

ホログラフィ計測の各種製品への応用

Application of Holography to Measurements of Displacement and Vibration Mode

レーザを用いるホログラフィ干渉法は、非接触式で $\frac{1}{1,000}$ mm(ミクロン)の精度で、変形あるいは振動のパターン計測ができるので光学的計測法として魅力あるものである。

このホログラフィ干渉法を用いて、日立製作所では各種家庭用電気品、機械、構造物などの信頼性確保や振動低減などを行なっている。本報告は、これらの幾つかについて紹介したものである。

熊沢鉄雄* Kumazawa Tetsuo

本堂 実** Hondô Minoru

太田 啓*** Ôta Hiraku

米山光穂*** Yoneyama Mitsuho

1 緒言

レーザの出現以来、十有余年の間にホログラフィは飛躍的な発展を遂げ、ホログラフィ計測については光学から工学の分野に移りつつある。従来の光学干渉法であるマイケルソン干渉計、ファブリペロー干渉計などによる計測には、光学系の組立てに高度の技術が要求され、かつ被測定物表面が光学的平面でなければ測定できないなどの制約があった。このため、使用範囲が限定されていた。しかし、ホログラフィ計測は光学干渉法の一つでありながら従来のような高度な光学技術を必要とせず、また被測定物の形状及び表面の仕上げ程度に影響されることなく測定が可能である。そのため、今後計測手段としてホログラフィは種々の分野に応用されるものと期待されている。

計測手段としてホログラフィの利用が期待されるのは、およそ次に述べるような理由によるものと思われる。

- (1) 被測定物は光学的な平面である必要はなく、立体的形状でしかも粗面、例えばコンクリート表面のような粗面でもよいので、実際の製品について測定ができる。
- (2) 荷重、圧力、熱などによる変形をミクロンの精度で測定できる上に、変形状態がパターンとして把握できる。すなわち、製品の全体的な変形挙動を容易に知ることができる。更に、変形だけでなく振動についても、振動モード及び等振幅線分布の測定が可能である。
- (3) 非接触で被測定物の変形、振動振幅の情報が得られる。すなわち、変形又は振動状態を乱さないで高精度の測定ができるという利点がある。

上記のような特徴を持っているホログラフィ計測法を、各種製品の信頼性確保や振動低減に活用してきた。その実施例の幾つかについて報告する。

2 ホログラフィの原理

ホログラフィは、空間の信号波面の記録、及び再生の二つの過程から成り立っている。図1に示すように、記録用写真乾板上にコヒーレントな二つの光波 U_1 、 U_2 が到達すると、これらの光波は重なり合わさる。その結果、乾板上の強度分布 I は(1)式となる。

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= a_1 e^{i\alpha} \\ U_2 &= a_2 e^{i\beta} \end{aligned} \right\} I = |U_1 + U_2|^2 \dots \dots \dots (1)$$

