

# 光干渉式熱膨張計(1)

Optical Interferometric Dilatometers.

岸井 貫 千葉工業大学附属研究所教授  
Toru Kishii

問合せ/キシイ トオル(自宅) 〒168 杉並区高井戸東3-14-11 ☎(03)3329-3537

## 1 結 言

熱膨張係数の絶対値が特に小さい材料(例: コーディエライト磁器, リン酸塩物を含む磁器類, ガラス状カーボンおよびカーボンファイバー, シリカガラス, バイコール<sup>®</sup>96%シリカガラス, ゼロデュア<sup>®</sup>結晶化ガラス, ULE<sup>®</sup>TM<sup>®</sup>TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>系ガラス, "ULE<sup>®</sup>TM"は極低膨張遠鏡反射鏡用材料の意味)の熱膨張特性を精密に測るには, 光干渉式膨張計が唯一の方法である。

光干渉式膨張計ではサンプルの伸びを光波長を基準として測るので, 熱膨張の基準にする材料は要らず, 伸び測定の誤差は読み取りによるものだけである。測定誤差を小さくするためには, サンプルの温度を正しく測ることだけを考えれば良い。

もう一つの利点は, サンプルと測定機構部とは光で結合するだけで良いから, サンプルを独立に炉の高温度域クライオスタット中に置くことである。干渉板以外の部品の耐熱性を考慮しなくてもよい。

その他にも, 小形のサンプルしか得られない場合, 示差膨張計の基準物質を測る場合, 異方性材料の長さ・幅・厚さ方向の特性をそれぞれ別に測る場合, 1,500℃くらいまでの高温域で測りたい場合などにも, 利点が多い。

低膨張ガラスを測るために JIS R 3251低膨張ガラスのレーザー干渉法に

よる線膨張率の測定方法(平成2年)にこの方式が採用された。また JIS C 2141電気絶縁用セラミックス材料でも近く採用される予定である。

光干渉式膨張計はニュートン環と同じ簡単な原理を使い, 加熱に伴う干渉模様の変化を肉眼で追い続けるものであった。測定には測定者の拘束や肉体的忍耐が不可欠であり, 自動記録化の試みは一般的実用化の域に達しなかった。

このような状況は最近では大きく変わり, オンラインで自動的に画像変化追跡・記録・計算を普通に実行できるようになった。この変化の要因は, レーザーの細いビーム光束と光の可干渉性の利用, ゼーマン効果・偏光現象・光ヘテロダイン効果の巧みな導入, 画像センサー=コンピュータ=画像認識ソフトの組み合わせの利用(図1), などである。

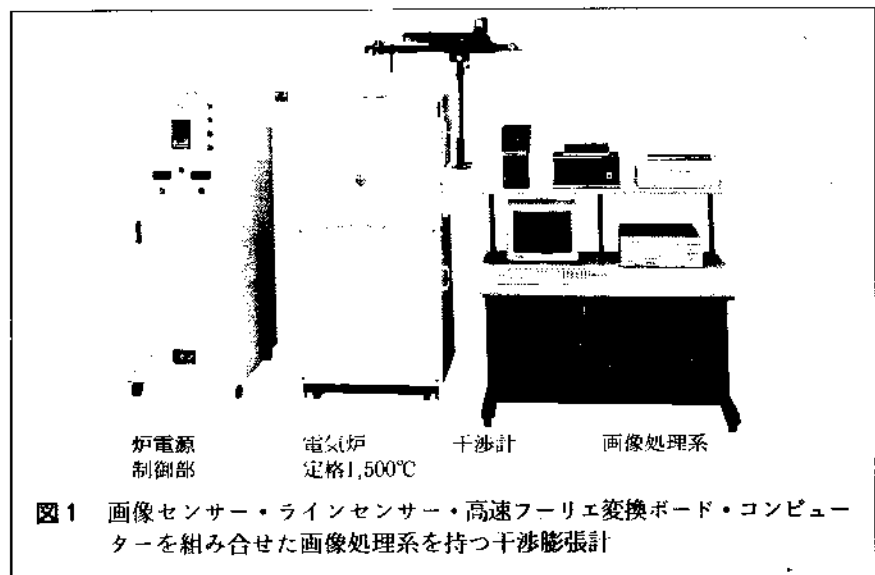


図1 画像センサー・ラインセンサー・高速フーリエ変換ボード・コンピュータを組み合わせた画像処理系を持つ干渉膨張計

本稿では著者が開発して来たフィゾー式干渉膨張計について詳しく述べた後に、他種のものについての総説を記す予定である。

## 2 フィゾーの干渉膨張計

この干渉計の考案は1860年代に遡る。フィゾーは干渉現象自体の研究をするとともに、干渉膨張計で多種類の材料の熱膨張特性を測定した。フィゾーの膨張計には「示差干渉膨張計」（後章で説明する）と呼ぶべきものと、基準物質を要しない形式のものが含まれた。後者について1930年代に米国の国立標準局（略称NBS）で装置と測定法が洗練され<sup>2)</sup>、同所で引き続き装置の改良と自動化の試みが続けられた<sup>3)</sup>。これら累代の装置は現在も同所に保管されている。またNBSが販売する熱膨張特性の標準サンプル（シリカガラス・人工サファイヤ・純銅・その他）は干渉膨張計で較正されている。

