

光干渉式熱膨張計

「材料の熱膨張は小さいし、高温・低温での長さの精密測定が必要なので正確な値を得がたい。フィゾーの干渉計の原理を使った熱膨張計はこれらの困難を除けるものであり、日本工業規格でも低膨脹材料の膨脹測定用の装置として規定されている。これとそれらの関連した測定操作を述べた。」

千葉工業大学 岸 井 貫
Chiba Institute of Technology Toru KISHII

1. 干渉膨脹計

表題の言葉は内容を比較的良好に表現していると考えて使った。これは英語の「Interferometric dilatometer」に当たるもので、光学干渉計を物体の熱膨張を測定するように改変・流用したものとみなせる。考案した光学研究者の名前を採って「フィゾーの干渉膨脹計」とも呼ばれる。これは「フィゾーの干渉計」を膨脹測定に使ったという意味の名称であろう。

筆者は簡単に「干渉膨脹計」と呼んできた。以下でもこう呼ぶことにする。

2. 材料の熱膨張特性

物質または材料の熱膨張特性は基本的物性であるが、工業的にも材料を温度が上昇する環境で使う場合には特に重要である。工業材料で弾性率が高いものは、他材料との膨脹差が僅かであっても、組み合わせると強い熱応力を発生し、亀裂を生ずる。堅いが脆い材料、たとえばガラス、では、融着する相手の材料との熱膨脹差が十分小さいことを要する。

他方で熱膨脹、あるいは熱膨脹係数は正確に測り難い量である。熱膨脹自体が小さい量である上に、高温または低温での材料の長さを精密に測る必要がある。また測るときに試料の温度を変えてはならないという難しい制約があるし、装置の構成材料の熱的特性さえも測定値に影響を与える。

3. 示差膨脹計

熱膨脹計のうち比較的良好に使われるものは「示差式膨脹計」である。特に低膨脹で耐熱性のある石英ガラスを構成材料として被検試料を保持し、試料の熱膨脹を外気温の環境へ取り出してダイヤルゲージ・差動変圧器・光の梃子などで測定する(図1)。測られる値は試料と石英ガラスとの膨脹差であるから、測定値に石英ガラスの膨脹特性を加算して補整すると、試料の膨脹が求められる。

常温と300℃との間の石英ガラスの平均熱膨脹係数は $6 \times 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ である。

しかしこの方法は、試料と二つの石英ガラス製部品の温度が正確に等しくないと信頼できないし、長さ変化の測定器は長さとの関係が間接的で、従って精度維持も間接的な方法の継ぎ合わせに頼ることになる。従って膨脹係数の絶対値が石英ガラスのそれより小さいものでは、真の膨脹が正であるか負であるかさえも確認しづらい。

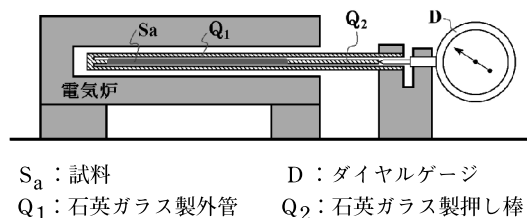


図1 示差熱膨脹計の一例

4. 干渉膨脹計

干渉膨脹計はこれらの問題点を克服できるものと筆者は考える。しかし「光の干渉」という現象を使うために、試料の作成に超精密な工作を要するようなイメージがあり、そのため普及していない。

また昔の光学技術が発達していない時代には、人がつきっきりで温度変化に伴う干渉縞の移動を観察・記録する必要があり、肉体的な苦痛と忍耐を要求されていた。

このような点では、長い年月にわたる装置の改良(図2)と、近年の光源・光センサー・コンピューター・画像処理技術の発展で状況が大きく変わった。

干渉膨脹計は熱膨脹を光波長を媒体にして測るから、膨脹測定に関しては較正・精度維持の必要がない。従って温度測定の精度維持に努力を集中するだけでよい。

また光の波長を基準にして測るので、小さい形、小さい膨脹、小さい膨脹係数の試料しか得られない場合にも有効である。たとえば方向性がある繊維強化品は厚みが小さくて、厚み方向と他の方向との間の膨脹特性の差が大きく、符号が反対であることも稀でない。それ故三方向それぞれの熱膨脹特性を知る必要がある。試料が小さいことは、温度分布を一様に近くするのが容易で、これも測定精度を高める一因になる。

