

熱応力の光弾性実験法に関する研究

正 員 森 忠 次*

CONTRIBUTIONS ON PHOTOTHERMOELASTICITY

By Chuji Mori, C.E. Member

Synopsis : Photothermoelastic experiments have been usually conducted at a temperature below room temperature. In this paper, accuracy of the photothermoelastic experiment, which was carried out at the temperature range between room temperature and the transition region, was studied experimentally, and the good results were obtained. In another experiment, the frozen method of thermal stresses produced at high temperatures above the transition region was studied. The results show that the frozen fringe order may be approximately proportional to the difference between theoretical principal stresses.

These two methods are very useful for thermal stress experiments of scale models.

要 旨 熱応力の光弾性実験を行う場合には通常室温以下において実験が行われているが、室温から転移領域までの温度範囲において実験を行う場合の精度を実験的に研究し、実用上十分満足すべき結果の得られることが確かめられた。また転移領域以上の高温における熱応力を凍結する方法について検討を加え、凍結縞次数と計算上の応力との間に近似的には比例関係が成立すると考えられることを示した。

1. 緒 言

構造物に発生する熱応力を実験的に研究するには、その装置並びに方法に困難な点が多い。電気抵抗線ヒズミ計を用いるにしても、かなり大規模な加熱あるいは冷却装置を使用し、大きい模型または実物によつて実験する必要がある。光弾性実験による熱応力問題の研究としては、焼嵌め、焼入れ¹⁾、異種の物体の接着²⁾、材料の硬化過程の利用³⁾などによる応力について古くから研究が行われてきた。最近では Gerard および Gilbert によつて、非正常温度場における実験的研究が行われた⁴⁾。多くの実験では、光弾性材料が室温より低い温度においては性質が安定して実験に好都合であることから、室温から -40°C 程度におよぶ温度範囲において実験を行っている。また川本氏は応力のない物体とすでに応力を凍結されている物体を接着し、これを焼鈍する過程における相互拘束によつて生ずる応力の実験を行った⁵⁾。しかしながら一般的には実験方法が面倒であるので広く実用に供されていない。

著者は凍結実験法が普及して、現在ではどこの光弾性実験室においても凍結実験用の電気炉があることに着目し、新しい装置を使用せず熱応力の光弾性実験を行う方法として、 70°C 付近から室温までの温度領域において実験するための基本的な問題について検討を加えた。その結果上記の温度領域では材料の性質が温度によつていくぶん大きい変動を示すので原理上は好ましくないが、実用上十分な精度が得られることが明らかになった。この実験方法は簡便であるので応用範囲はきわめて広い。なお、熱応力によつて生ずる光弾性縞を凍結すれば、この縞次数から熱応力の解析が行える可能性のあることを実験的に明らかにした。この方法によれば特殊な装置を用いることなく、3次元熱応力問題の研究が可能である。

2. 材料の性質

光弾性材料としてはわが国で広く利用されている Epoxy 樹脂である Araldite B を選んだ。この材料は感度、安定性、加工性などの点から考えて、熱応力実験に対してすぐれた材料の1つである⁶⁾。以下にこの材料の性質について、必要な範囲内で測定結果を示す。なお接着のために Araldite D を、等傾線を求めるために Plexiglass を用いたので、これらの材料の性質も同時に示すことにする。

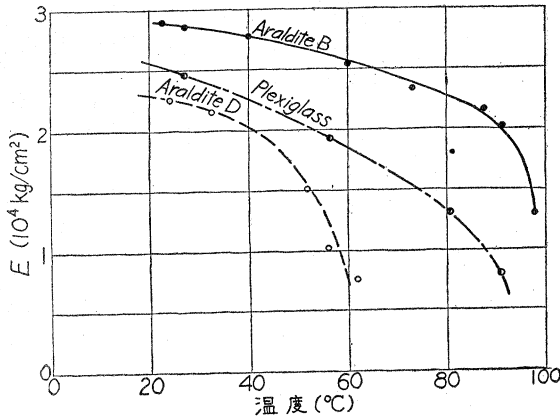
凍結実験用炉中に供試体を置くときには、供試体の温度を正確に知るために、熱電対を埋めた温度測定用試験片を供試体の近くに配置し、この熱電対の読みを供試体の温度とした。