### 2.1 光学的特性

「フィゾーの干渉」はニュートン環や薄膜の干渉色と原理の上では同じである（図2）<sup>4)</sup>。しかし膨張計では

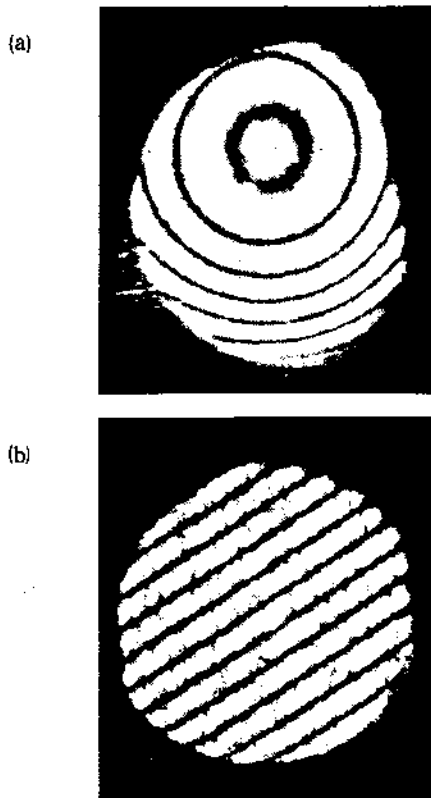


図2 レーザー干渉計で観察したニュートン環  
(a) 一つの面が凸面の場合  
(b) 二つの面が平面である場合

干渉面間の距離がミリメートルの程度であるため、干渉現象を観察する際にニュートン環と比べて次のような制限がある：

- 使用する光は単色光であることが必要、
- 干渉面間の傾角が小さいことが必要、
- 干渉面に対して垂直に近い角度で観察することが必要、
- スペクトル用ランプなどの在来型光源（異なる点から出た光の間では干渉現象を観察できない。）を使う時には、観察系に小さい絞りが必要、干渉面間距離が大きい程絞りは小さいことを要する、ガスレーザー光源のように干渉性の良いものではこの制限は緩くなる。

### 2.2 原理

光源内の一つの発光原子からある瞬間に発せられた光束内で、一つの光線は干渉面I1で反射されて経路A-B-B'、もう一つの光線は干渉面I2で反射されてA-C-B-C'と走り共に観察系に入る（図3）。

観察系の対物レンズL（肉眼では水晶体）と焦点面F P（肉眼では網膜）とを点Bにピン点を合わせて置くと、二つの光は焦点面上の一点Qで再び合致する。

二つの光の間での光路長（光の経路長さとの積の総和）の差が、光の波長の整数倍であるか半整数倍であるかにより、Q点で出会った二つの光は打消し合ったり強めあったりする。これはB点の位置によって決まる。肉眼ではI1面上に明暗の縞模様が見える（図4）。

光路長の差（以後「光路差」と記す）はB点での干渉

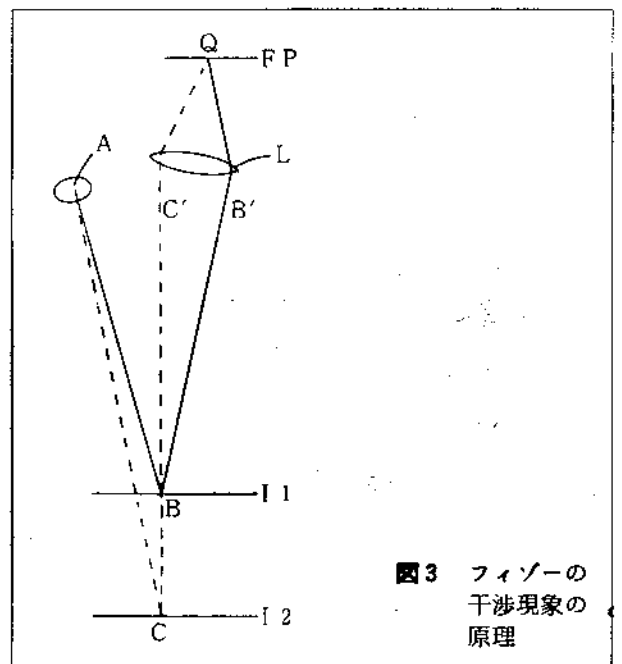


図3 フィゾーの干渉現象の原理

面間距離と光経路/干渉面間の傾角度とで決まる。後者の効果で縞模様は同心円状に現れる。円群の中心は干渉面間の平行度が不十分なら遠方に（図4(a)）、平行度が良いと眼下に（図4(b)）現われる。

フィゾーの干渉縞は、原理から解るように、干渉面にビントを合わせた観察系で見ることができる。すなわち干渉面に「局在」している。この点が、他種のたとえば「ファブリ・ペローの干渉（後章で説明する）」では縞が無限遠にあるのと違っている。

### 2.3 膨張計への適用

サンプルをスペーサーとして二枚の干渉板を保持すると、サンプルの熱膨張に伴って干渉面間距離が変化し、干渉縞模様が変わる。従って逆に干渉縞模様の変化からサンプルの熱膨張を知ることができる。

膨張計として使う場合に、縞模様が干渉面に局在し光路差が光経路の傾角によっても変わるということは都合が悪いので、実際には次のような巧みな工夫が施されて

いる（図5）。

焦点距離  $f$  のコリメーションレンズ CL を使う。  $f$  はレンズ CL が加熱炉の熱を受けないように選ばれる。また干渉面 I 1, I 2 と CL との距離、CL と光源開口 A との距離の双方を  $f$  に等しくする。

