

ホログラフィによる新しい動的弾性定数測定法

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2017-10-03 キーワード: 作成者: 宮崎, 猛, 北川, 隆, 植村, 恒義, 山本, 芳孝, Miyazaki, Takeshi, Kitagawa, Takashi, Uyemura, Tsuneyoshi, Yamamoto, Yoshitaka メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24517/00011716

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



ホログラフィによる新しい動的光弾性定数測定法

宮崎 猛*, 北川 隆**, 植村 恒義***, 山本 芳孝***

A New Method for Measuring Dynamic Photoelastic Constant by Holography

by

Takeshi MIYAZAKI, Takashi KITAGAWA,
Tsuneyoshi UYEMURA and Yoshitaka YAMAMOTO

Abstract

A new method for measuring dynamic photoelastic constant by time-averaged holography is described. In this method a rod clamped at one end is longitudinally excited at another end in the ultrasonic frequency range. The stress, that is, the displacement and the variations of refractive indices of the rod are obtained separately from the interference patterns of holograms whose objective beams are the one reflected at the surface of the rod and the one transmitted through the rod. The measuring theory is offered and the experiment is carried out where the specimen made of epoxy resin containing plasticizer is excited with a ferrite vibrator and a step horn. The measured photoelastic constant is compared with the one determined statically. The former is larger than the latter. The dynamic absolute stress-optical coefficients can also be measured, but the accuracy of the measurement is low because the sensitivity of the measurement is low and it is difficult to measure the dynamic Poisson's ratio. This method is easier than the conventional ones.

1. 緒 言

動的な光弾性実験法は衝撃荷重の加わった場合やき裂の伝ば中の応力解析に応用されている。この場合、光弾性定数は静的な場合と異なるので新たに測定する必要がある。また、高分子材料の物性研究上、光弾性定数の高周波数領域における周波数依存性は重要であり興味深い。

動的な光弾性定数の測定では通常、衝撃荷重や高周波数のくり返し荷重を加え、そのときのひずみとしま次数の変化を高応答速度、高感度の検知器で測定しなければならないが、装置も複雑でなかなかやっかいである。ところで、ホログラフィ干渉法の1種である時間平均法ホログラフィ¹⁾は無接触で、高感度に振動振幅を測定できるという特長を有し、振動モードの測定などの工業分野に広く実用されている。また、この方法においては、何ら高応答速度の検出器を必要としないことも見逃し易い長所の一つである。最近、この方法によりはりの縦振動を測定した報告²⁾や透明な液体の振動を測定した

* 精密工学科, ** 精密工学専攻大学院生 (現在, ㈱スギノマシン), *** 東京大学工学部

報告³⁾がある。したがって、はりの表面で反射した光による前者の報告の手法でひずみを測定し、後者の報告のようにはりを透過した光による手法により屈折率変化を測定し、その結果より動的弾性定数を求めることが考えられる。本研究では、この新しい測定法を理論的に、実験的に検討した。

2. 測定理論

2.1 応力の求め方

縦振動させたはりの表面からの反射光を物体光とする時間平均法ホログラムの再生像上の干渉じまから求められる量は、はり上の各点の変位振幅である。これより、ひずみを得るには干渉じまのしま間隔でそれらの干渉じまが表す変位の差を割る必要がある。はりの動的弾性率は同じホログラム再生像より得られる振幅分布の極小の間隔より求められるから²⁾、それとひずみより応力を計算できる。