(a) 弾性係数 弾性係数は Martens の光学的ヒズミ計を用い引張試験により測定し、比較のために単純バリ

* 京都大学助教授，工学研究所

の曲げによるタワミ量からも求めた。曲げ試験による方が弾性係数は小さい値となった。引張試験により得られた弾性係数 E の値を図-1に示す。いずれの材料においても室温以下においては温度による弾性係数の変動がわずかであるが、室温よりも高い場合には温度とともに弾性係数の減少が顕著である。

図-1 弾性係数と温度との関係 (引張試験による)



よる f の変動はわずかであるから、温度制御も行っていない室内に材料を露出して実験を行う場合でも、わずかな温度変化であればその都度 f の値を変えて実験値を解析する必要はない。

(c) 熱膨張係数 材料の熱膨張係数を求めるためには石英の熱膨張係数と比較した。そのためには、第1の方法として、図-3に示すような装置により各種材料の温度と伸びの関係を求めた。第2の方法としては、凍結実験用炉中に供試体を入れ、これに Martens 光学的ヒズミ計をとりつけて供試体と Martens ヒズミ計との間の熱膨張係数の差を測定した。このときに使用した Martens ヒズミ計そのものの熱膨張係数は石英棒に Martens ヒズミ計をとりつけて求めた。これら2種類の方法によってほとんど同一の結果を得ることができた。Araldite B の熱膨張係数は表-1に示す通りである。Araldite B の熱膨張係数は 110°C

表-1 Araldite B の熱膨張係数

温度範囲 ($^{\circ}\text{C}$)	16 ~ 90	120 ~ 150
熱膨張係数 ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	65.1×10^{-6}	167×10^{-6}

付近に存在する転移領域の上下においていちじるしい相違のあることが明らかになった。いずれの温度領域においても熱膨張係数は温度に関せず一定と考えてよい。

以上に示した性質は同一種類のものでも幾分差の生ずることがある。同一条件で供試体を製作しても、原材料が同じ包装に属さない場合とか長期間保存しておいたものについては、あらためて性質を検定しなければならないことは通常の光弾性実験における注意と同様である。以下に示す結果は長期間にわたる実験値をまとめたものであるから、材料の性質は必ずしも上述の数値とは等しくない。

3. 転移領域以下から室温の範囲で行う熱応力実験法

Araldite B にかぎらず現在使用されている光弾性材料は、いずれも前節に示したような傾向に従って温度とともに性質が変化する。室温以下においてはこの変動がわずかであるので、これまでの実験では好んで室温以下の領域において熱応力の実験が行われてきた。このような低い温度領域における実験では、温度によつて材料の性質が変化することを考慮に入れなくても実験結果に生ずる誤差はきわめて小さい。そこで室温より高い温度領

域においても室温以下においては温度による弾性係数の変動がわずかであるが、室温よりも高い場合には温度とともに弾性係数の減少が顕著である。とくに Araldite D においては 50°C 付近から急激な弾性係数の減少がみられる。またこれらの材料は温度が高くなるとクリープがいちじるしくなる。Araldite D においては室温程度においてもクリープが認められる。Poisson 比の大きさは測定しなかつた。

(b) Material fringe value material fringe value f は曲げ試験によつて決定し、参考のために引張試験も行つた。図-2は f と温度との関係を示したものである。 f の値は室温以下では非常に安定しているのみならず、室温近くでは温度に

図-2 Araldite B の Material fringe value と温度との関係 (曲げ試験による)