ここで a_1 , a_2 : 振幅

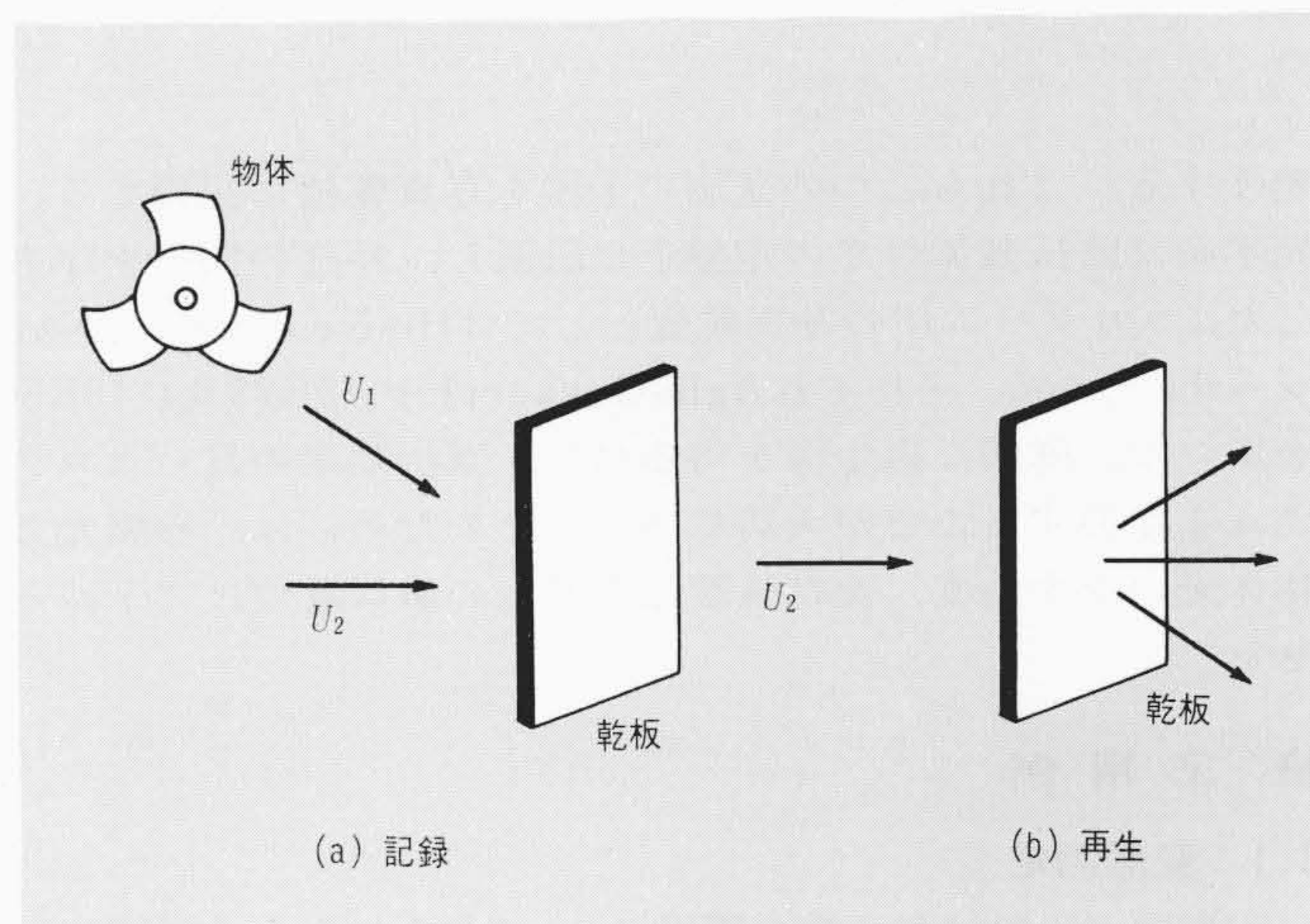


図1 ホログラフィの記録と再生 ホログラフィは、二つの光波 U_1 (物体光)と U_2 (参照光)を乾板上で干渉させ、これを現像処理する記録の過程と、この処理した乾板を光波 U_2 で照明して像再生する過程とから成る。

α , β : 位相

この乾板を現像処理するのが記録のプロセスである。次に現像処理した乾板(この乾板は強度分布 I に比例する振幅透過率を持つものとする)を U_2 と同じ光で照明すると、乾板(ホログラム)から射出される光波は(2)式で表わされる。

$$U_2 |U_1 + U_2|^2 = (a_1^2 + a_2^2)U_2 + a_2^2 U_1 + U_2^2 U_1^* \dots \dots (2)$$

右辺の第二項は係数を別にすれば、光波 U_1 が再生されていることを示している。 U_1^* は U_1 と共役な光波である。光波 U_1 は、物体からくる光波であるから再生によって再び物体光が作り出されていることを示しており、この光波から物体像を見ることができる。光波が再生されているため、見える物体像は三次元像である。ここで、物体の変形前と変形後と同一乾板に二重に露光して記録した場合には、再生された物体像に変形前後の二つの像が同時に再生される。二つの像の同時再生は、実際には物体像の上に干渉縞が表われた状態となって観察される。この干渉縞から変形状況を知ることができる。

