の精度は試料温度の測定精度で決まるから、精密測定のためには熱電対の起電力は低電圧電位差計で測り、冷接点は氷浴に入れて使う必要がある。

V. 1.4. 干渉膨脹計の特長

次のような点の特長と考えられる。(1) 膨脹は光の干渉現象を利用して測られるから、測定値の経年的狂いがなく、また膨脹量が大きいても誤差が増えない。(2) 装置は堅固、安定であればよく、特別な工作精度は必要でない。(3) 試料の長さは短かくてよく、そのため試料の温度分布不均一に原因する誤差が小さい。(4) 基準物質を要しない。逆に各種の示差膨脹計に使われている基準物質の膨脹を精密に測定できる。

V. 1.5. 試料

試料は2枚の光学平面の間に挟んで、2面を平行に保てるような形にする。数例を図-5に示す。図-5の(a)、(b)のように一体となっているものが望ましく、これらは上下の各3点で平面と接する。図-5の(c)は3個のピラミッドの組合わせで、各ピラミッドは底部の3点で安定に坐る。

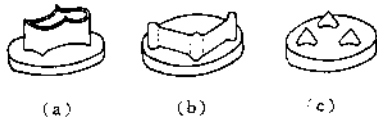


図-5 試料の形の例

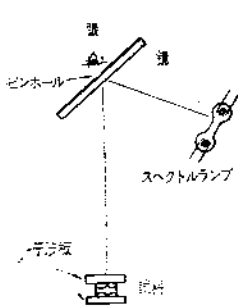


図-6 試料の調整法の説明図

試料の形を調整するのは難しいと考えられてきたが、筆者の経験ではそれ程でもない。まず図-6のような配置を準備しておく。干渉させるべき2面を合わせて、鏡の裏からのぞくと、放電灯のフィラメントの虚像が3個見えるが、そのうち干渉面からの2個はほとんど重なっているので、他の1個と容易に区別できる。大体の整形をした試料を2面の間に入れると、この2面は平行になっていないであろうから、前記の2個の像は離ればなれになる。これらをたがいに合致させるように、2像の位置関係から試料の最も高い頂点を判断して、それを少しずつすり落す。これを繰返して2像をできるだけよく一致させる。この状態になると眼に干渉じまが見え出す。このときの干渉じまは同心円群のように見えるはずである。その中心は、のぞき孔の虚像に対して面が開いて行く方向にあ

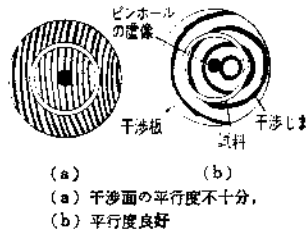


図-7 干渉じまの肉眼観察状況

る(図-7)。

試料の整形にはグラインダ、研削と石、油と石、鉄板とSiC粉末などを使う。微細調整には、ガラス板上にこまかいアラウンド粉を置いたものを使うとよい。試料の長さは10mmぐらいがよいが、5mmでもかなりの精度で測定できる。1mmならば5%程度の測定誤差があると予想される。

試料の長さの測定には多少工夫がいる。ピラミッド形のは直接にねじマイクロメータで測れる(図-8(a))。3頂点間の間隔が広くてねじマイクロメータのアンビルに乗らないときは、平行な2面を持つガラス板を用意しておいて、これと組み合わせて測る(図-8(b))。また、測定する試料のほかにピラミッドをもう一つ作り、この二者を干渉板の間に挟んで長さを比較し、その差を光波長程度になるよう調整する(図-8(c))。ピラミッドの