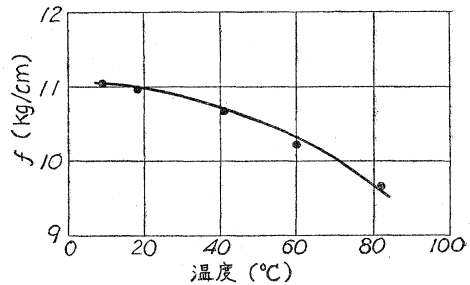
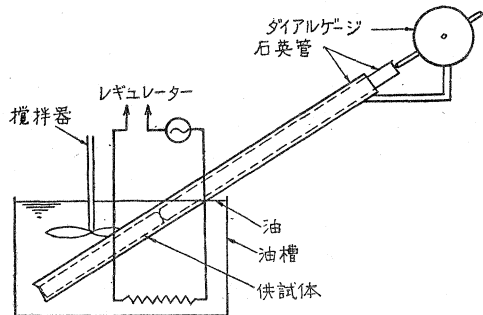


図-3 熱膨張係数の1測定法



域（転移領域より幾分低い温度までに限定する）において実験する場合について、応力を発生繰回数との間の関係について考察を加えることにする。

転移領域より低い温度においては、材料の熱膨張係数は一定と考えてよく、簡単のために機械的ならびに光学的クリープが生じないものと仮定する。このときに両端が固定された細長い棒が、温度 T において dT なる温度変化をうけたときに生ずる軸応力は

$$d\sigma = \alpha E(T) dT \dots \dots \dots (1)$$

によつて与えられる。したがつて T_1 より T_2 まで温度変化を生じたときに発生する軸応力はつぎのようになる。

$$\sigma = \alpha \int_{T_1}^{T_2} E(T) dT \dots \dots \dots (2)$$

また f も温度とともに変化するため、温度 T において $d\sigma$ なる応力変化を生じたときに、単位厚さ当りに生ずる繰回数の変化 dN_0 は

$$dN_0 = \frac{d\sigma}{f(T)} = \alpha \frac{E(T)}{f(T)} dT \dots \dots \dots (3)$$

となる。したがつて T_1 から T_2 まで温度差をうけたときに、単位厚さについて現われる繰回数は次式によつて示されることになる。

$$N_0 = \alpha \int_{T_1}^{T_2} \frac{E(T)}{f(T)} dT \dots \dots \dots (4)$$

一方 E, f が温度にかかわらず一定であると仮定すると、発生繰回数 N_0' は次式によつて求められる。

$$N_0' = \alpha E(T_1 - T_2) / f \dots \dots \dots (5)$$

そこで 図-1 および 2 を参照して、 E および f の値はつぎのような 2 次曲線によつて表わすことにする。

$$E(T) = -1.20 T^2 + 14.0 T + 29,200, \text{ (kg/cm}^2\text{)} \dots \dots \dots (6)$$

$$f(T) = -0.0002 T^2 - 0.0010 T + 11.08, \text{ (kg/cm)} \dots \dots \dots (7)$$

ここに T は $^{\circ}\text{C}$ による温度を表わすものである。これらの値を (4) 式に代入し、(5) 式においては E および f の値として 20°C の値を用いて、 $T_1 = 70^{\circ}\text{C}$ 、 $T_2 = 20^{\circ}\text{C}$ なるときの N_0'/N_0 を計算してみると、

$$N_0'/N_0 = 1.009 \dots \dots \dots (8)$$

となつて、 N_0' と N_0 との差はきわめてわずかである。このように、 70°C 付近より室温まで下げた実験において、実用上は E および f の値は一定であると考え、室温におけるこれらの値を用いて発生繰回数を計算できることがわかる。したがつてこのような温度領域における実験においては、単位厚さ当りに生じた繰回数に室温で測定した f を乗じて得られる応力は、 E が一定値すなわち室温における値（もちろん α は一定と考えている）であるような物体の熱応力と考えてよい。

N_0 と N_0' との値がほとんど等しいことは、室温よりも温度が上昇しても E, f とともに同じような傾向で減少するので、(4) 式における E/f が温度によつて大差のないことより容易に想像される。 E/f が温度にかかわらず一定値を示すような材料なれば実験に最も都合なわけである。しかしながら材料が力学的あるいは光学的なクリープを生ずる場合には、(4) 式のような簡単な関係が得られず、発生繰回数は必然的に減ずることになる。このようなクリープは温度が室温より高いときにはかなり顕著であるから、以上のような論議のみでは簡単に実用に供されるとはいえない。拘束された物体を高温から低温まで冷却した場合の熱応力の発生過程を考えると、高温においては発生応力が小さいのでクリープが激しくてもこれによつて応力並びに繰回数の減ずる量は、室温まで温度が下つたときに生ずる値に比べて比較的小さいのではないかと考えられる。したがつて実際に (8) 式のように N_0'/N_0 が 1 に近いのか、またクリープの影響が無視できる程度かどうかを実験的に検討することにした。