図2ははりの変形計測の場合に設定した光学系の一例を示したものである。レーザ光源からの光をビームスプリッタで2分し、一方は物体を照明して物体光とし、他の一方は参照

* 日立製作所機械研究所 工学博士

** 京都工芸繊維大学教授 工学博士

*** 日立製作所機械研究所

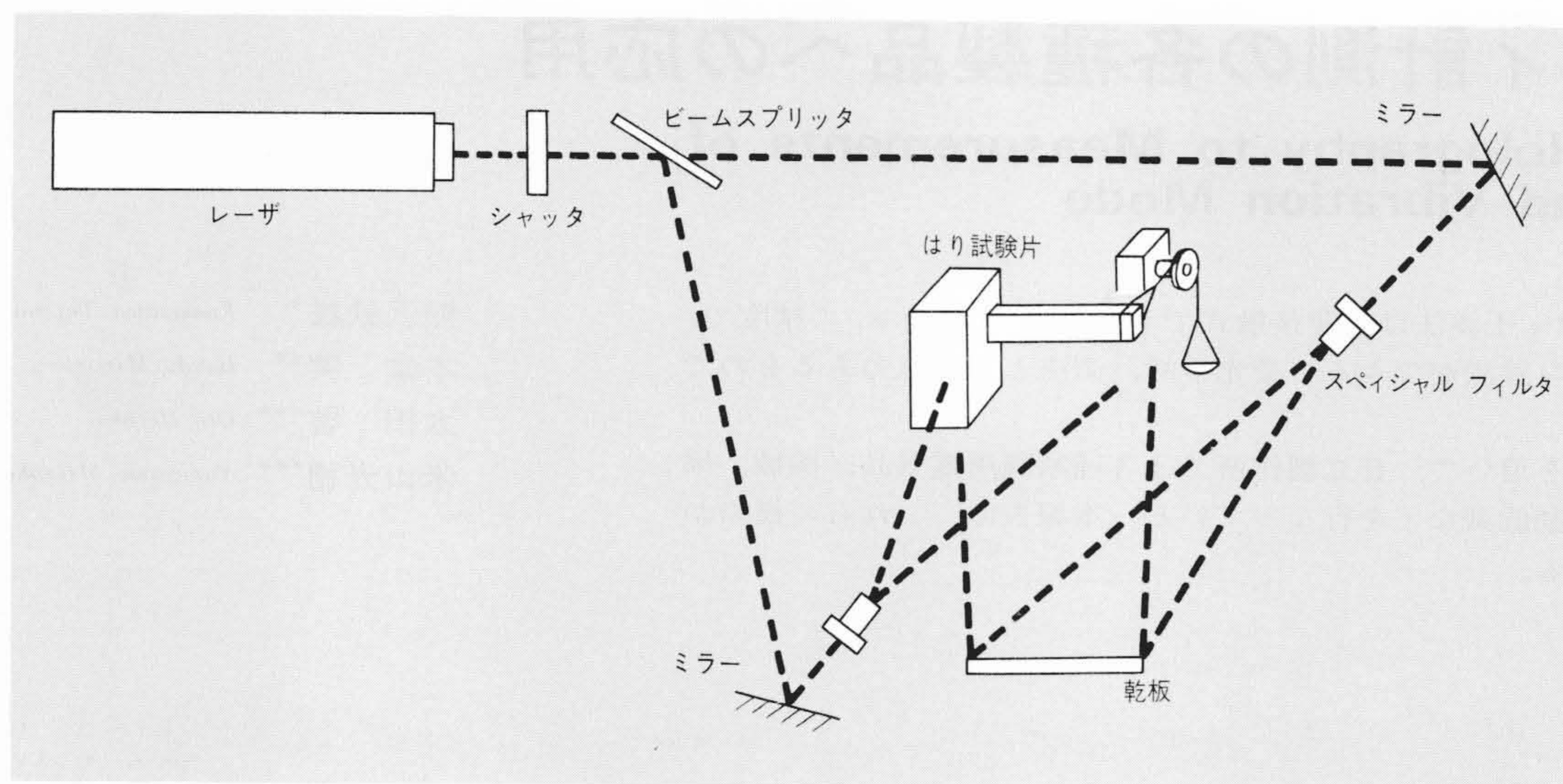


図2 ホログラフィ計測用光学系 レーザ光を2分し、一方は物体を照明する物体光、他方はこれと干渉させる参照光とする。

光とする。これら二つの光波の干渉を写真乾板に記録する。光学系は防振装置付きの定盤上に設置し、外部の振動を除去した。ホログラム用の写真乾板としてはHe-Neレーザ及びArレーザについて、それぞれAgfa-Gevaert社の10E75及び10E56を用いた。鮮明な再生像を得るには、回折効率の良いホログラムを作製することが大切であり、そのためには、参照光と物体光のなす角度、及び強度比を所定の値に近づけて干渉させた。

3 応用例

3.1 変形測定

変形前と変形後の二重の露光によって得られる干渉縞(明暗)は、図3に示すようになり、一縞間隔はレーザ光の半波長($\frac{1}{2}\lambda$)に相当する変位量となる¹⁾。したがって、任意の点の変位量は変位が零の固定端から縞次数を数えることによって求められる。この場合の変位量は、物体照明方向とのなす角の二等分線方向の変位成分に相当する。

3.1.1 片持ばりの変形

図4は片持ばりの曲げ変形の状態を表わすホログラフィ写真である。はり長さは200mm、幅30mm、厚さ3mmの鋼板である。集中荷重は、自由端である同図右端に負荷されている。干渉縞は、固定端(同図左端)から右へ1次、2次、……となっている。荷重が増すと全体の縞数は当然多くなる。これらのホログラフィ写真から求めた変位量と、はりの計算値の比較を図5に示す。計算値と実測値とはよく一致しており、両者の差は3%以内であった。

3.1.2 斜板式コンプレッサシリンダ

自動車用クーラーのコンプレッサでは、ボルト締結によって向かい合う2個のシリンダを密着させている。ボルト締結によるシリンダの傾きや変形は、騒音の発生原因になることがある。図6はシリンダに4.5tの荷重をかけた場合の変形状態を表わすホログラフィ写真である。このようなきれいなホログラフィ写真は、光学系の最適化、露出、現像処理条件の把握などにより回折効率の良いホログラムを作ることによって得られる。またボルト締め付け時には、固定部の変位が $0.1\mu\text{m}$ 以下とするなど、固定条件を厳しくしなければならない。図6には変形の集中が見られる。本構造の場合、変形の均一化がポイントであり、ホログラフィ測定により構造最適化の指針を得ることができた。