CL は小さい光源開口 A からの光を平行光線束として干渉面に投射する役目と、干渉面と干渉縞模様の虚像を

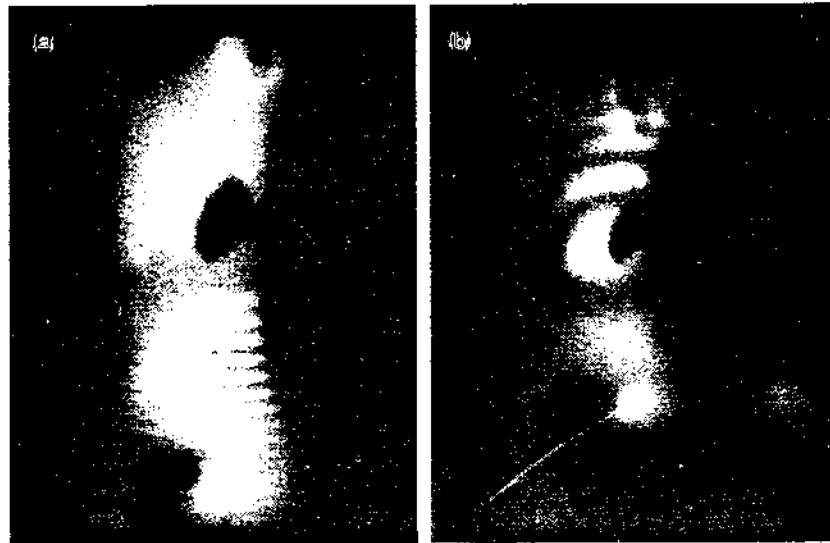


図4 図3の構成で見られる干渉縞模様（光源に水銀灯を使用した。）  
 (a) 二面の平行度が不十分な場合  
 (b) 二面が平行に近い場合

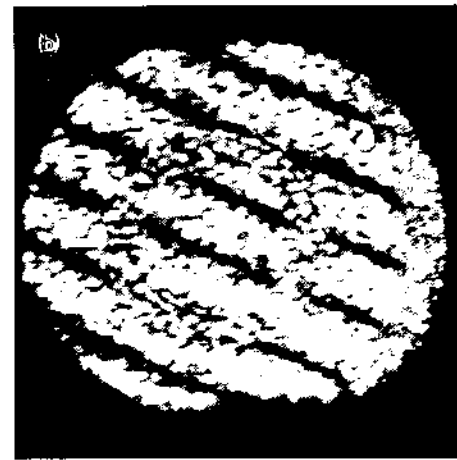
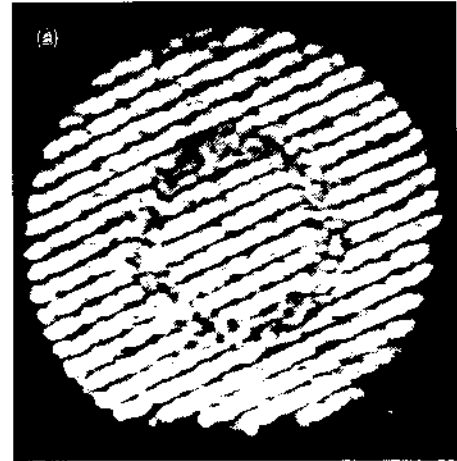


図6 レーザー干渉計で観察した干渉縞模様  
 中央の円形はサンプルの像である。サンプルの長さ約10mm。(a)より(b)の方が干渉面間の平行度が良い。

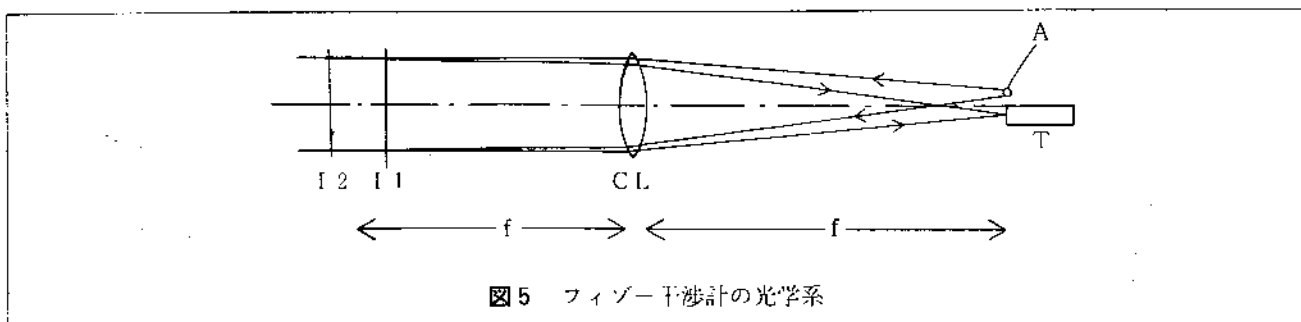


図5 フィゾー干渉計の光学系

無限遠に作る役目とを同時に果たしているので、無限遠にピントを合わせた望遠鏡で縞模様が見える（図6）。この状態では、光の投射角度が干渉面に垂直に近く（たとえば1/150ラジアン以内）で、干渉縞模様形成の条件に干渉面間距離だけが入るので、熱膨張計として大変好都合である。

このように設計した干渉計で観察すると、干渉面間距離が光の波長の1/2（半波長）の整数倍である部分が暗い条として見える。干渉面間のスペーサーであるサンプルが温度変化に伴って長さを変えると、それに伴って暗条も移動する。