干渉膨脹計は試料の部分だけを高温・低温部に入れて、光を外部から入れ、反射光をとらえて測定しているので、

光学系は常温に保たれ、測定中の移動部品はない。

同じ理由で、試料の酸化・着霜を防ぐために真空容器やガス雰囲気に入れて測る装置の設計も比較的容易である。

全体として、この測定器は機械的に堅固な装置であることは重要だが、通常の精度の機械部品で組み立てることができる。



図2 電気炉/干渉計/2-ペン記録計/温度調節系からなる

5. 「フィゾーの干渉 (薄膜の干渉・等厚の干渉)」

透明な薄膜があったとする。これに光をあてて反射光で観察すると、干渉現象が見える (図3)。

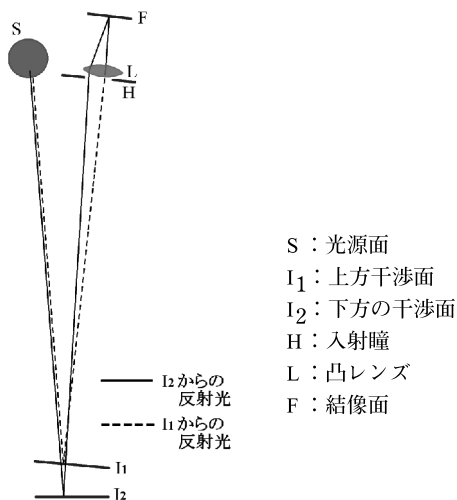


図3 フィゾー干渉の説明図

光源Sの一点から出た二つの光線が薄膜に当たり、一つは前面 I_1 で、他は後面 I_2 で反射される。これらの反射光は一つの入射瞳Hに入り、その後ろにある凸レンズLで絞られる。もしも凸レンズが薄膜面に焦点が当たっていると、二つの光線は結像面Fの中の一点Pに集められる。

二つの光線の間に生じた光路差により、二つの光はあるいは助け合いあるいは弱めあうので、結像面では膜の厚さや光の膜への入射角などに従い、明るさの分布が生ずる。膜が薄ければ明暗分布は膜厚の分布に従い、厚さの等高線を示す。

人間の目では瞳が入射瞳、水晶体が凸レンズ、網膜が結像面となって、干渉縞を観察できる。

入射瞳は小さくする必要がある。どれだけ小さくする必要があるかは膜の両面間の距離による。瞳が大きいと入って来る光線対の光路差がバラバラになり、環が不明瞭になる。

また両面間の間隔が大きいと6. 節に記すような厳しい制限が生ずる。従って普通の状況では干渉縞を観察できない。

6. フィゾーの干渉膨脹計

フィゾーの干渉膨脹計では、測りたい材料でスペーサーを作り、これで二つの光学平面を支える (図4)。

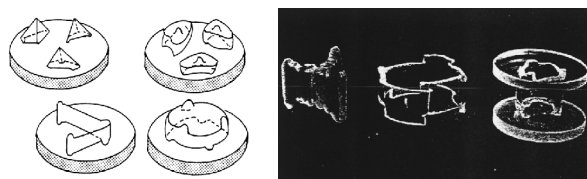


図4 サンプルの形の例と干渉板と組み合わせた例

材料が熱膨張によって長さを変えると、それに伴い材料を挟む二面で作られる干渉縞模様も移動する。この移動量は材料の熱膨張と光の波長とに関連しているので、温度変化と干渉縞の変化とを観察して、温度と材料の熱膨張との関係を知りうる。