4. 2 次元実験

両端を鋼材に固定した細長い棒について実験を行い、その結果得られた単位厚さ当りの繰回数 N_0 と計算によつて求めた N_0' との値を比較した。両端を固定するには機械的に締結することも考えられるが、各種の実験を行う場合に接着することができれば便利であることを考え、接着方法についても検討する目的で Araldite B と鋼材とを接着することにした。通常の接着材は材質が非常に軟かくクリープも大きいので好ましくない。ここではやはり Epoxy 樹脂を用いることにし、Araldite D と 121 の両者の性質を調査したがいずれの材料でもかなり大きいクリープを示す。たとえば Araldite D を 125°C で 15 時間硬化させたもののクリープ（クリープヒズミ/弾性ヒズミ）は 表-2 に示す通りである。光学的クリープは比較的小さい。熱膨張係数を示すと、Araldite D では $96.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、Araldite 121 では $87.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であつた。実験結果によればこのどちらを用いてもほ

表-2 Araldite D のクリープ (温度 18°C)

時 間 (min)	5	15	30	60	120	180	240	1290
ク リ ー プ (%)	7	12	17	20	27	29	37	48

とんど同様な縮次数が得られたので、Araldite D を用いて接着することにした。

実験には 図-4 に示す寸法のものを用い、接着温度を 70~40°C とし、6~15 時間経過して Araldite D が硬化した後に 25°C まで冷却し、棒に発生した縮次数を測定した。その結果は表-3 に示す通りである。ここに K_{α} は温度差 1°C に対して厚さ 1 cm 当りに生ずる縮次数、すなわち

$$K_{\alpha} = N_0 / (T_1 - T_2)$$

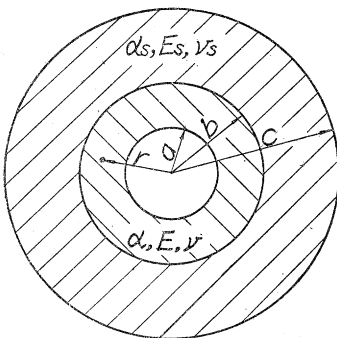
であつて、熱応力実験に関する適正係数⁷⁾である。換言すれば、熱応力の実験に関する感度を表わす数値である。一方この材料はクリープを生じないとすると、適正係数は(5)式よりつぎのようにして計算することができる。

$$K_{\alpha}' = N_0' / (T_1 - T_2) = (\alpha - \alpha_s) E / f = 0.156 \text{ cm}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$$

ここに、 $E = 32100 \text{ kg/cm}^2$ (25°C にて)、 $f = 11.0 \text{ kg/cm}$ (25°C にて)、 $(\alpha - \alpha_s) = 53.4 \times 10^{-6} / \text{°C}$ (Araldite B と鋼との熱膨張係数の差) である。この値は表-2 に示した実験値とほとんど一致しており、接着およびクリープの影響は無視しうることがわかる。接着層はきわめて薄いので、接着剤のクリープ、弾性係数、熱膨張係数などの値の相違が実験結果にほとんど影響を与えない。両端固定棒の実験において、室温まで冷却後長時間放置してもほとんど光学的クリープは認められず、また接着後室温まで下げたものについて、数回接着温度と室温の間の温度サイクルをくり返したが発生縮次数に変化は認められなかった。

$K_{\alpha} = 0.16 \text{ cm}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ とすると、厚さ 1 cm の両端固定棒が 40°C の温度差をうけるときに現われる縮次数は、 $0.16 \times 1 \times 40 = 6.4$ (次数) となる。したがって室温から 60°C くらいまでの温度領域において実験を行えば、応力解析に適する程度の縮次数が得られる。またこの温度領域では温度制御も非常に簡単である。そして接着が可能であるため種々な形状ならびに拘束条件に関する実験を行うのに便利である。ただし Araldite D を接着材として用いたときには、図-1 に示すように 60°C 近くでは Araldite D の弾性係数がいちじるしく小さくなるので、接着する場合には 60°C 以上に温度を上げることは好ましくない。