#### 2.4 サンプルの準備

フィゾーの干渉膨張計ではサンプルは干渉面間のスペーサーの役目をしている。従ってサンプルが透光性である必要もサンプル面を精密に平行研磨する必要もない。上下二ヶ所での三点接触で干渉面を支えることと二枚の干渉面がたがいに十分平行であることが必要である。

三点接触するための形はいろいろある（図7）し、サンプル入手の条件に応じて工夫する余地がある。最終的に熱容量が小さいような形に仕上げると、温度測定の精度が良くなる。

干渉面間の平行度を良くするには三点の高さを調節する必要がある。このためには以下に記すような工夫がある。干渉板は上・下2枚を区別する（図8）。下方干渉板

は一方の面をすりガラス状にする。上方干渉板は僅かの傾斜で楔形に作る。

スペクトル用水銀灯を組み込んだ平行度調整器を作る（図9）。水銀灯の光は鏡で反射されて下方へ向うが、鏡のメッキを3mmφくらいの大きさに剥がして透明な覗き孔にする。

鏡の下に下方干渉板を置きすりガラス面を下にする（図9(a)）。覗き孔から見ると光が研磨された干渉面から反射されて明るいが、その中に覗き孔の虚像が1個だけ暗く見える。

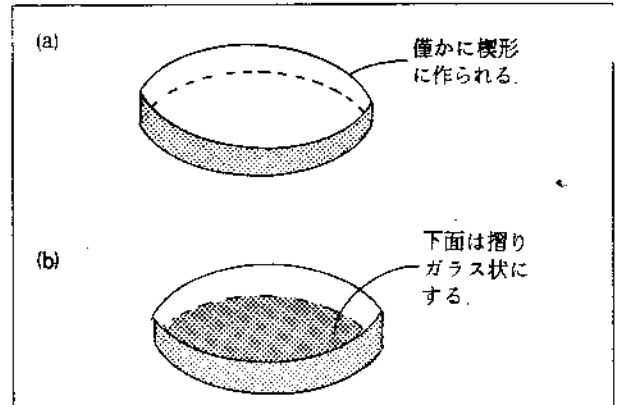


図8 干渉板の形

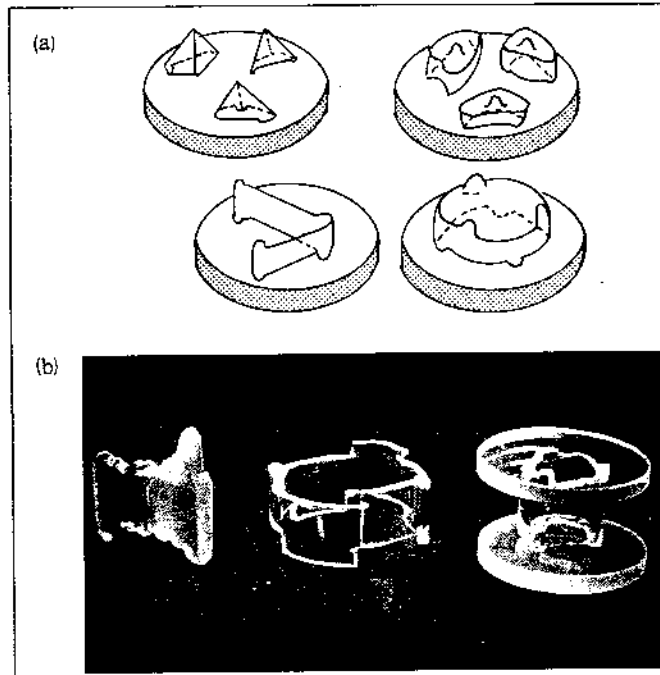


図7 サンプルの形の例

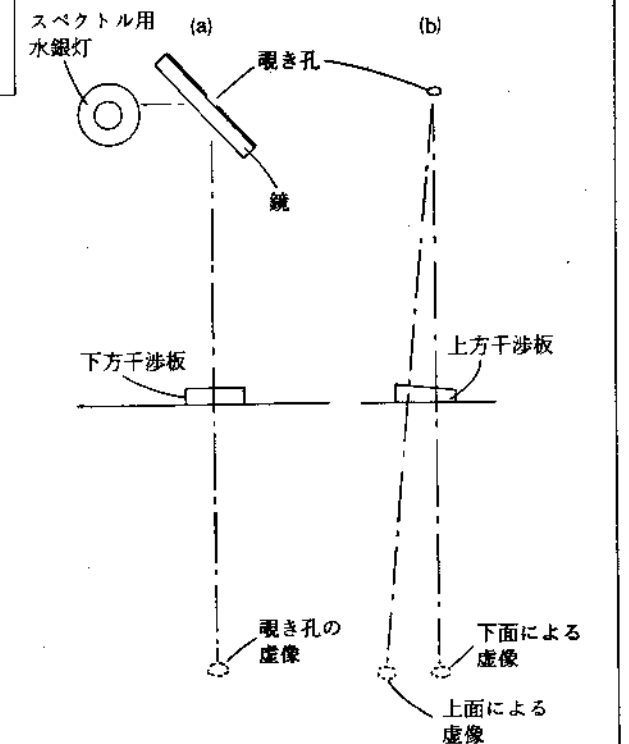


図9 サンプル調整手順の説明図（その一）

次に上方干渉板を入れ換えて眺める。反射面が二つあるため、覗き孔の虚像が二つ見える(図9(b))。このうち、板の厚い方向にあるものは上面からの反射による像で、干渉には関係しないからこれ以後は無視する。