スペーサーとなる被験試料の大きさは数ミリから2センチメートル程度なので、干渉現象の観察に、薄膜の場合に較べて次のような制限がある：

- a. 干渉板は熱的に安定で均質・透明なことが必要である。900℃以下ならば石英ガラス、1500℃以下では単結晶アルミナを使える。光が通過する面は平面度良く磨く。台になる板の下面は摺りガラス状にして鏡面反射を防ぐ。上に置く板は、二面をわずかに傾けて、干渉に関与しない光を邪魔にならない方向へ逃がす。
- b. 使用する光は単色光であることが必要である。水銀放電灯・カドミウム放電灯・ヘリウム放電管などで、フィルターで一つのスペクトル線を選び出して使って良い。水銀灯の場合は緑の線が他の線に比べて強いので、フィルターなしでも使える。青光・藍光もそれぞれ使える。同位元素の効果による線の多重性は、波長差が小さいので考えなくてよい。
 しかしナトリウムのD線のように二つのスペクトル線が近接しているものは不可であり、試料の長さによっては干渉縞が不明瞭になる。
 ガスレーザー光線に関しては、筆者はヘリウム・ネオンレーザーしか経験がないが、むろん使用できる場合が多いであろう。
- c. 干渉面間の傾角が小さいことが必要である。大きいと干渉に関与すべき二つの反射光が一つの瞳に入

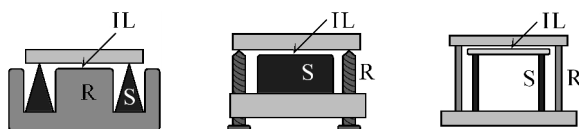
13. 他の干渉膨脹計の形式

その他の形式の干渉膨脹計も多く提案されてきた。これらについて簡単に記す。

13.1 示差干渉膨脹計

13.1.1 標準物質との膨脹差を炉内で測る方式

標準物質（たとえば石英ガラス）との膨脹差を、炉害へ引き出さずにそのまま光の干渉で測ろうとするもの（図12）で、フィゾーの干渉計の一変形と見なせるが、「プルフリッヒの干渉計」とも呼ばれる。



IL：干渉する薄層 S：試料 R：標準物質
図12 示差干渉膨脹計の干渉部の構成例

13.2 伸びの読みとり干渉を利用する方式

示差式の膨脹計において、伸びを測る部分に機械的に組み立てられた干渉計を利用するものである（図13）。

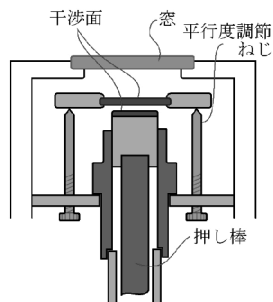


図13 示差干渉膨脹計の伸び測定用干渉計の部分

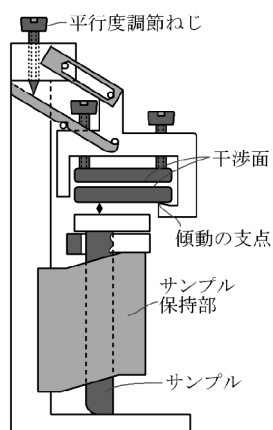


図14 干渉ゲージ部も温度槽に入れる構造の示差膨脹計

ダイヤルゲージや差動変圧器による方法よりも測定の機械的圧力が小さくて長さ変化を正確に測れる、という利点はあると思われる。また干渉面間の距離を小さくして、干渉縞を観察しやすくする事ができる。

固体希ガスの膨脹を測るために、干渉部も測定温度に

浸す装置の例が図14である。構成材料に石英ガラス・インバーン・黄銅を組み合わせ、干渉計部の温度変化が測定誤差にならないように考慮した。

14. マイケルソン干渉計型熱膨脹計

十分高い温度まで測定できる実用的な干渉膨脹計は、今まで述べた「フィゾーの干渉膨脹計」だけだと思うけれども、計量学の分野では、常温近くの温度域でブロックゲージなどをもっと精度高く測定しようとする方式がいくつかある。

これらは、フィゾーの干渉計が一つの共通の通過点を経過した光同士の干渉を利用しているのに対して、一つの光束を二つに分け、違う経路をそれぞれ通った後に合致させる、という点が違って、「マイケルソン干渉計型」と呼ぶべき構造になっている。また干渉板の一方は精密定盤やゲージを利用しており、従ってあまり温度を高くできないであろう。

14.1 ゼーマン効果レーザーを使用した干渉膨脹計

ガラス管を測定する状況を図15に示した。管を縦に固定し、上端と管の腹に抱かせて固定した台の上にそれぞれコーナーキューブプリズムを置いてレーザー光を入れる。返ってきた光の間の干渉によりコーナーキューブの相対位置の変化が表示される。これは管の上端と台が抱いているところとの間の管の伸縮に相当する。全体を真空にして測定すれば計算が簡単である。