図-5 記号



つぎに実例として、外周を鋼材によつて固定された円環に発生する熱応力の実験を行い計算値と比較した。図-5 に示すように、 $r = b$ にて 2 種の材料が接続しているとき、

$$a/b = B, \quad c/b = r$$

とおくと、 T_1 から T_2 まで温度変化をうけたとき内側の円環に生ずる応力差は次式によつて与えられる。

$$\begin{aligned} \sigma_r - \sigma_0 &= (\alpha - \alpha_s) E (T_1 - T_2) \\ &\times \frac{2(r^2 - 1)}{(r^2 - 1)\{(1 - \nu) + (1 + \nu)\beta^2\} - (\beta^2 - 1)\{(1 - \nu_s) + (1 + \nu_s)r^2\}} E/E_s \left(\frac{a}{r}\right)^2 \\ E/E_s &\ll 1 \text{ とすると,} \\ (\sigma_r - \sigma_0) &= (\alpha - \alpha_s) E (T_1 - T_2) \frac{2}{(1 - \nu) + (1 + \nu)\beta^2} \left(\frac{a}{r}\right)^2 \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

実験には $b = 60 \text{ mm}$ 、厚さ 5.9 mm の寸法のものを用いた。図-6 は得られた等色線を示すものである。この実験と同時に両端を鋼材に固定した棒に関する実験を行つて、その結果得られた縮次数 N_0 と円環に生じた縮次数 N_0' と比較して円環の熱応力を求めた。すなわち

図-4 両端固定棒の実験

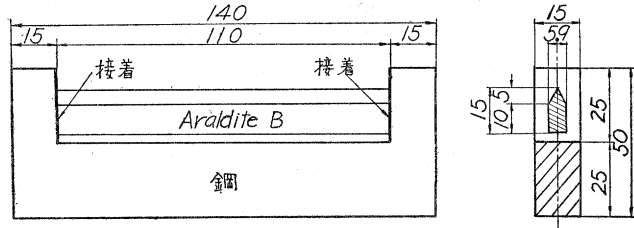
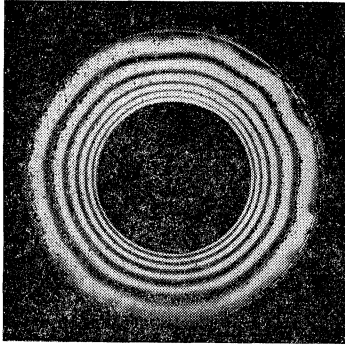


表-3 両端固定棒に生ずる縮次数

温度範囲 (°C)	40~25	50~25	60~25	70~25
K_{α} ($\text{cm}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$)	0.158	0.159	0.159	0.153

図-6 等 色 線

(a) $a/b=1/2$



$T_1-T_2=37^\circ\text{C}$, 厚さ 0.59 cm $K_\alpha=0.149\text{ cm}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$

$$N_0=(\alpha-\alpha_s)E(T_1-T_2)/f$$

によつて表わされるから、縞次数 N_0' のときにおける主応力差は

$$(\sigma_r-\sigma_\theta)=(N_0'/N_0)(\alpha-\alpha_s)E(T_1-T_2)$$

によつて与えられる。図-7はこのようにして得られた結果を(9)式の計算値と比較したものであつて、かなり良好な結果が得られている。

5. 熱応力の凍結実験

前節で述べた実験方法によれば室温において縞次数の測定を行うことが可能であるので、収斂光法または散乱光法によつて3次元構造物の模型実験を行うのに好都合である。しかしながらそのためには特殊な装置を必要とするので、これを避け、かつ広範な3次元模型実験を行うための方法として、熱応力を凍結する方法について検討を加えた。