この際、下記の点に注意しなければならない。通常、高分子材料は粘弾性体であるが、粘弾性体の振動の振幅分布は図1のように極小値がゼロではない。 $|u|$ は振動変位の絶対値すなわち振動振幅であり、 x ははりの軸方向の座標である。内部損失が小さいと極小値は小さい。極小の位置の振動位相は極大の位置の振動位相と 90° 異なり、極大の位置の変位が最大となる位相では図1の点線のような変位分布(ただし、極小の位置の左右で位相は逆相である)となる⁴⁾。したがって、通常、ひずみが最大となる極小付近で測定するが、図1の○印の位置に干渉じまがあるとき、ひずみ ϵ を $\epsilon = 2|u_1|/\Delta x$ の式から求めると、実際より大きい値となってしまいます。このときは点線のような、振動のある位相の変位分布を考慮して $\epsilon = 2|u'_1|/\Delta x$ の式を使用する方が望ましい。干渉じまが密に撮影されたとき特に注意が必要である。

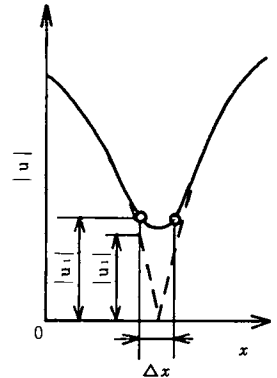


図1 応力の求め方

2.2 屈折率変化の求め方

屈折率の変化は、縦振動させたはりを透過した光を物体光とする時間平均法ホログラムの再生像の干渉じまより求める。干渉じまを生じさせる物体光の光路長変化 $\Delta\delta$ は屈折率変化 Δn の他に図2のようにポアソン比による試験片の厚みの変化 Δd を考慮しなければならない。すなわち、

$$\Delta\delta = d \Delta n + (n - n_0) \Delta d \tag{1}$$

ただし、 n 、 n_0 はそれぞれ試験片と空気の屈折率である。軸方向の応力を σ_x とすると、 $\Delta d = -\nu \sigma_x d / E'$ (E' 、 ν はそれぞれ動的弾性率、ポアソン比)であるから Δn は次のようになる。

$$\Delta n = \frac{\Delta\delta}{d} + \frac{(n - n_0) \nu \sigma_x}{E'} \tag{2}$$

2.3 光弾性定数の求め方

主応力による屈折率変化は次式のような Maxwell-Neumann の法則に従う⁵⁾。

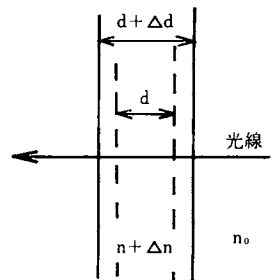


図2 屈折率変化の求め方

$$\left. \begin{aligned} \Delta n_x &= C_1 \sigma_x + C_2 \sigma_y \\ \Delta n_y &= C_2 \sigma_x + C_1 \sigma_y \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ただし、 Δn_x 、 Δn_y はそれぞれはりの軸方向およびそれに直角な方向に振動する偏光に対する屈折率変化である。 C_1 、 C_2 は絶対応力光係数である。 x および y 方向に振動する偏光を入射すれば式(2)より Δn_x 、 Δn_y は求まる。縦振動の場合、はりの軸方向に直角な方向の応力 σ_y がゼロであるから、絶対応力光係数 C_1 、 C_2 は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{\Delta \delta_x}{d \sigma_x} + (n - n_0) \frac{\nu}{E'} \\ C_2 &= \frac{\Delta \delta_y}{d \sigma_x} + (n - n_0) \frac{\nu}{E'} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ただし、 $\Delta \delta_x$ 、 $\Delta \delta_y$ はそれぞれ x 、 y 方向に振動する偏光の光路長変化であり、ホログラム再生像の干渉じまより直接求められる。

光弾性定数すなわち相対応力光係数 C は C_1 と C_2 の差であるから、次のようになる。

$$C = \frac{\Delta \delta_x - \Delta \delta_y}{d \sigma_x} \quad (5)$$

試料の厚さ変化の効果すなわち式(4)の第2項は打ち消される。以上のように試験片に平面偏光を入射すれば C_1 、 C_2 を測定でき、それより C を求められるが、円偏光を入射し試験片を透過した後に x 、 y 軸に 45° の方向の偏光板を入れると $\Delta \delta_x - \Delta \delta_y$ が直接求められる。したがって、光弾性定数を直接、測定できる。