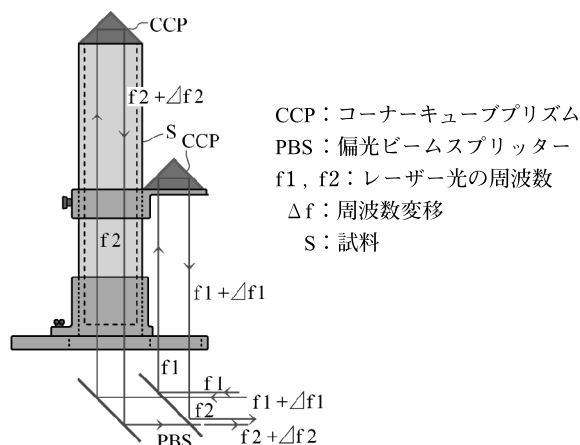
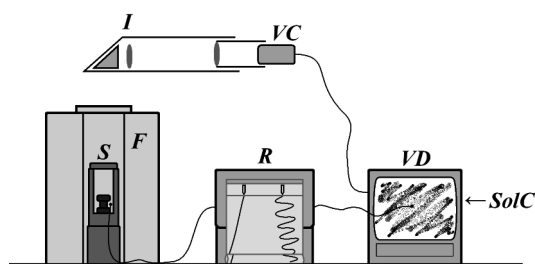


図15 ゼーマン効果レーザーを使ったマイケルソン型 干渉膨脹計

この装置では二つのコーナーキューブも試料と同じ温度に加熱・冷却しなければならないので、測定温度範囲は比較的に狭く限られる。

14.2 「二重光路式マイケルソン形干渉膨脹計」

コーナーキューブ、ビームスプリッターを組み合わせ試料の長さの4倍の光路をつくり、熱膨脹を測ろうとするもの（図16）で、二つの干渉面は図示されていない別の機構によって平行を保つことになっている。



S: 試料・干渉板保持部 F: 電気炉 I: 干渉計
VC: ビデオカメラ VD: ディスプレイ
SolC: 太陽電池片 R: 2-ペンレコーダー

図9 ビデオ撮像系を使った干渉計測定
の自記化

11.3 収束レーザービームの利用

図10のように、ヘリウムネオンガスレーザーのビームを光学系にいれると、干渉面に輝度の高いスポットを結ぶ。スポットであってもその光内で干渉現象が生じ、あたかも干渉縞模様のうちのスポットが当たっている部分の強度に比例する強度で、干渉縞模様の移動にともなう反射光強度の変化を起こす。反射光は十分明るくて、太陽電池で輝度変化を追える。その出力と熱電対出力とを平行記録する。

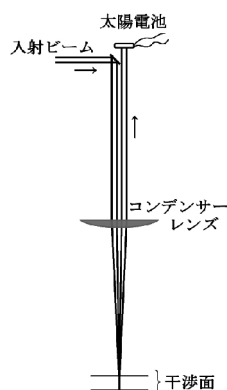


図10 収束レーザービーム方式の光学系

11.4 ラインセンサーを用いた画像処理の利用

干渉縞像を結ばせて、結像面にラインセンサーを置く。センサーの長さ方向を干渉縞に直交させて素子ごとの出力を記録して明度の分布を採り、その状態をプリンターで記録すると、干渉縞の移動状況が明瞭になり、仮に移動方向が逆転してもそのことを検知でき、膨脹-収縮の経過にも正しく追従できる。

図11は思考実験をしてみたもので、図11A) はラインセンサーの素子ごとの出力をグラフィックで表示したもの、B) はそれを時系列に並べたもので、この部分では干渉縞の移動方向の逆転が起きたとしている。

C) はA) と同じく素子ごとの出力の並びを仮定して表示したが、その周期性を知るためにフーリエ分解した結果をD) に図示した。32個の素子列に含まれる波の数のスペクトルに分解すると、この例では6.4個のあたり

のものが卓越している。

これに対応する周期を持つ正弦曲線 (1+ 正弦関数) をコンピューターで作り、いろいろな位相でC) の図形と重ね合わせて相関をとることができる。相関が最大になる位相が、実測されている干渉縞の位相であると判断され、特定の素子が縞模様の1周期のうちのどの位相にあるかがわかる。これによって、縞模様の移動量を、縞間隔の0.1倍の桁まで知ることができる。