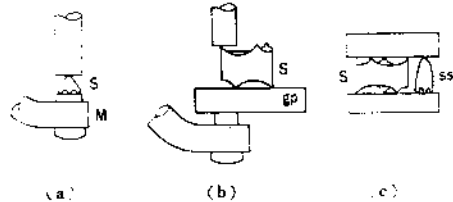


図-8 試料の長さ測定法
S: 試板, ss: 補助的試料, gp: 厚み平行なガラス板, M: ねじマイクロメータ

図-8 試料の長さ測定法

高さやねじマイクロメータで測ってその値を試料の長さとしてよい。

なお特別な方法を使えば、試料の長さを光波長の1/20程度の精度で求めることができるが、報告するほどで省略する。

V. 1.6. 測定上の諸注意

a. 試料の形

試料と干渉板との接点では、ある程度の接触面がないと安定な接触をしないから、接点はこわれやすくない限度内で鋭くする。接点がたいらに近くなると、干渉板との間に"air film"を挟んで測定誤差の原因になるといわれている^{10,11)}。試料を干渉板間に挟んで300°Cまで加熱すると、air filmの影響を除きうると考えられる。

b. 試料の清浄さ

試料に油膜、水膜、異物が付着していると誤差の原因になる。試料を粗調整した後によく洗い、以後の精密調

量は乾いた 潤滑な研削盤で行ない、最後に 100°C ぐらいで乾燥するのも一法である。

c. 試料の傾動

3個のピラミッド形からなる試料では、試料と干渉板との座標差のためにいずれかのものが傾き誤差を生ずる(図9)。この影響を除くには、1個のピラミッドを

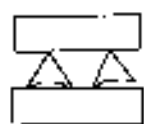


図9 試料の傾動

上方干渉板の重心下に近く置いて、干渉板重量の大部分を負担させて安定下し、しまた移動を避けるための目標点をこれになるべく近いところ

に選ぶ。さらに乾燥には安定化したピラミッドの頂点を中心として正三角形に位置する3点を目標点とし、各点について観測した値の平均値を正しい値として使う。

一体として作られた試料では、傾動の影響はほとんどないように思われるので、できる限りピラミッド形は置けたりがよいとされる。

d. 傾動中の試料の位置

下方の干渉板は傾動の際に同程度くよりも、加熱に対して安定な材質のスペーサを厚さ1mm程度で3mmぐらい浮かす方が、試料部分の温度不均一が小さいとされている。温度測定用の熱電対接点も試料とできるだけ近づけるべきである。

e. 加熱速度

加熱または冷却しながら測定する場合、その速度は十分小さくして温度不均一や、試料と熱電対との温度差が発生しないようにする。どのぐらいの速度がよいかは簡単に決められないが、たとえば 5°C/min 以下、もしできればさらにその 1/2 以下が望ましい。

V. 1.7. 膨張の計算法

干渉板に、たとえばダイアモンド磨で研削された目標点とする。干渉板の暗条を物差しの目標点のように考えて目標点の位置を認め取る。暗条は干渉両間の距離が準ず方向に目盛が進入していくものとなるが、その方向は試料を加熱して膨張させたときのしまたの移動方向と逆なので容易に判定できる。ただし、石英ガラスのような低熱膨張物質を空温付近で測る場合や、負膨張の物質では逆に、干渉板を上方から軽く押し、しまたが移動する方向と同方向だとして決してもよい。熱膨張によって暗条が目標点を通過することK、読み取り幅は暗条幅が1だけ増す。このようにして加熱前と温度上昇後との間のしまたの移動量が、暗条幅の間隔を単位として小数部分も含めて求めることができる。この量を δN とする。

目標点における干渉両間の距離を l 、光の波長を λ 、空気屈折率を n とし、標準状態 (15°C、760 mmHg)、温度 T_1 および T_2 における値を添字 $1, 2$ で区別する。 $N = N(\lambda, n)$ であって、試料の伸び率は

$$(l_2 - l_1)/l_1 = [CN_2(\lambda, n)_2] - [CN_1(\lambda, n)_1] / [CN_2(\lambda, n)_2]$$