3. 実 験

3.1 加振装置

図3に加振装置を示す。試験片はエポキシ樹脂（エピコート 828）に可塑剤（チオコールLP-3）を加えたものを用いた。硬化剤はトリエチレントトラミンでエポキシ樹脂に対して 12phr 加えた。可塑剤含有率により試験片の機械的性質は変る。実験に使用した可塑剤含有率 38% のものの動的弾性率は 190kg/mm^2 で、損失正切は 0.13 である。試験片寸法は $8 \times 8 \times 80\text{mm}$ である。

加振はフェライトの振動子にステップホーンを取り付けて行った。フェライト振動子は π 型で、固有振動数は 20kHz である。出力は共振点でも十分には得られないので、他の周波数で測定するには振動子とホーンを変えなければならない。ステップホーンの面積比は 2.8 : 1 である。振動子、ホーン、試験片の間は接着し、適当に圧力を加えた。

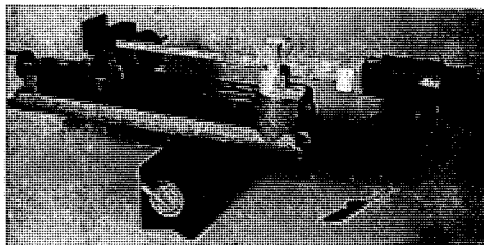


図3 加振装置

3.2 光学系

図4 はひずみを測定するための反射型のホログラフィ光学系である。通常の波面分割型の光学系であるが、縦振動の場合、振動ベクトルがはりの表面の面内にあるので入射光はなるべく、ななめ方向から照明する必要がある。すなわち、ホログラフィ干渉法の感度は $\cos(\theta_1 + \theta_2)$ (θ_1, θ_2 は振動ベクトルと照明方向、観測方向の角度である。) に比例するからである¹⁾。本実験では θ_1 は $20^\circ \sim 30^\circ$ であり、この場合、垂直照明、垂直観測のときの約0.4倍に感度は低下する。また、照明方向、観測方向が試験片上の各点で異なることによる感度の違いも、この場合、大きいので振幅を計算するとき注意を要する。

図5 は屈折率変化を測定するための透過型の光学系である。試験片(O)の前に拡散板(D)を置くこと観測が容易になる。レーザの偏光方向はレーザの直後にレーザ光の偏光方向に 45° の角度で4分の1波長板(Q)を置き円偏光とし、その後ろに置いた偏光板(P)により変える。

レーザは出力150mWのArレーザ(波長; 5145Å)で、乾板はアグファゲバルト社のシェンシア10 E 56を使用した。

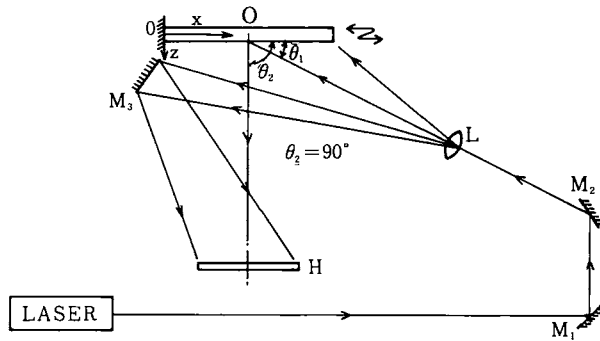


図4 応力測定用光学系 (O ; 試験片, M ; 反射鏡, H ; ホログラム, L ; 光束拡大レンズ)