フーリエ変換の迅速な計算をするためのコンピューター用ボードは入手可能である。

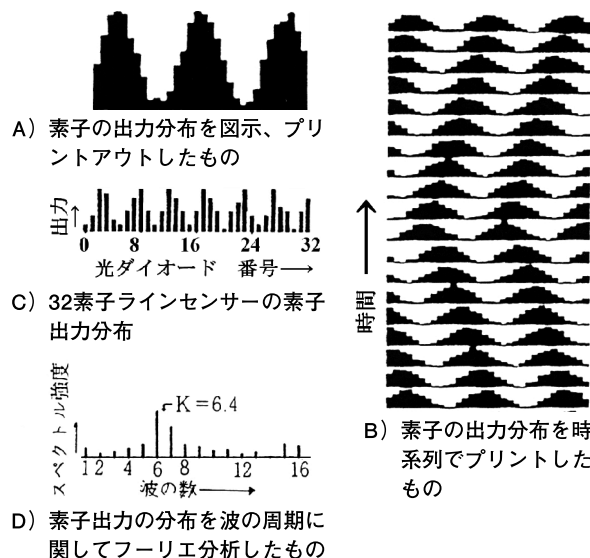


図11 ラインセンサーを使った干渉縞移動の
解析

1 2. 膨脹の測定精度

この測定では、長さ変化の測定には測定器の較正の問題がない (次に記す温度測定の誤差の方が大きい) と思う。例として膨脹係数が $100 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}^{-1}$ に近い物質 (たとえば白金) で長さ1cmの場合で推算すると、温度間隔 100°C に対応する伸びは $10\mu\text{m}$ で、干渉縞の次数に換算して40周期相当である。次数の読みとり誤差として低い温度のときと高い温度のときにそれぞれ周期の0.1倍があるとして、これらの合計は伸びの0.5%に相当する。温度間隔が広く、伸びが大きくなっても、伸び測定の誤差の絶対値は増さない。

従って、膨脹係数の測定誤差の大小を決めるのは温度に関する要因である。これを小さくするように装置と測定操作とを考慮することが大切である。

このような精度で測ると、材料の「熱的余効」の効果が捉えられて、材料の熱的前処理によって結果に差があることがある。ガラスはそれが比較的大きいものである。一般材料でも構造が安定化しうる温度で永く保持処理したうえに、常温へも十分遅い速度で冷やしてくる、という考慮が必要である。

の位置を縞間隔の1/10位までの細かさで読んで温度とともに記録する。

この時にはまた、干渉縞の次数がどちらの方向に増してゆくかを知る必要がある。

試料の膨張係数が $10 \times 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ よりも大きい時には、温度を上げ始めると視野に次数の高い縞が入ってくるように動くので、容易に次数の増す方向を知りうる。

そうでないときには、温度を上げる前に棒で試料/干渉板系を上から圧してみる。試料が弾性的に縮み、干渉縞系は次数が増す方向へ移動する。このように縞次数の増す方向をあらかじめ判断できる。

10. 熱膨張の計算

温度を上げていったとき、試料の膨張または収縮に伴い干渉縞模様は移動してゆく。干渉縞の1周期が通過したときには試料が約半波長伸びたことに対応する。

しかし干渉系が空気中に置かれたときは、温度とともに光の波長も変化するので、この効果を補整として加える必要がある。

はじめに使ったスペクトル線の波長を知る必要がある。物理常数表や理科年表から、 15°C 、 760mmHg の標準状態でのスペクトル線・レーザー線の波長 λ_s とそれらの光に対する空気の屈折率が得られる。