で表わされる。 $\lambda = \lambda_0(1 + \delta)$ と表わせるとする。 δ は空気補正と呼ばれる量である。 $N_2 - N_1 = \delta N$ なので試料の伸び率は右次の微小項を無視して

$$\delta N(\lambda_0^2/n^2) \cdot (\delta_2 - \delta_1)$$

と表わされる。空気屈折率を n とすると、温度 T °C における空気補正 δ_T は

$$\delta_T = n_S - n_T = (n_S - 1) \cdot (n_T - 1)$$

から求められる。 n_T は次式で求めて実用上差支えない。

$$(n_T - 1) = 288 \times (n_S - 1) / (237 + T)$$

気圧 B mmHg の影響も補正するには

$$(n_T B - 1) - (n_S - 1) = \frac{286}{273 + T} \frac{B}{760}$$

とする。各スペクトル線の n_S と n_T は常数表から求めることができる⁽¹⁾。平均膨張係数は

$$\alpha_{T_2 - T_1} = (l_2 - l_1) / N(\lambda, n) (T_2 - T_1)$$

である。

V. 1.8. 測定精度

試料の長さ 10 mm、膨張係数 $100 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ の場合、目標点の位置を ±1 mm の 1/10 まで読めば、誤差は $0.5 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 以内になる。誤差の大部分は温度測定に起因するので、標準品の物質ではさらに誤差が小さい。ただし温度変化が急激な場合や誤差が大きくなり、測定誤差が大きくなると、それにしたがって精度は悪くなる。

V. 1.9. 用途

干渉膨張計の操作は容易とは言えないから日常使用には適さないが、その特長を利用した用途がある。筆者が行った例では、(1) 示差膨張計の標準物質である石英ガラスの膨張測定、(2) 示差膨張計を校正するための正しい膨張係数の知られた標準物質の製、(3) シュメット軸線の半経方向への膨張測定⁽²⁾、(4) 熱膨張などによる物質の微小な体積変化の測定⁽³⁾ などがある。

V. 2 干渉を利用した示差膨張計

少数例だが、示差膨張計の膨張機測定部に干渉計を用いたものがある。

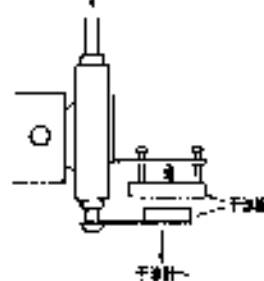


図10 干渉を利用した示差膨張計
図10は筆者が古い金属材料を磨るために作ったもので、本体は石英ガラス製の示差膨張計である。干渉板の一方は固定され、他方は試料の膨張にしたがって平行移動する。平行移動機構には、古いダイアモンドを分解して、その外わくとスピンドルとを利用して、固定板の向きと位置とは日本のおぼして微細調整で、移動

板になるべく近くし、かつ干渉じまを生ずるよう十分平行にできる。干渉計部分が下方に向いているのは、移動部分の重量を試料に張力として加えようとしたためである。

この形式では本来の干渉膨脹計と違って、試料がいくら長くても干渉じまが現われる。また光源面積や観測部の絞りが広くてもよいから、干渉じまが明るくて見やすい。膨脹計としての感度も 10~20 倍高くなるはずだが、精度としては当然試料部の温度不均一、試料と熱電対との温度差等の影響で、示差膨脹計としての限界以上には良くならない。しかし膨脹量測定が較正、補正の必要なく、また経年的な変動の恐れなしに測れるのは一つの改良と言えよう。

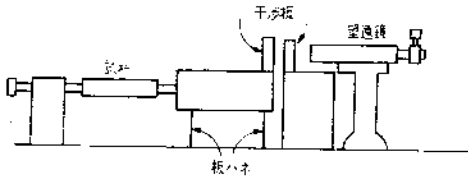
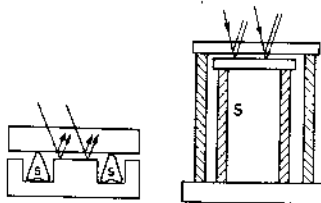


図-11 等傾角干渉を利用した膨脹計

最近、米国標準局ではほぼ同じ形式のものを報告している¹⁸⁾ (図-11)。干渉板は正確な平面に研磨され、かつ精密に平行に置かれる。このようにすると、干渉計部はフュッリーペローのエタロンになるので等傾角の干渉が観察され、干渉じまは同心円群をなす。干渉面を半透明に鍍銀すると、多重反射のためにしまの明部または暗部が鋭く細いすじになり、干渉じまの移動量を接眼顕微鏡に、たとえばしまの間隔の 1/1 000 まで読み取ることができる。