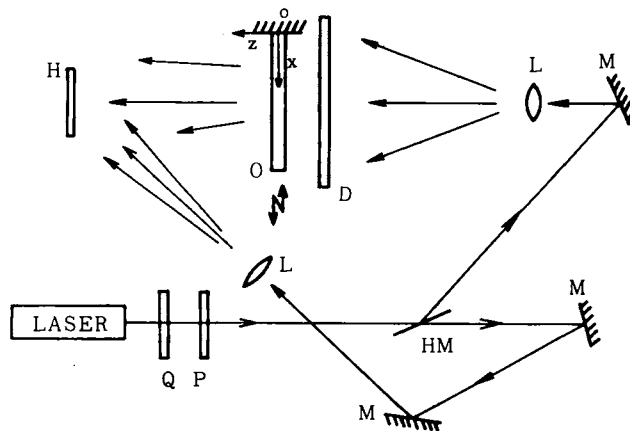


図5 屈折率変化測定用光学系 (O ; 試験片, H ; ホログラム, Q ; 4分の1波長板, P ; 偏光板, D ; 拡散板, M ; 反射鏡, HM ; 半透鏡, L ; 光束拡大レンズ)

試験片は反射型の場合は表面に正常な振動を妨げない程度に白色の塗料を塗った。ひずみと屈折率変化を同時測定するには上半分を白く塗ることが考えられる。

4. 結果ならびに検討

4.1 ホログラム再生像

図6に撮影したホログラムの再生像を示す。図6(a)の反射型光学系の場合、干渉じまが試験片表面外に局在するので、目の位置をずらせると干渉じまが移動するが、図6(b),(c)の透過型の場合は移動しない。フェライト振動子の入力電圧は図6(a),(b),(c)それぞれ、14V, 17V, 10Vである。図6(c)のX方向に振動する偏光の場合、測定に十分な干渉じまの数は得られてはいない。干渉じまの次数を上げるには、まず、光線を試験片内で往復またはくり返し通過させる手法により感度を上げることが考えられるが、実験技術は難しくなる。また、試験片やホーンの形状や取り付け方およびフェライト振動子の入力電気回路を工夫してはりの振幅を大きくすることが考えられる。

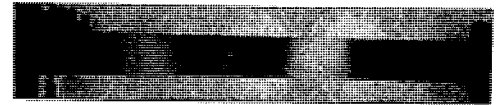
図7にホログラム再生像の干渉じまから得られる実験値と理論曲線を比較する。はりの縦振動の理論式は複素数を引数とする三角関数 $u = a^* \sin n^* x e^{j\omega t}$ (a^* , n^* ; 定数, ω ; 角周波数) で表される²⁾。理論曲線を少し右の方にずらしてあるのは、実験値がボアソン比による試験片表面に垂直な振動の効果に伴う光学系上の理由でずれるからである。加振点付近を除いてよく一致している。加振点付近の違いは振動子の発熱によるものと思われるが、測定には影響を及ぼさない。図7の(a)と(b)では極大、極小の位置が逆になっている。これは、ひずみの最大の点で屈折率が最大となるからである。なお、再生像を解析するに当たって干渉じまの示す変位振幅、屈折率変化振幅はベッセル関数の根に比例することにも注意を要する¹⁾。



(a) 反射光によるホログラフィ

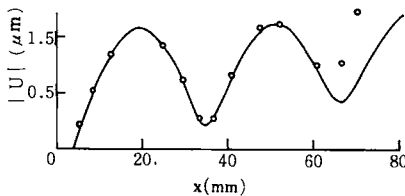


(b) Y方向の偏光によるホログラフィ

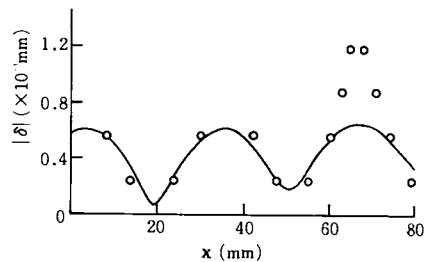


(c) X方向の偏光によるホログラフィ

図6 ホログラム再生像
(固定端;左, 加振端;右)