空気の標準状態での屈折率を $1+n_s$ と書く。

10.1 干渉系を真空中に置くとき

光の真空中での波長 λ_v は

$$\lambda_v = \lambda_s \times (1 + n_s)$$

である。この値は温度によらない。干渉縞模様の1周期の変化は試料の長さが $\lambda_v/2$ だけ変化したことを示す。

10.2 干渉系を空気中に置くとき

まず光の波長が λ_s で一定として温度 T_1 と T_2 との間での伸びを計算する。これに光波長の変化の効果を補整する。具体的には：

干渉縞模様が変化して経過した周期に（ λ_s /試料の長さ）を掛けて、単位長さあたりの見かけの熱膨張とする。

これに対して温度 T_1 、 T_2 での空気の屈折率（ $1+n_1$ ）と（ $1+n_2$ ）から

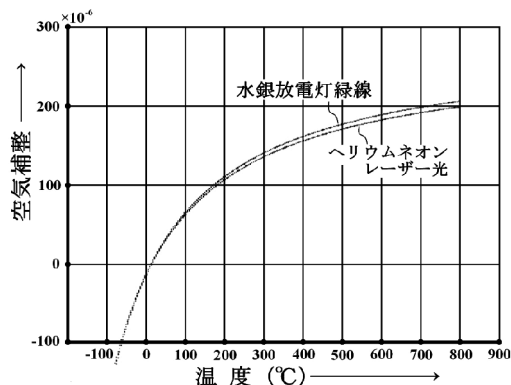
$$n_1 - n_2$$

を求めて加算すると、単位長さあたりの昇温に伴う真の伸びになる。この補整を「空気補整」と呼ぶ。

空気の屈折率を（ $1+n$ ）で表したとき、 n が空気の密度に比例し、空気の密度はボイル・シャルルの法則に従って変わると仮定して計算する。大気圧変動の影響は十分小さいと思うが、同じ考えの計算で繰り返すことができる。

実例として、水銀灯の緑線（波長 546nm ）、ヘリウム-ネオンガスレーザの赤線（波長 633nm ）での標準状態の

（ $n-1$ ）はそれぞれ 2.880×10^{-4} 及び 2.779×10^{-4} であり、それらについて温度対（ $n-1$ ）関係を例算した結果を図8に示す。手計算では面倒であるが、コンピュータを使えば手間はほとんどない。気圧計の測定値もA-D変換してコンピュータに取り込めば、温度・気圧双方の効果を算入できる。



15°Cを基準として計算した。

図8 水銀放電灯の緑線とヘリウム-ネオンレーザー光の空気補整

11. 測定の自動化

温度変化に伴う干渉縞の移動は、絶えず視野内で観察して数えなければならない。以前にはスリットを置いてその後ろに写真フィルムを流し、測定終了後に現像する方法が報告された。温度は別に記録または焼き付けるなどの手段が必要であったろう。

また自動化するにしても、干渉縞の次数が単調に増加するのならば簡単だが、加熱に伴う相変化や焼き締まりで収縮する時期が混ざる可能性に対する対策も必要であった。

最近になってレーザー・撮像素子・画像処理方式が進歩したので、それに伴い各種の自動記録方式が考案されてきた。

11.1 光電子増倍管の利用

一番単純な方式は、干渉縞の実像が作られている面に小孔をあけ、その後ろに光電子増倍管を置いて、その出力と温度計の出力とを2ペンレコーダーで平行記録することである。

11.2 ビデオ撮像系の利用

これは某研究所で筆者が見学した例であるが、干渉像をビデオ系で受像器に表示し、受像管面に太陽電池を貼り付けて、その出力と温度とを平行記録する方法があった（図9）。

らない。

- d. 干渉面に対して直角の方向から光を投射し、また観察することが必要である。そうでないとやはり二つの光が瞳に入らない。

熱的な面からは、試料全体が様な温度分布を持ち、その温度が正しく確実に測れるような電気炉の設計と注意が必要である。実用上は熱電対を使い、熱接点を試料に近づけること、全体の温度変化を温度平衡が近似的に満足されるような速度に抑えること、が必要である。

二つの温度の間の熱膨張係数だけが必要ならば、二つの温度の時にそれぞれ定温保持し、その間の温度変化は早くする、という方法を使える場合があるだろう。

試料を真空・ガス雰囲気に入れて測ることも容易である。

7. 光学系の概要

干渉縞を観察するために古くから工夫された光学系を図5に示す。干渉部 I_1, I_2 にはほぼ平行な光束が入り出して、光を有効に利用できる。

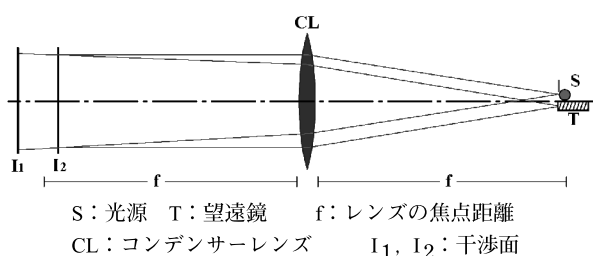
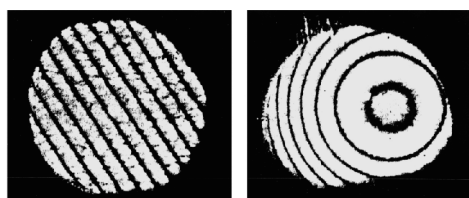