下方干渉板=サンプル=上方干渉板の順に積み重ねる(図10(a))。普通はサンプルを挟む二面は平行でないで、下方干渉板の上面・上方干渉板の下面・上方干渉板の上面からの反射で三つの虚像が見える。最後のものは無視し、前二つの相互位置関係を観察する(図10(b))。

そうすると上方干渉板の下面による虚像のある方が干渉面間距離の広がる方向であり、サンプルの足が最も高い方向に近いと判断できる。この方向に最も近い足を摺り減らすという作業を繰り返すと、やがて二つの虚像が近づき合致する(図10(c))。

このようにすると間隔の狭い干渉縞模様が見れる(図4(a))。これらは同心円群の一部のようであり、その中心のある方が干渉面間距離の広がる方向だと判断できる。その方向に近いサンプルの足を僅かずつ摺り減らすという作業を繰り返すと、孔の虚像と同心円群の中心とが近づく(図4(b))。

これで測定のための十分な平行度が得られている。サンプルと干渉板を積み重ねて干渉計で観察すると平行な暗条からできた干渉縞模様が見える(図6)。平行度が

良いと暗条の間隔が広い。

## 2.5 干渉縞模様と「次数」

干渉縞模様の中の暗条は、干渉面間距離が半波長の整数倍である部分を示している。この整数を暗条の次数と呼ぶことにする。これを拡張して他の部分にも次数を定義できる。従って暗条以外の部分の次数は小数点以下の部分を含む数であり、整数ではない。

次数の絶対値を決める方法はあるけれども<sup>2)</sup>、熱膨張測定のためにはその必要はなく、相対的な変化だけを知れば良い。その前提として次数が増えて行く方向を知る必要がある。これには簡単な方法がある。

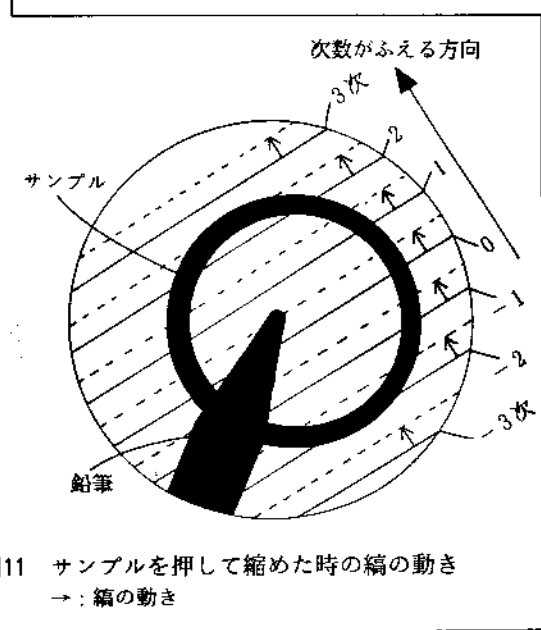
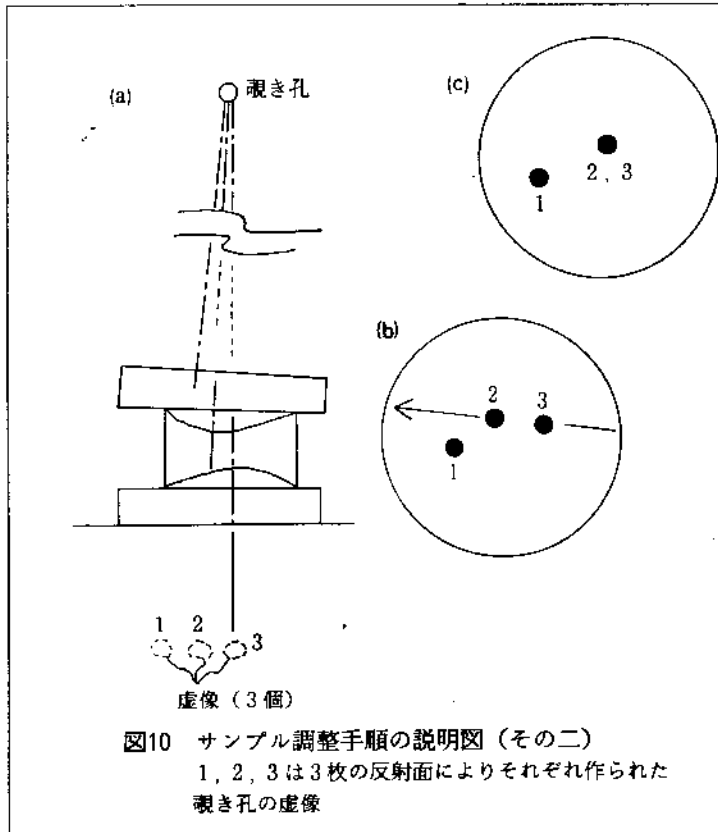
干渉計内に干渉縞模様を現わして置く(図11)。鉛筆の先などで上方干渉板を押すと、サンプルが弾性的に押し縮められ、干渉縞模様が平行移動する。押した時に模様は移動する方向が、次数が増えて行く方向である<sup>2)</sup>。

次に視野に現れている一つの暗条の次数を仮に0と決めると、それから順々に1, 2, 3, ……、また反対の方向に、-1, -2, ……と次数を割り当てることができる(図11)。