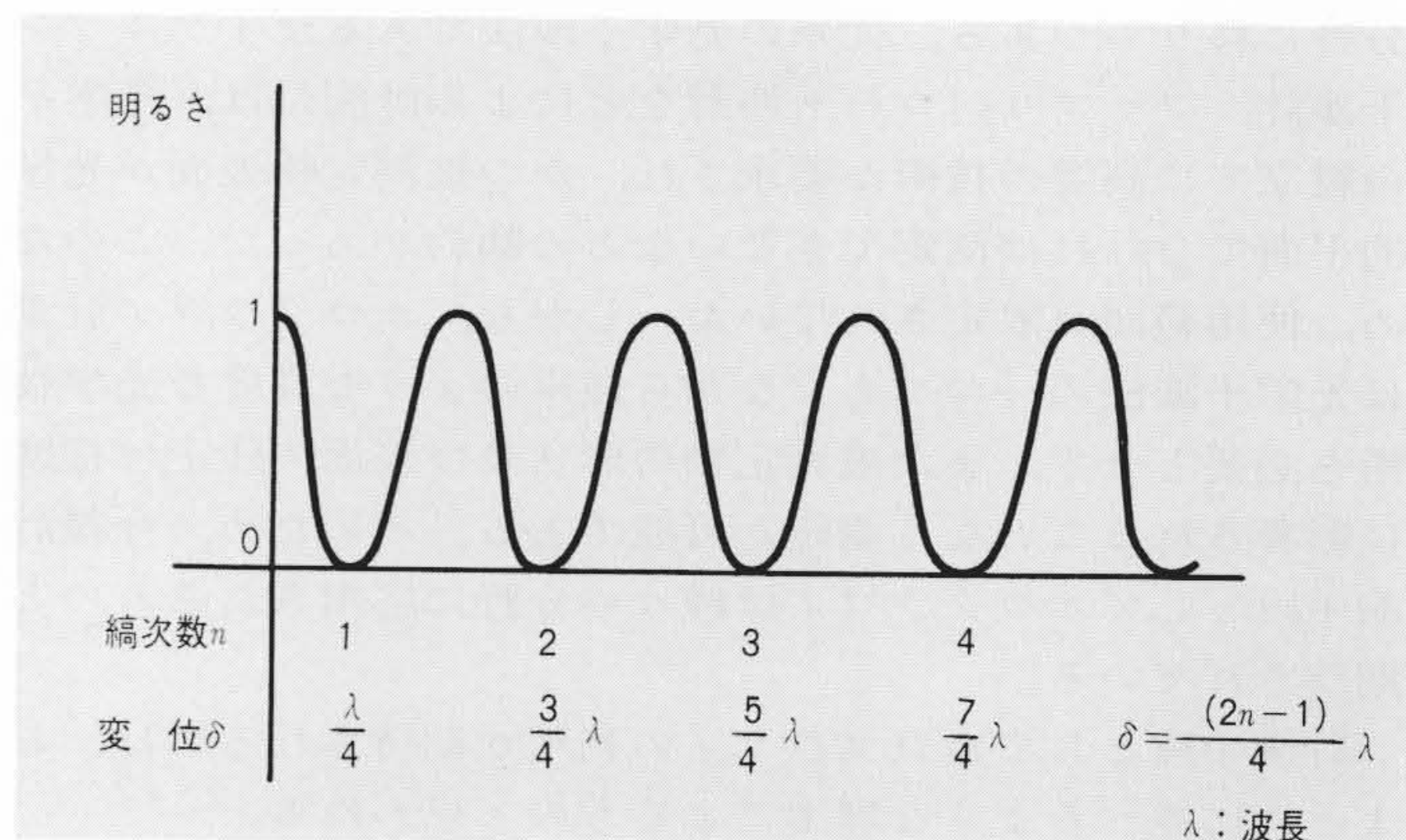


図3 干渉縞次数と変位 明るさは余弦的に変化する、その繰返しの間隔は使用レーザ波長の $\frac{1}{2}$ に相当する。

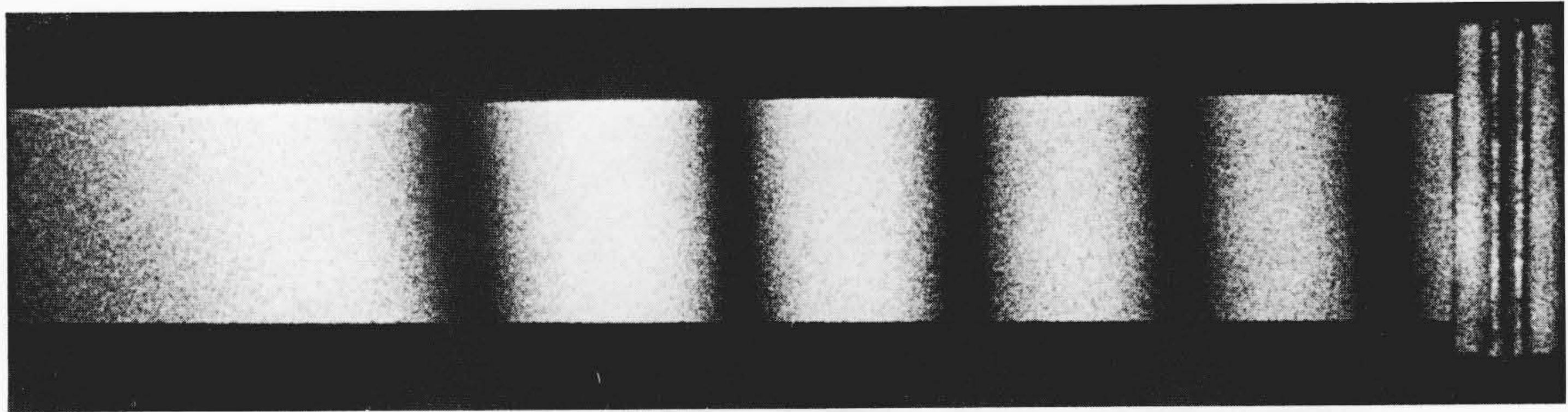
3.1.3 パワートランジスタの熱変形

キャンタイプのパワートランジスタは基板に半導体素子であるシリコンチップがはんだ付けされている。基板にはシリコンチップに発生する熱を発散させるため、一般には銅が用いられている。シリコンと銅の線膨張係数はそれぞれ $2.33 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ と $17.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ であるため、はんだ層には熱応力が発生し、トランジスタに長い年月の間スイッチのオン・オフが繰り返されると熱疲労により寿命の低下を引き起こす恐れがある。その対策として、はんだに発生する熱応力を小さくする方法が考えられた。すなわちシリコンチップをはんだ付けする基板の一部に拘束を設け、シリコンチップと基板との相対熱変形を抑える構造にする対策である。その評価にホログラフィを応用し、適正な構造を求めた。図7に相対熱変形を抑える種々のかしめ構造基板のホログラフィ写真を示す。基板は下端をビス止め固定し、裏面中央部を加熱した。各写真の干渉縞は、室温と加熱後の温度との差による熱変形を表わしており、かしめ部の寸法や形状の差異による熱変形の違いがそれぞれ明確に現われている。