(a) 変位振幅分布



(b) 屈折率振幅分布

図7 ホログラフィによる実験値と理論曲線

4.2 動的弾性定数の測定

まず、式(4)の第2項を求める。動的弾性率 E' はホログラフィにより求めると 190 kg/mm^2 であった。ポアソン比は動的に求める適切な方法がないので、静的にストレインゲージをはりつけた引張り試験片により求めた0.43の値を使用した。しかし、光弾性定数を求めるときは式(5)のようにポアソン比は必要ではない。この材料の屈折率は1.6である。したがって、第2項の値は $1.35 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{kg}$ となる。

x, y 方向の式(4)第1項および、それから第2項を引いて得られる絶対応力光係数の C_2, C_1 の動的な値と参考のための静的な値を表1に示す。このときのひずみは図7 (a) の固定端から1番目の極小付近を用いたが、 1.5×10^{-4} であった。2.1で述べたことを考慮しないと 1.7×10^{-4} となってしまう。 x 方向の絶対応力光係数 C_1 の値は第1項と第2項がほぼ等しいのでほとんど測定誤差の範囲内であり、静的な値と比較は難しい。絶対応力光係数を求めるには各変数の測定精度を高めねばならない。

式(5)より計算すると動的な光弾定数は $0.70 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{kg}$ となり、静的な $0.56 \text{ mm}^2/\text{kg}$ よりも少し大きな値となる。衝撃力を負荷して求めた報告においても動的な光弾性定数は静的な値より大きい⁶⁾。これを厚さ1 mm 当りのしま次数である応力感度に直すと 1.1 mm/kg となる。光弾性定数の測定値は絶対応力光係数 C_2 (y 方向)と同様に測定誤差よりは十分に大きい。

表1 絶対応力光係数の測定結果

$[(n-n_0)\nu/E'$ (式(4)の第2項) $= 1.35 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{kg}$]

偏光の方向	$\Delta\delta/d\sigma$ (式(4)の第1項) ($\times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{kg}$)	絶対応力光係数 ($\times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{kg}$)	
		動的	静的
y	2.1	0.75	0.65
x	1.4	0.05	0.09

5. 結 言

時間平均法ホログラフィにより動的弾性定数を測定する方法が開発された。この方法では、縦振動するはりの応力は反射光を物体光とするホログラフィにより、屈折率変化は透過光を物体光とするホログラフィにより測定する。フェライト振動子とステップホーンによる加振装置を用い可塑剤を含むエポキシ樹脂の動的弾性定数を測定し検討した。この方法では何ら特殊な測定器は必要なく、通常のホログラフィ実験装置のみで測定できる。比較的簡単に数十 kHz の周波数領域での測定が可能である。しかし、ホログラフィ実験の欠点である、現像や定着などの面倒さや防振装置が必要であるなどの短所がある。これについては、現在、光源、検出装置、処理装置の開発が行われており、解析の自動化がなされつつある。また、測定に十分なように感度をあげねばならないが、それについては4.1で述べたような方法について検討しなければならない。本研究の実験に関してご協力頂いた元金沢大学工学部学生加藤真一君に感謝する。

参 考 文 献

- 1) R. L. Powell and K. A. Stetson : Journal of the Optical Society of America, 55 (1965) 1593.
- 2) 植村恒義, 山本芳孝, 宮崎猛, 北川隆 : 昭和50年度精機学会秋季大会学術講演前刷, (1975) 385.
- 3) 鈴木正根, 齊藤隆行, 宇田川哲夫 : 昭和49年度精機学会秋季大会学術講演前刷, (1974) 401.
- 4) 若島久男, 宮崎猛, 植村恒義, 山本芳孝 : 精密機械, 41 (1975) 985.
- 5) 湯浅亀一 : 材料力学中巻, コロナ社, (1967) 289.
- 6) A. B. J. Clark : Proc. SESA, 14 (1956) 195.

(昭和53年9月11日受理)