材料が転移領域を越えた温度にあるときには、絶対温度を K とするとき、

$$E=AK, f=BK, (A, B \text{ は比例常数}) \dots\dots\dots(10)$$

なる関係が成立する⁹⁾ から、縞次数は

$$N_0=\alpha \int_{T_1}^{T_2} \frac{E}{f} dT = \alpha \frac{A}{B} \int_{K_1}^{K_2} dK \dots\dots\dots(11)$$

というような簡単な関係によつて生ずることになる。しかしながらこの縞次数を凍結する場合には、常温に達したときに凍結されている縞次数は(11)式で得られる値とは全く異なることが考えられるのみならず、その縞はクリーブを起すことも予想される。もしこのような現象が生ずるとしても、実験条件を規定したときに材料の単位厚さ当りについて凍結される縞次数 N_0 と弾性学上の計算より得られる応力 σ との間に

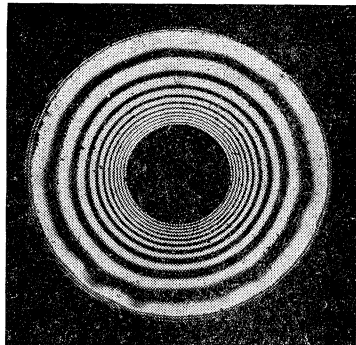
$$\sigma=K_T N_0, (K_T \text{ は比例常数}) \dots\dots\dots(12)$$

なる比例関係が成立するならば、いままで行われてきた通常の凍結実験法と同様に、3次元熱応力の模型実験法として熱応力の凍結実験法がきわめて有効な方法となる。

まず両端を固定された棒について凍結温度と縞次数との関係を求めてみた。接着剤としては Araldite B を用い、図-4と同じようにして鋼材に接着し、長時間接着温度に保つて接着完了後規定の速度で徐冷した。常温に達してから Araldite 棒を鋼材から切離し、20分後に観測した単位厚さ当りの凍結縞次数 N_0 は図-8の通りであつた。ただし切断した後には、図-9に1例を示すように縞次数にかなりいちじるしいクリーブが認められる。したがつて冷却過程、切断時刻、等色線測定時刻などを規定する必要がある。

一定温度で凍結した場合に(12)式が成立し K_T なる比例常数が存在すれば熱応力の凍結実験が行えるわけである。そこで前節で行つた実験と同様に、棒の両端および円環の外周を鋼材に接着固定し熱応力の実験を行つ

(b) $a/b=1/3$



$T_1-T_2=41^\circ\text{C}$, 厚さ 0.59 cm $K_\alpha=0.186\text{ cm}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$