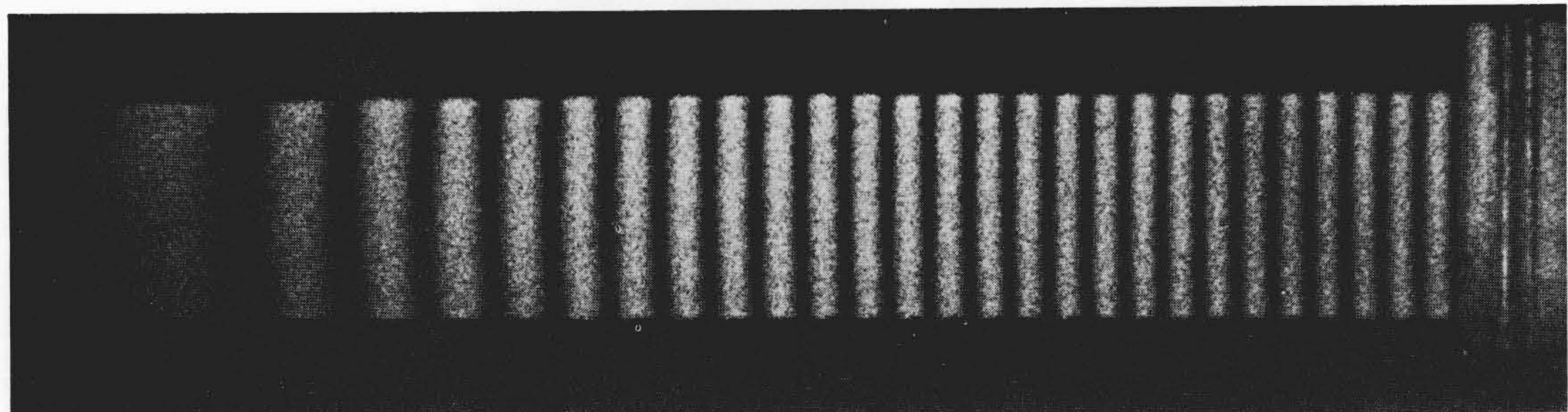
以上のホログラフィによる検討に有限要素法を用いた応力解析や熱疲労試験を併せ、パワートランジスタの大幅な長寿命化を達成した。