干渉面の一ヶ所に目印を刻んで置いたとする。干渉縞模様の中での目印の位置に対応する次数は、少数点以下の部分だけは、目印を挟む二つの暗条の位置と見比べて0.1ぐらいの精度で決めることができる。

## 2.6 サンプルの熱膨張と干渉縞模様の移動

簡単のためにサンプルの熱膨張係数は正、サンプルと干渉板は真空中にあって光の波長は一



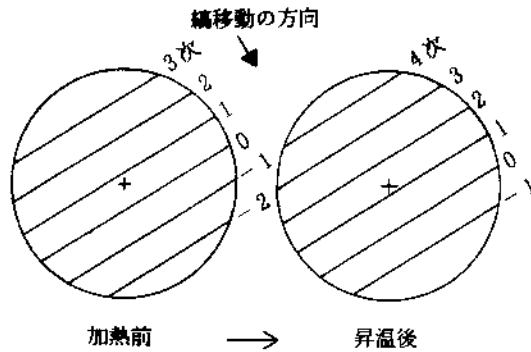


図12 加熱時の縞の動き：サンプルの熱膨張が正の場合

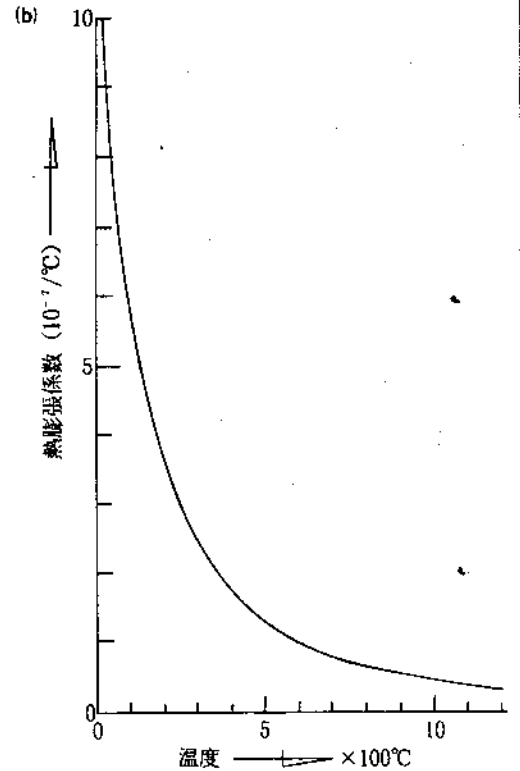
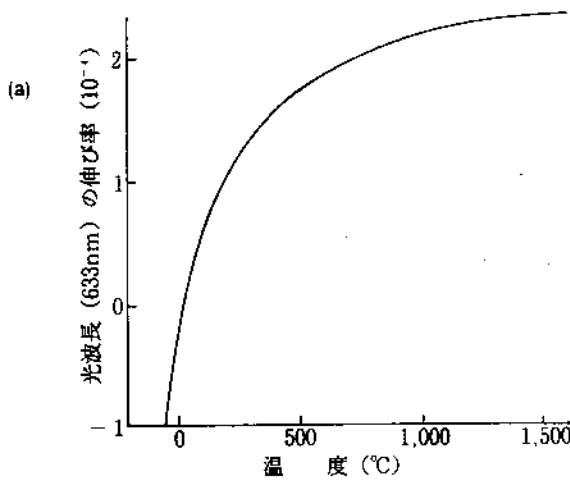


図13 (a) 光波長の伸び率  
(b) 光波長の熱膨張係数  
光波長=633nmの場合

定とする。

温度を上げて行くと目印の位置に対応する次数は増して行くように、すなわち模様は縞次数の減る方向へ平行移動する(図12)。目印の次数の変化に半波長を乗ずると加熱にともなうサンプルの長さ変化が得られる。また冷却により目印の次数は減る。

サンプルの熱膨張係数が負ならば、目印の次数は加熱により減り冷却で増して行く。

サンプルと干渉板とが空気やガス雰囲気の中にあると、加熱に伴って光の波長も「膨張」する。加熱に伴うサンプルの膨張が光の波長の膨張より大きければ目印の次数は増し、等しければ次数が変わらず、それ以外の場合には加熱に伴ない目印の次数が減る。

サンプルの加熱あるいは冷却あるいはその他の熱サイクルの間、干渉縞模様の変化を望遠鏡の視野内で肉眼で追って、温度-目印の次数関係を記録して置き、これを整理・計算して熱膨張特性を求める。現在では肉眼によらずに温度-目印の次数関係を自動的に得る技術が確立されている(後述)。

光の波長の熱膨張は雰囲気ガスの屈折率を $n$ として、 $(n-1)$ がガスの密度に比例、ガスはボイル・シャ-

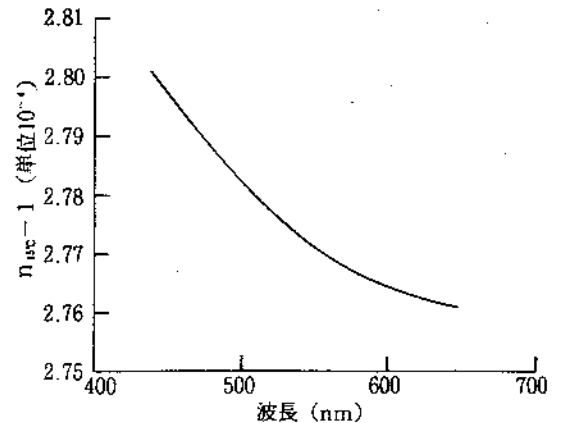


図14 波長と常温・常圧の空気の $n-1$ との関係

ルの法則に従う、という仮定を置いて計算することができる。一気圧の空気の場合のヘリウム・ネオンガスレーザー光の「熱膨張」を図13に掲げる。図14は波長と空気の $n-1$ との関係である。