図-7 円環の熱応力

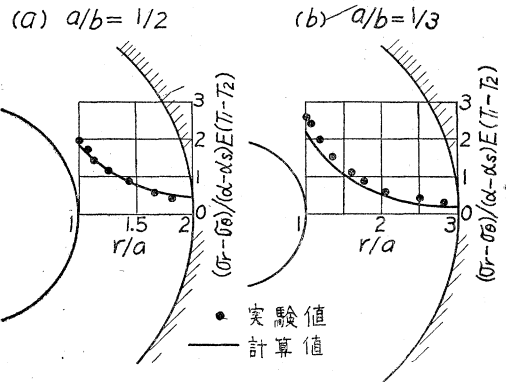


図-8 凍結温度と縞次数との関係

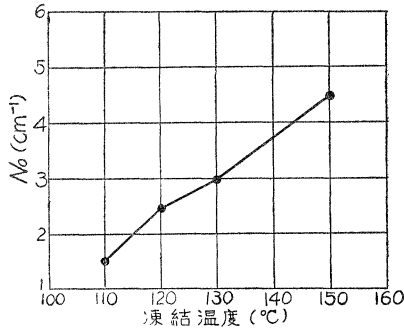


図-9 凍結縞の光学的クリーブ

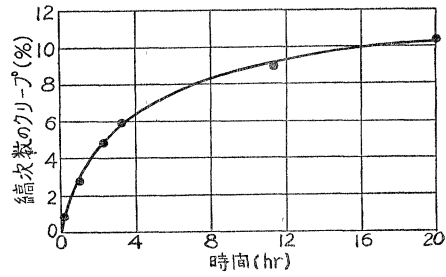
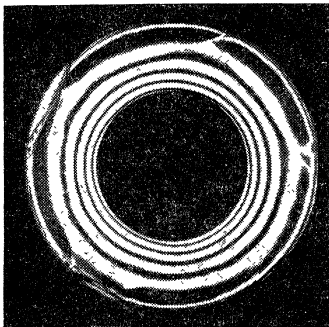
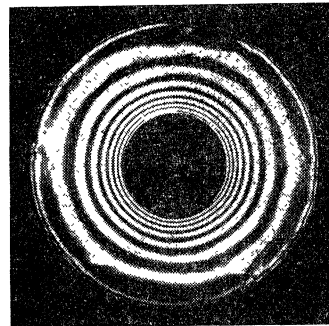


図-10 凍結された等色線

(a) $a/b=1/2$



(b) $a/b=1/3$



凍結温度 133.5°C, 厚さ 6.59 cm, $N_0=3.81\text{cm}^{-1}$

て、(12)式が成立するかどうかを検討した。図-10は円環に凍結された等色線を示すものである。棒および円環に凍結された単位厚さ当りの縞次数を N_0 および N_0' とするとき、(12)式が成立する場合には

$$\sigma = K_T N_0, (\sigma_r - \sigma_\theta) = K_T N_0'$$

$$\therefore (\sigma_r - \sigma_\theta) / \sigma = N_0' / N_0 \dots\dots\dots (13)$$

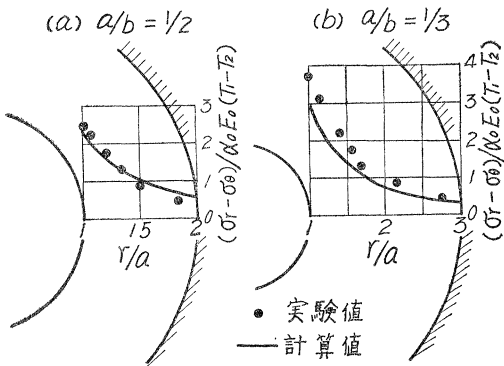
一方 図-5において内側円環の性質が α_0, E_0, ν_0 であるとし、 $E_0/E_s \ll 1$ とすると、 $(\sigma_r - \sigma_\theta)$ に対して(9)式を用いることにより、(13)式に示した応力の比は理論上つぎのような関係となる。

$$\frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{\sigma} = \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{\alpha_0 E_0 (T_1 - T_2)} = \frac{2}{(1 - \nu_0) + (1 + \nu_0) \beta^2} \left(\frac{a}{r} \right)^2$$

ゆえに、 $\frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{\alpha_0 E (T_1 - T_2)} = \frac{N_0'}{N_0} = \frac{2}{(1 - \nu_0) + (1 + \nu_0) \beta^2} \left(\frac{a}{r} \right)^2 \dots\dots\dots (14)$

$\nu_0=0.5$ と仮定し (14) 式によつて計算値と実験値を比較すれば 図-11 に示す通りである。この図によれば実験値の方が幾分大きくなっている。この原因は $\nu=0.5$ という仮定が誤りではないかと考えられるが、 $\nu < 0.5$ とすれば 図-11 の計算値はさらに小さくなり、 $\nu > 0.5$ ということはまず起りえないから、全く別な原因によるものである。そこで (12) 式における K_T が同一凍結温度、同一温度経歴においても一定値を示さないことに起因するのではないかと考えられる。棒の両端を固定した場合の凍結縞模様は 図-12(a) に示すようにきわめて整然と現われるのが普通であるが、ときには 図-12(b) に示すように同一断面の棒において縞次数が横断面の位置によつて異なるというような不合理な結果の得られる場合もあつた。このようなことから、 K_T が一定値を示すかどうかという点についてさらに