3.2 振動測定

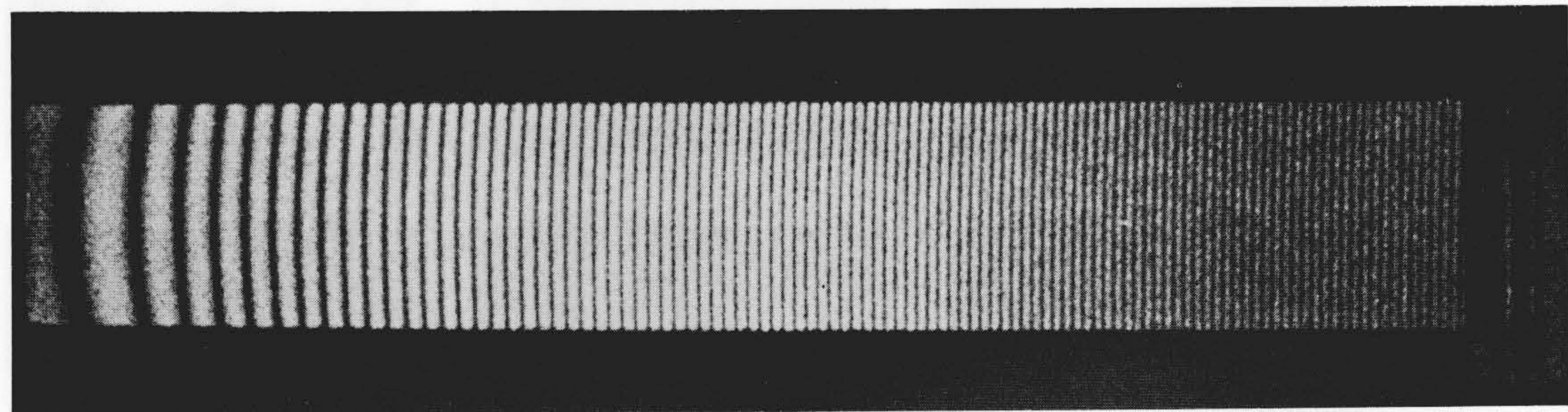
変形測定の場合と同じ光学系で、物体に変形を与える代わ



(a) 荷重 1 g



(b) 荷重 5 g



(c) 荷重 20g

図4 片持ばりの曲げ 3×30×200(mm)鋼板の曲げ変形状態を表わすホログラフィ写真を示す(左端固定, 右端自由)。

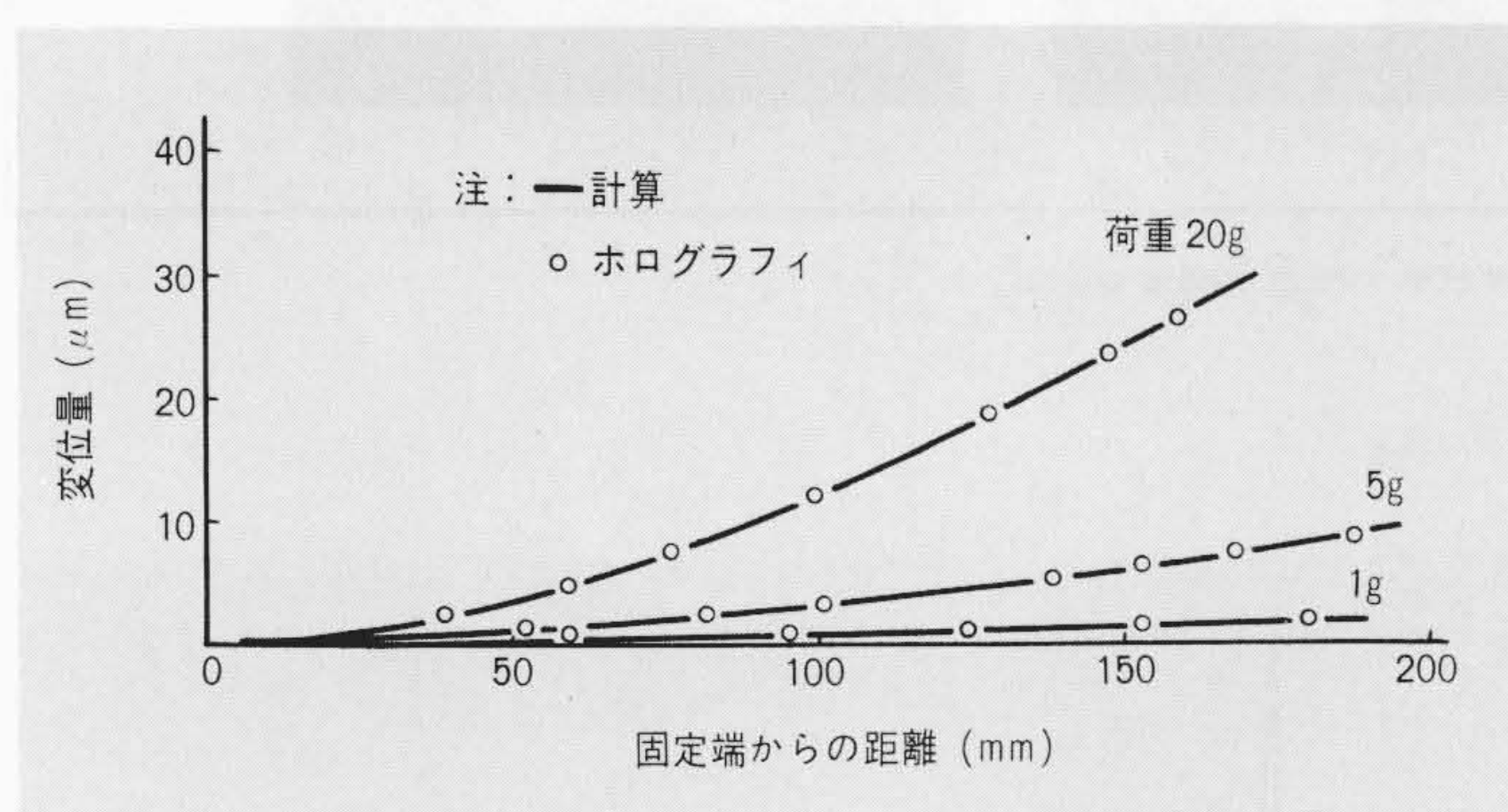


図5 はり：計算値と実験値の比較 ホログラフィによる変位量の測定値は、精度よく計算値と一致している。

りに正弦波状の定常振動を与え、これを数秒間露光してホログラムを作製し再生すると、干渉縞が観測される。この干渉縞は、物体の振動により照明光の位相が変調されることによって生ずるものであり、振幅及びモード情報を与える。ホログラムの大きさに比べホログラムと物体との距離が十分大きく、また物体照明の入射及び反射光の振動方向とのなす角が