## 2.7 熱膨張特性の計算

標準温度(たとえば15°C)、温度 $T_1$ 、 $T_2$ での値をそれぞれ添字0、1、2で表わす。光の波長を $\lambda$ 、目印の次数の絶対値を $N$ 、サンプルの長さを $L$ 、とする。 $N$ の絶

対値は求められていないが、 $N_2 - N_1$ は観察から知れている。光の波長は $\lambda_1 = \lambda_0 \cdot (1 + \Delta_1)$ 、 $\lambda_2 = \lambda_0 \cdot (1 + \Delta_2)$ と表現される。 $\Delta$ は図12(a)から求められる。次の関係がある：

$$L_1 = \lambda_1 \cdot N_1 / 2, \quad L_2 = \lambda_2 \cdot N_2 / 2$$

$$L_2 - L_1 = (\lambda_0 / 2) \cdot (N_2 - N_1) + (\lambda_0 / 2) \cdot N_1 \cdot (\Delta_2 - \Delta_1) + (\lambda_0 / 2) \cdot (N_2 - N_1) \cdot \Delta_2 \dots \dots (\text{伸び})$$

伸びは半波長に $(N_2 - N_1)$ を掛けて第1次近似値が得られ、これに光波長変化の効果を補正して最終の値となる。伸びの式の右辺第3項は第1, 2項に比べて無視できる。単位長さ当りの伸び(伸び率)は、必要な近似を入れて

$$(L_2 - L_1) / L_0 \approx (\lambda_0 / 2) \cdot (N_2 - N_1) / L_0 + (\Delta_2 - \Delta_1)$$

この式は、伸び率の第1次近似値に「光波長の伸び率」を加えて最終の伸び率が得られる、ということを示す。

真空中で測定すると $n = 1$ 、 $n - 1 = 0$ 、 $\Delta_2 = \Delta_1 = 0$ である。

伸び率を温度差で割ったものが平均膨張係数、温度-伸び率曲線の微分係数が膨張係数になる(図15)。無機・金属材料の場合、サンプル長さをcm単位、伸びを $\mu\text{m}$ 単

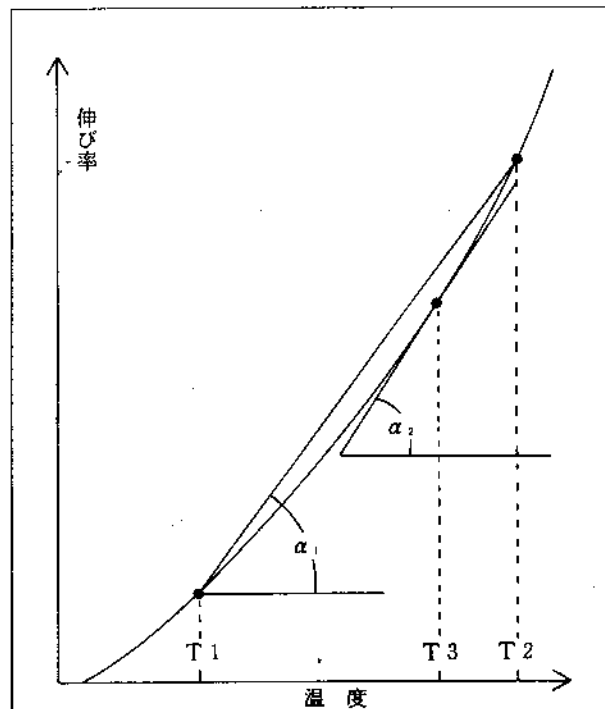


図15 膨張曲線と熱膨張係数

$\tan \alpha_1$ : 温度 $T_1$ ,  $T_2$ 間の平均熱膨張係数と関連する。  
 $\tan \alpha_2$ : 温度 $T_3$ での熱膨張係数と関連する。

位で読んで、伸び率を $\mu\text{m}/\text{cm}$ または $10^{-4}$ 、膨張係数を $10^{-7}/^\circ\text{C}$ で表すと実用上便利である。雰囲気常圧の空気である場合の $\Delta$ は図13(a)に示した。

## 2.8 光の可干渉性と単色性の問題

先に2.2節で干渉が起きる幾何光学的条件を記したが、厳密にはさらに波動光学的条件も関連する。これは長いサンプルを測る時に問題になる。

第一は単色性である。サンプル長さ1cmの時は暗条の数 $10^5$ 近くになる。光の波長が $10^{-6}$ の精度で確定されている必要があるのは当然として、波長幅も同じ程度に小さくないと縞模様不明瞭になる。

通常のスเปクトル用放電管の次の線は問題がない：ヘリウムの黄(波長588nm)、カドミウムの赤(644nm)・緑(509nm)・ブルー(480nm)、水銀の緑(546nm)・ブルー(436nm)。