試料の膨脹 10^{-7} cm は、しまの半径の 10^{-3} cm の変化に対応するという。理論的な最高感度は 2×10^{-6} cm だが、干渉板の平面度から 10^{-7} cm に止まっている。これはフェライトの磁歪を測定するものであるが、4°K から常温までの間の熱膨脹を測る装置もある。これは移動した干渉じまの数を光電セルで数え、移動量の分数部は接眼顕微鏡で測るようになっていた。

なお等傾角の干渉じまの観察には、絞りは不要であり、光源は広くてよく、したがってしまは明るくて見やすい。しかし



S: 試料, 他は石英ガラス
図-12 示差熱膨脹計の構成材料を干渉面とした例

平面度、平行度を十分良くしなければならないので、製作費は高くなるであろう。

つぎに、基準物質の一部を干渉面とし、試料との膨脹差を炉内で直接に干渉によって知る形式のものがある。その例を 図-12 に示す。

(注) 反射による位相の飛びがある場合

参考文献

装置および測定法に関するもの

- 1) L. Fizeau, *An. Phys.*, **128**, 564 (1866); C. Pulfrich, *Z. Instr. Kunde*, **18**, 261 (1898)
- 2) G.E. Merritt, *J. Research Nat. Bur. Standard*, **10**, 59 (1933)
- 3) J.B. Saunders, 同上, **23**, 179 (1939)
- 4) 岸井 貫, *Trav. IV^e Congrès Intern. Verre*, 244 (1956); *東芝レビュー*, **13**, 59 (1958)

測定の自動化に関するもの

- 5) R.N. Work, *J. Research Nat. Bur. Standard*, **47**, 80 (1951)
- 6) J.B. Saunders, 同上, **35**, 157 (1945)
- 7) A. Trobridge, *J. Opt. Soc. Amer.*, **6**, 195 (1922); M.A. Arnulf, *Rev. d'Optique*, **3**, 270 (1924); R.H. Sinden, *J. Opt. Soc. Amer.*, **15**, 171 (1927); J.B. Austin, *Physics*, **3**, 240 (1932); F.C. Nix, D. Mac Nair, *Rev. Sci. Instr.*, **12**, 66 (1941)
- 8) 辻二郎, *難波選*, 応物, **24**, 397 (1955)
- 9) C.G. Peters, *Sci. Pap. Nat. Bur. Standard*, **20**, 653 (1926)
- 10) L.A. Wood, N. Bekkedahl, C.G. Peters, *J. Research Nat. Bur. Standard*, **23**, 571 (1939); W.H. Johnson, W.H. Pearson, 同上, **32**, 101 (1944); R.F. Geller, P.J. Yavorski, 同上, **35**, 87 (1945); A. Hockman, D.W. Kessler, 同上, **44**, 395 (1950); C.E. Weir, W.H. Leser, L.A. Wood, 同上, **44**, 367 (1950)
- 11) H.M. Randall, *Phys. Rev.*, **30**, 216 (1910)
- 12) J.B. Saunders, *J. Research Nat. Bur. Standard*, **28**, 51 (1942)

光の波長、屈折率に関するもの

- 13) J.E. Sears, H. Barrell, *Phil. Trans. Roy. Soc. (London)*, **A 238**, 1 (1939)
- 14) C.G. Peters, W.B. Emerson, *J. Research Nat. Bur. Standard*, **44**, 419 (1950)
- 15) 芝 亀吉, “物理常数表”, p. 346 (1947)

干渉膨脹計の応用に関するもの

- 16) 岸井 貫, *窯協*, **65**, 269 (1957); **65**, 201 (1957); **68**, 88, 170 (1958)
- 干渉を用いた示差膨脹計または膨脹計
- 17) 岸井 貫, *東芝レビュー*, **12**, 265 (1957)
- 18) V.E. Bottom, *Rev. Sci. Instr.*, **35**, 374 (1964); *Nat. Bur. Standard Tech. News Bull.*, **47**, 131 (1963)
- 19) 前記 12); 7) 中の Sinden, その他
- 20) *窯協*, **71**, C520(1963); 岸井 貫, 同上, **68**, C128(1960)

(東京芝浦電気株式会社 岸井 貫)