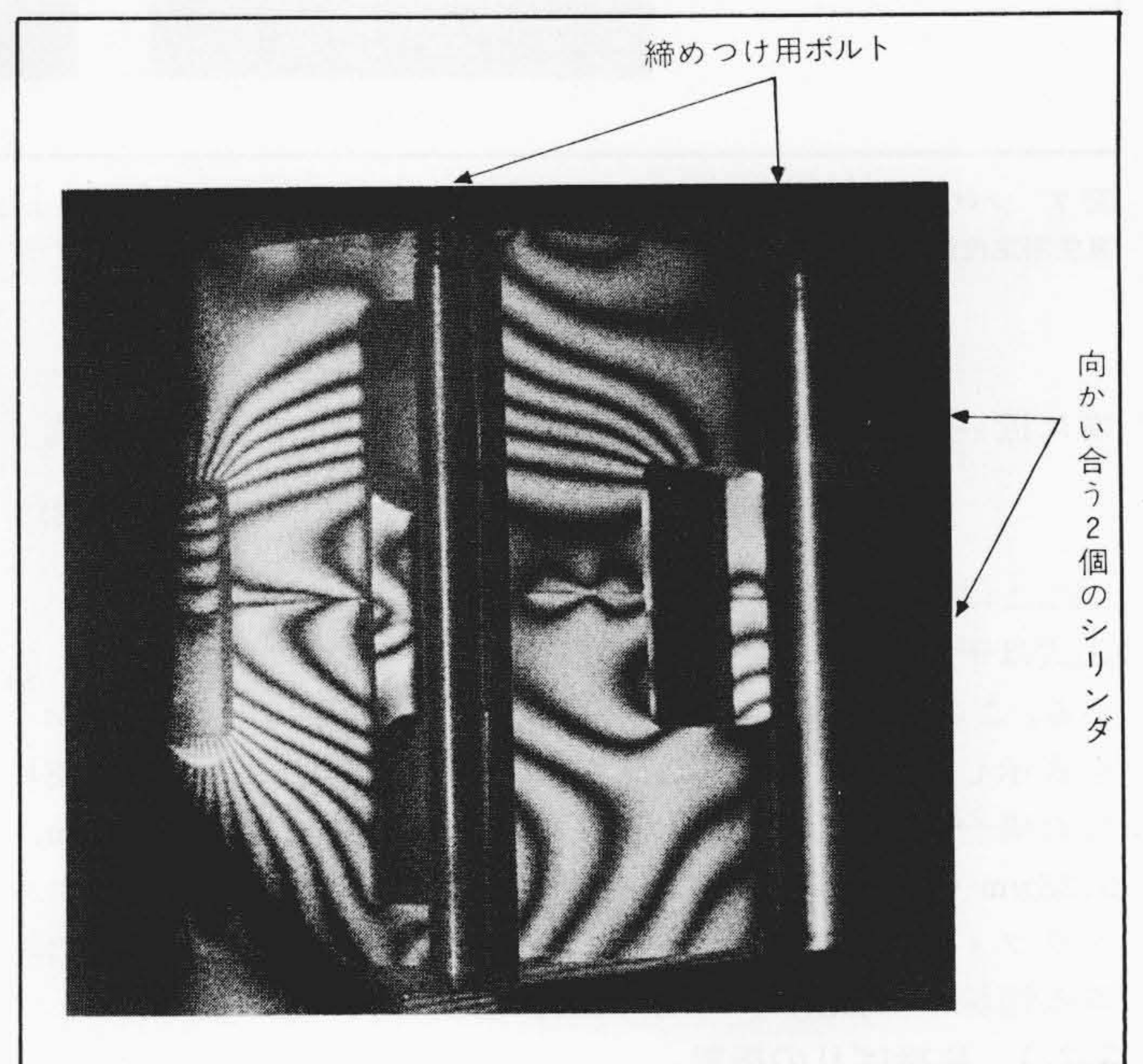


図6 斜板式コンプレッサ 4.5tの力で締めつけたときの自動車用コンプレッサシリンダの変形を表わしている。

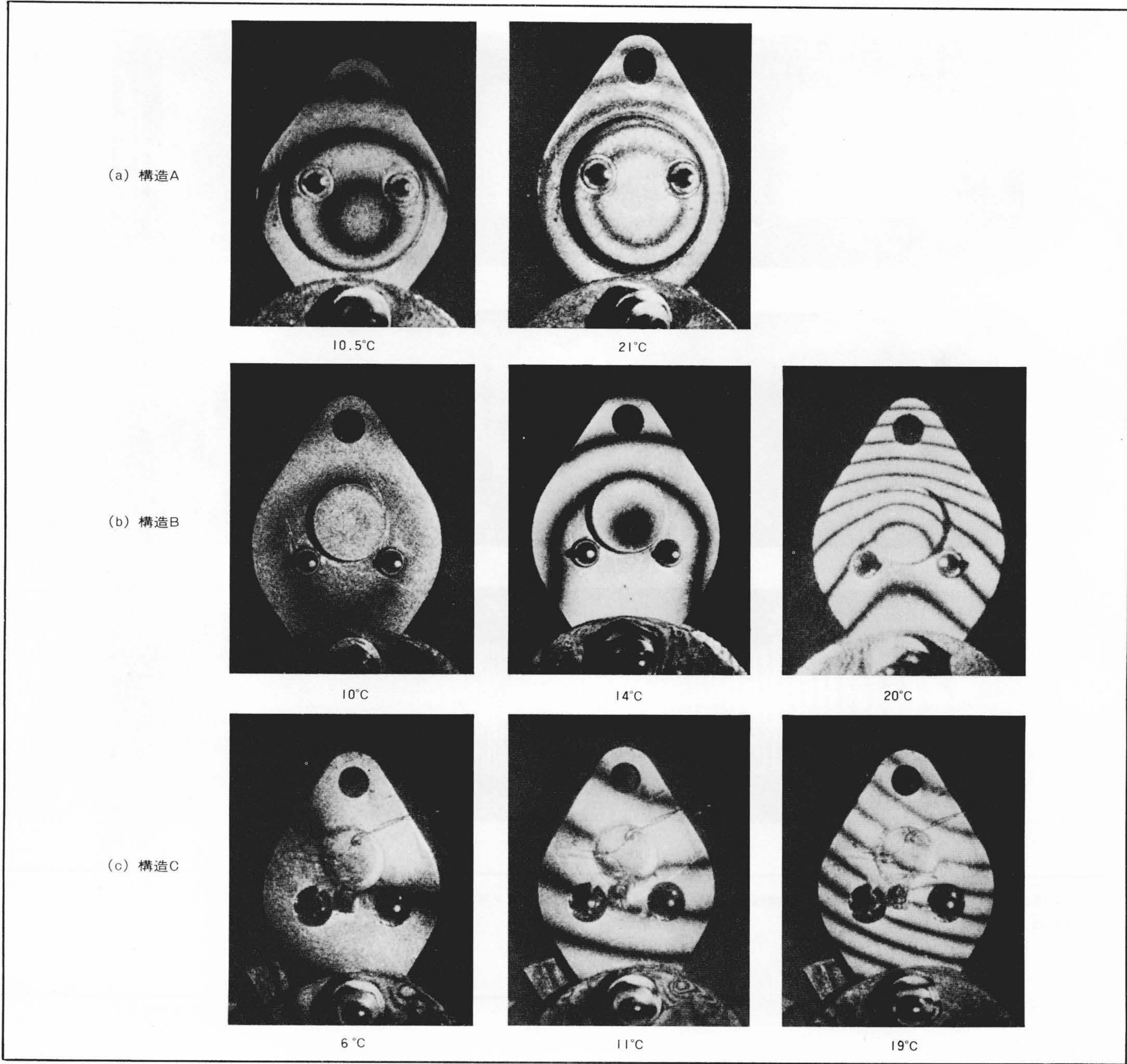


図7 パワートランジスタ基板の熱変形 基板の構造が異なることによる変形状態の相違が明確である。温度測定位置は、中央の拘束部である。

零に近いと、再生される像の強度 I は(3)式で表わされる²⁾。

$$I=k\cdot J_0\left[\frac{4\pi}{\lambda}a\right]^2\cdots\cdots\cdots(3)$$

ここに k : 比例定数, J_0 : ベッセル関数, a : 振幅