図5 光学系

光源Sと干渉縞観察用望遠鏡Tとは近づけて配置する。コンデンサーレンズCL（焦点距離f）を使い、レンズ干渉部、レンズ光源/望遠鏡の間の距離はコンデンサーレンズの焦点距離fに等しくしてある。

近年は光の利用効率を問題にする必要はなくなっている、たとえば後で示す図9のような簡略化されたもので良い場合もあるが、干渉像を見る必要があれば、この構造がベストだと思う。望遠鏡Tから見ると、干渉像は無限遠にできており、見やすい。



a) 二つの干渉面がともに平面の場合
b) 平面と凸球面とを組み合わせた場合

図6 干渉縞模様の例

机上の観察装置としては望遠鏡は横から水平に眺め、試料は垂直に置くのが使いやすいので、一個の直角プリズムで光路を垂直に曲げて差し支えない（図2）。

二枚の平面板を重ねたとき、平面と凸球面を重ねたときの干渉縞の例を図6に示す。図6b)が「ニュートン環」である。このときの光源はヘリウム・ネオンガスレーザー光を散光にしたものである。

8. 試料の調整

試料の形を、二枚の干渉板の間に挟んだときに干渉板が平行になるように、あらかじめ精密に調整しなければならない。この調整も干渉縞を観察して進める。

そのために工夫された調整器を図7に掲げる。

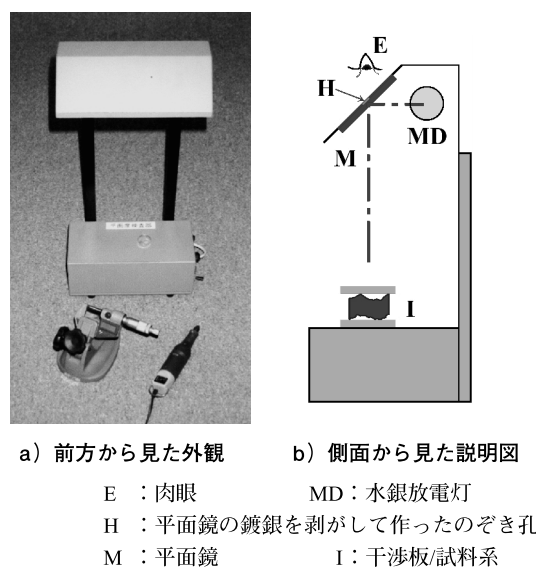


図7 試料調整器

平面鏡で放電灯の光を下に導き、干渉する干渉板/試料系へ送る。反射した戻り光を鏡の素通しにした小孔Hから観察する。干渉させるべき二面からの小孔の虚像が見えるので、この二つの像を合致させるように試料の足の高さを削り調節する。

調節が進むと干渉面に干渉縞が観察されるようになるので、これを頼りに微調整を続ける。十分平行になると干渉縞群は同心円環群に変わる（「ファブリーペローの干渉」）ので、この状態で測定には十分な平行度が得られている。

9. 干渉縞の移動の観察

現在は干渉縞の観察は自動化されているが、計算法の原理的なこと説明するために、肉眼で観察したことを想定する。

試料/干渉板系を電気炉中に入れ、光を当てて干渉縞を観察する。

干渉縞は装置を通して肉眼で観察できるが、このままでは目が疲れるから、実際には望遠鏡を使う。

熱膨張を測る時には、温度変化に伴う干渉縞の移動量を観測する必要がある。干渉面の一つに目印を刻み、縞系を移動する尺度、縞を尺度の目盛りとみなして、目印

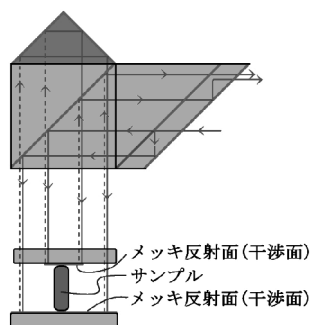


図16 二重光路型マイケルソン干涉膨脹計の
光路の説明図

14.3 各種のマイケルソン型干涉膨脹計

ブロックゲージ形の試料について測る装置の報告がいくつかある。これらは定盤も加熱する必要があると思われる、温度範囲が限定されるであろう。一部を図17に示すが、詳しい説明を省略する。