図-11 円環の熱応力



研究しなければならない。この点については、材料の応力が次第に増加しつつ高温から転移領域を越えて常温に達する過程における光弾性縞の発生機構について考察を加えるとともに、実験によつて詳細に検討する必要がある。また $\nu=0.5$ とした仮定についても適否を確かめる必要がある。しかしながら 図-11 (a) においては比較的よい実験結果の得られていることから、十分注意して実験を行えばかなり満足すべき結果が得られるものと思われる。

6. 結語

一般に光弾性材料は室温より低い温度領域では温度によつて弾性係数および fringe value の変動することが小さいが、室温より高い温度領域においてはこれらの値の変動が大きいのみならずクリープもいちじるしくなるので、原理的にはなるべく低温で熱応力の実験を行うのが望ましい。しかしながら低温装置を必要とすること、低温では材料の脆性が増す⁹⁾ こと、恒温装置中に模型を設置して光弾性縞の測定を行わねばならないことなどの不便が多い。そこで原理上好ましくないが、実用上の便宜を考えて、室温以上において熱応力の実験を行うことについての精度を検討した結果十分満足すべき精度の得られることが明らかになった。この方法において接着を行うことが可能なこと、特殊な装置を要しないこと、室内に模型を露出して光弾性縞の測定を行いうるなどの便宜が多い。とくに模型の周囲に測定の支障となるものが存在しないので、3次元模型に対して収斂光法または散乱光法を適用するのにきわめて便利である。

本論文では材料の Poisson 比については測定を行っていないので、Poisson 比の大きさを仮定して計算値と比較したが、温度とともに Poisson 比は幾分変化する。ことに凍結された縞は Poisson 比がいくらの値の応力に対応するものであるかという点について全く考察を加えていない。より厳密な検討を加えるためには Poisson 比の大きさについての考察を省くことはできない。

つぎに熱応力によつて生ずる光弾性縞を凍結する実験を行った。その結果によればかかる縞の発生過程は非常に複雑であるが、凍結された縞回数と弾性学上の計算応力との関係は、近似的に比例関係が成立すると考えてよいように思われる。この関係については今後なお詳細な研究を行う必要がある。凍結された縞には光学的クリープが認められるので、実験に際しては温度経歴、切断時刻ならびに等色線測定時刻などの実験条件を規定する必要があるが、上述のように縞回数と応力との間に比例関係が成立するときには、熱応力の模型実験法として本論文に述べた方法はきわめて有効である。

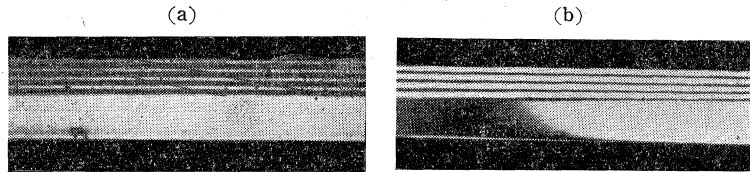
最後に本研究は文部省科学研究費の援助をうけたものであることを記し、謝意を表す。

参考文献

- 1) Parsons, K.A.: A Photoelastic Investigation of Quenching Stresses in Glass, Proc. Soc. Exp. Stress Analysis, Vol. 10, No. 1, p. 1 (1952)
- 2) Durelli, A.J. and C.H. Tsao: Determination of Thermal Stresses in Three-Ply Laminates, Journal of Applied Mechanics, Vol. 22, p. 190 (1955)
- 3) 黒田正夫; 弾撃破壊の研究, 科学研究所報告, 第29輯, p. 390 (1953)
- 4) George Gerard and A.C. Gilbert: Photothermoelasticity: An Exploratory Study, Journal of Applied Mechanics, Vol. 24, p. 355 (1957)
- 5) 川本勝万; マツシブな構造物の収縮応力に関する光弾性学的基礎研究, 土木学会論文集, 第61号, p. 29 (1959)
- 6) 河田幸三・辻 二郎; 応力凍結法の研究(第三報)一凍結用光弾性材料としてのエポキシ及びフェノール樹脂について, 科学研究所報告, 第29輯, p. 1 (1953)
- 7) 文献 4)
- 8) 文献 6)
- 9) 文献 2)

(昭 34. 7. 18)

図-12 両端固定棒の等色線



凍結温度 152°C, 厚さ 1.02 cm