ナトリウムの黄は波長差0.6nmの二本の線から成るため、高圧および超高圧水銀灯は線幅が広いので、適さない。スเปクトル線の波長幅には次の要因が関連する：

- 発光する原子の熱運動に起因するドップラー効果、
- 原子核の磁気モーメントによるスเปクトルの超微細構造 および
- 複数の同位元素が発する光の間の波長差。

第二は光の「可干渉性」である。図2のQ点で合する光の間の光路差が大きくなると、第一の条件で問題がなくとも干渉現象が観察できなくなる。

メートルを光波で定義していた時代にこれらの点は詳しく検討され、それに使われる光源もCd灯→冷却されたHg<sup>198</sup>灯→冷却されたKr<sup>86</sup>灯と改良された。

ヘリウム・ネオンガスレーザーも、光の波長幅は放電灯と同程度にまで狭がり得る。しかしレーザーでは発振モードの単一化と波長安定化をすることができ、簡単な装置で $10^{-7}$ 、最高で $10^{-10}$ の安定度が得られる。また干渉性は放電灯より遙かに良い。測定目的に応じて選定する必要がある。

筆者の経験では、安定化しないHe-Neレーザーで長さ10cmのサンプルで干渉を観察できた。

## 2.9 低温度での測定の問題

低温度で測定する場合、三つの留意すべき点がある：

- A. 炉窓への水蒸気の凝縮・着霜、
- B. 干渉面への水蒸気の凝縮・着霜、
- C.  $\Delta$ の算定に用いた仮定の正しさ。

温度域が液体窒素温度に近くなく、かつ温度を下げながら測るならばA以外問題がないし、Aの対策も比較的易しい。その他の場合には雰囲気真空にする必要があるかも知れないが、それでも温度を下げながら測定するならば困難はない。温度を下げてから昇温して測る時には、真空室内に加熱・乾燥しておいたモレキュラー・シーブを入れ、これをサンプル温度より低く保つのが干渉板への着霜防止に有効である。

【参考文献】

- 1) L. Fizeau, *Ann. Phys.*, **128**, 564 (1866); *Ann. chim. phys.*, **2**, 143 (1864); 同 **7**, 335 (1866); C. Pulfrich, *Z. Instr. Kunde*, **18**, 261 (1898).
- 2) G. E. Merritt, *J. Res. Nat'l Bur. Standard* **10**, 59 (1933); J. B. Saunders 同, **23**, 179 (1939).
- 3) J. B. Saunders, *J. Res. NBS*, **35**, 157 (1945), N. Work, 同, **47**, 80 (1951).
- 4) 木内政蔵, "光" 岩波全書.
- 5) 岸井, 東芝レビュー, **13**, 59 (1958).

「ケイ素系高分子材料」を90年代の次世代研究テーマに選定

通産省と科学技術庁の1991年度の新素材関連予算のテーマは次のようである。

通産省

- (1) 次世代産業基盤技術研究
  - (a) 光反応材料 (高密度情報記録に使用する材料の開発); (b) 非線形光電子材料 (光情報システム実現をめざす); (c) ケイ素系高分子材料 (新規); フェインセラミックス (構造材料用の開発); (d) 超伝導材 (高温超伝導材料の開発)。
- (2) 大型工業技術研究 (大プロ)
  - (a) 超先端加工システム (難削材, 平滑面材加工), (b) 先進機能創出加工。

(3) ムーンライト計画

(a) セラミックガスタービン, (b) 超伝導電力応力機器の開発。

(4) 新伝導電力貯蔵システム要素技術開発調査 (新規)

科学技術庁

- (1) 金属材料技術研究所/インテリジェント材料; 極高真空ナノレベル計測器; 高性能光電素子用材料, ほか。
- (2) 無機材質研究所/インテリジェント材料; 構造材甲即時制御合成装置; 放射光軟X線用分光材料 (YB<sub>66</sub>) の高

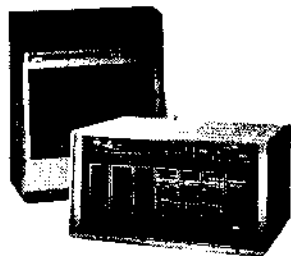
品位化, ほか。

(3) 理化学研究所/メゾフェイズ化学研究 (原子数千個集合レベルで制御)

「ケイ素系高分子材料」の開発では1991年度から10年をかけて耐熱性や電気的特性に優れた材料, 医療用新材料を開発する。ケイ素高分子材料は, プラスチック等を構成している炭素系高分子材料の骨格であるCの一部又は全部をSiに置換えたもの。開発の対象として, 超高密度電流送電材料, 人工臓器に適した医療用材料などが挙げられている。

PRODUCTS NEWS

広帯域計測用レコーダ  
ストアホース



# 305

- <特徴> ▶ 7, 14, 28, 32および42チャンネルのリニア・トラック・ヘッド。  
 ▶ 2 MHz (標準) および4 MHz (オプション) の周波数帯域。  
 ▶ ダイレクト, FM, HDDRおよびボイス・チャンネル対応。  
 ▶ すべて同一筐体に組み込んであり, 携帯が可能。  
 ▶ CRT画面での柔軟なマン・マシン・インターフェース。

コーンズ・アンド・カンパニー・リミテッド

▶ IRIG対応のキャリブレーション/イコライゼーションの完全自動化。

<問合せ>

〒103 東京都中央区日本橋2-3-10 (丸善ビル8階)  
 TEL 03-3272-5771 (大代表)  
 〒550 大阪市西区西本町1-13-40 (マードンハイス)  
 TEL 06-532-1012 (代表)