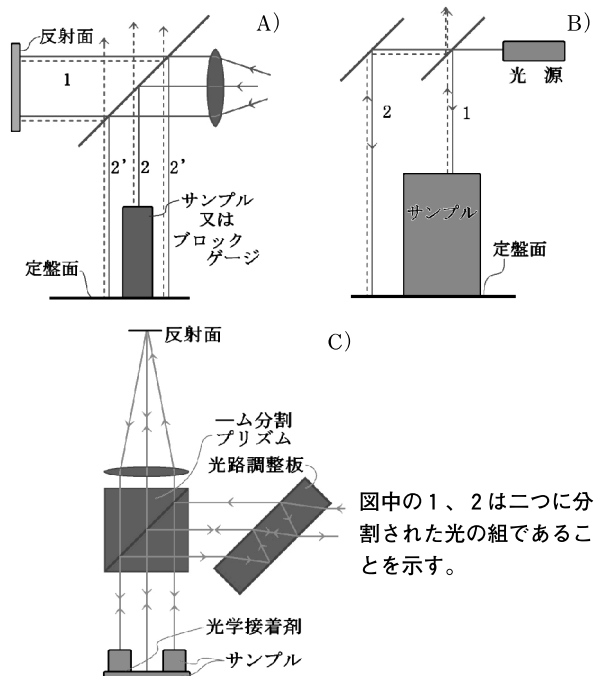


図17 A), B), C) 各種のマイケルソン型
干涉膨脹計の例

15. 結び

フィゾーの干涉膨脹計を、眼視に頼る時代から始めて、思いがけず最近の光学・コンピューター技術の発展に逢い、いろいろと工夫・改良するまでを経験してきた。

ガラス材料では「ゼロデュア R 結晶化ガラス」・「ULETM R 極低膨脹ガラス」などの、膨脹係数がほぼゼロの材料が開発され、直径 8m の大型天体望遠鏡用反射鏡に使われるようになった。材料をこれらをはじめとする用途に使うために、熱膨脹特性測定的重要性が認識され、JIS R3251-1990 が制定され、フィゾーの干涉計と 14.2 節に述べた「二重光路式マイケルソン形干涉計」とが測定に使えるものとして取り上げられた。

いままで干涉膨脹計を材料技術界向けに発表してきたが、今回は光学関係の方々に批判を頂く機会ができたのを嬉しいと感じている。

この系の開発には折原製作所折原芳男社長の30年にわたる助力を得た。またJIS制定の時期に当時の計量研究所の方々のご助言を得たことを記して謝意を表する。



千葉工業大学 附属研究所 非常勤教授
(自宅) 〒168-0072
東京都杉並区高井戸東3-14-11
Tel : 03-3329-3537 Fax : 03-3329-3890
E-mail : toruki@js7.so-net.ne.jp

略歴：昭和25年 東京大学理学部物理学科卒
東芝・同総合研究所・東芝硝子
(現・旭テクノ) を経て
平成元年 科学技術庁長官賞 (光弾性)
平成3年 現職
工学博士 (東京工業大学)

研究分野：ガラスの品質管理に関連する測定技術の開発。
光弾性と応力の測定、干涉膨脹計による熱膨脹の精密測定など。

最近の主な寄稿：

- 1994年 地史・考古・天文学へのガラス解析技術の適用「ニュー・セラミックス (現・マテリアル・インテグレーション) 誌」/連載
- 1996年 天文学へのガラス素子・材料の適用 同誌/連載
- 1998年 縄文土器の始めと終わり - 「世界最古のセラミックス」年代研究史から 同誌/連載
- 1999年 「ガラス」の語彙・古語と語源 同誌/連載
- 2000年 11月号 最近の炭素14年代測定法の適用 同誌
- 2001年 10月号 テクタイトとラテライト - アンコール・ワット遺跡 同誌
- 2002年 「玉碗記」 - その後と今 同誌/連載
- 2001年/2002年 ガラス工業に利用される光弾性技術 本誌/連載