(3)式は干渉縞がベッセル関数の零点に対応することを示している。この方法は、時間平均法と言われる。図8は $J_0\left[\frac{4\pi}{\lambda}a\right]^2$ を表示したものである。He-Neレーザ($\lambda=0.6328\mu\text{m}$)を使用した場合、1次、2次、……の干渉縞はそれぞれ $0.12\mu\text{m}$ 、 $0.28\mu\text{m}$ ……の等振幅線を示すことになる。このように、ホログラフィによる振動計測では等振幅線が計測される。また、等振幅線から振動モード、あるいは節が求められる。

3.2.1 片持ばりの振動

ホログラフィによる測定結果と計算値とを比較するため、単純な片持ばりの振動を例に取り上げた。図9は図4のはり

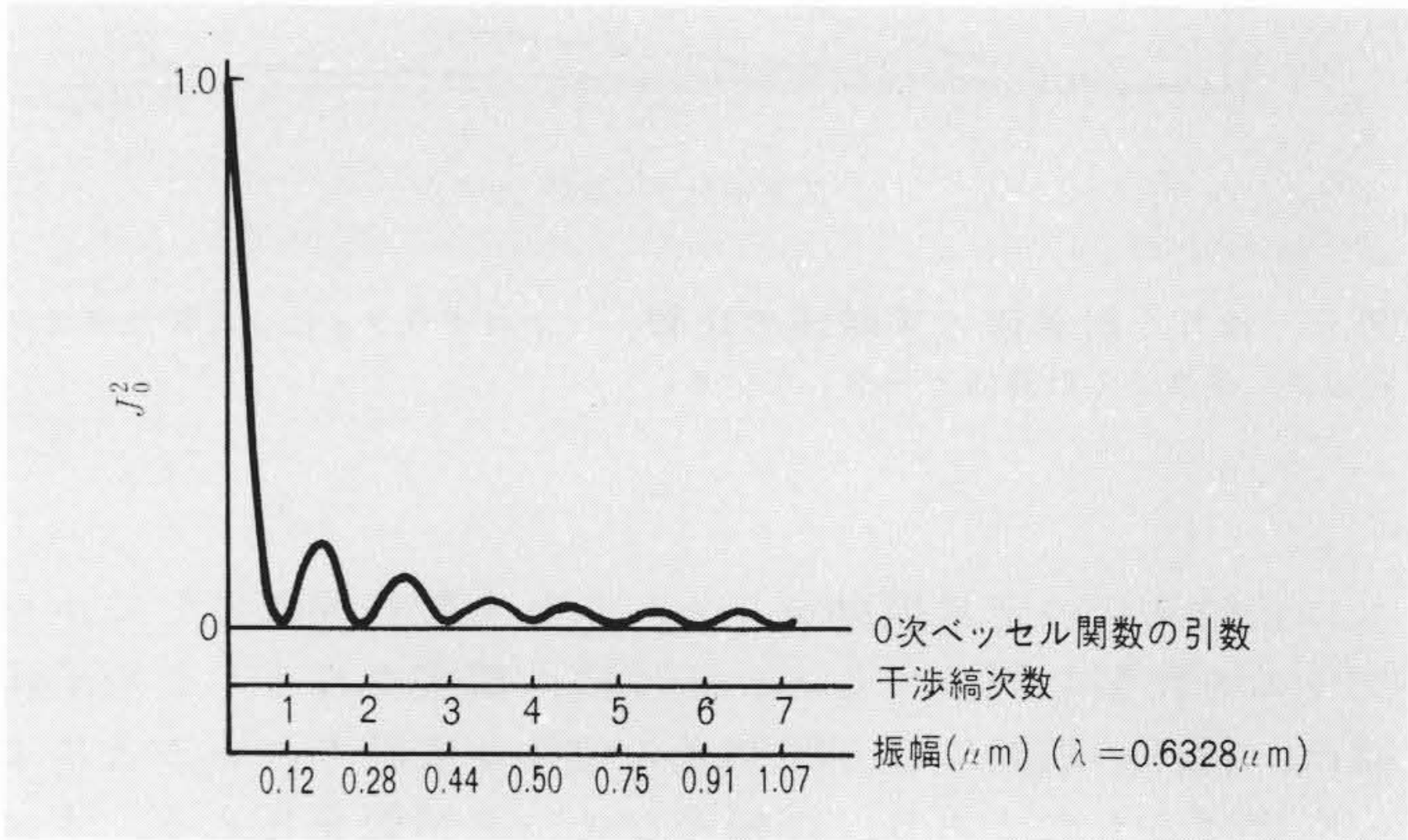


図8 0次ベッセル関数の2乗値と縞次数 縞次数が高次になるほど明暗のコントラストが悪くなる。

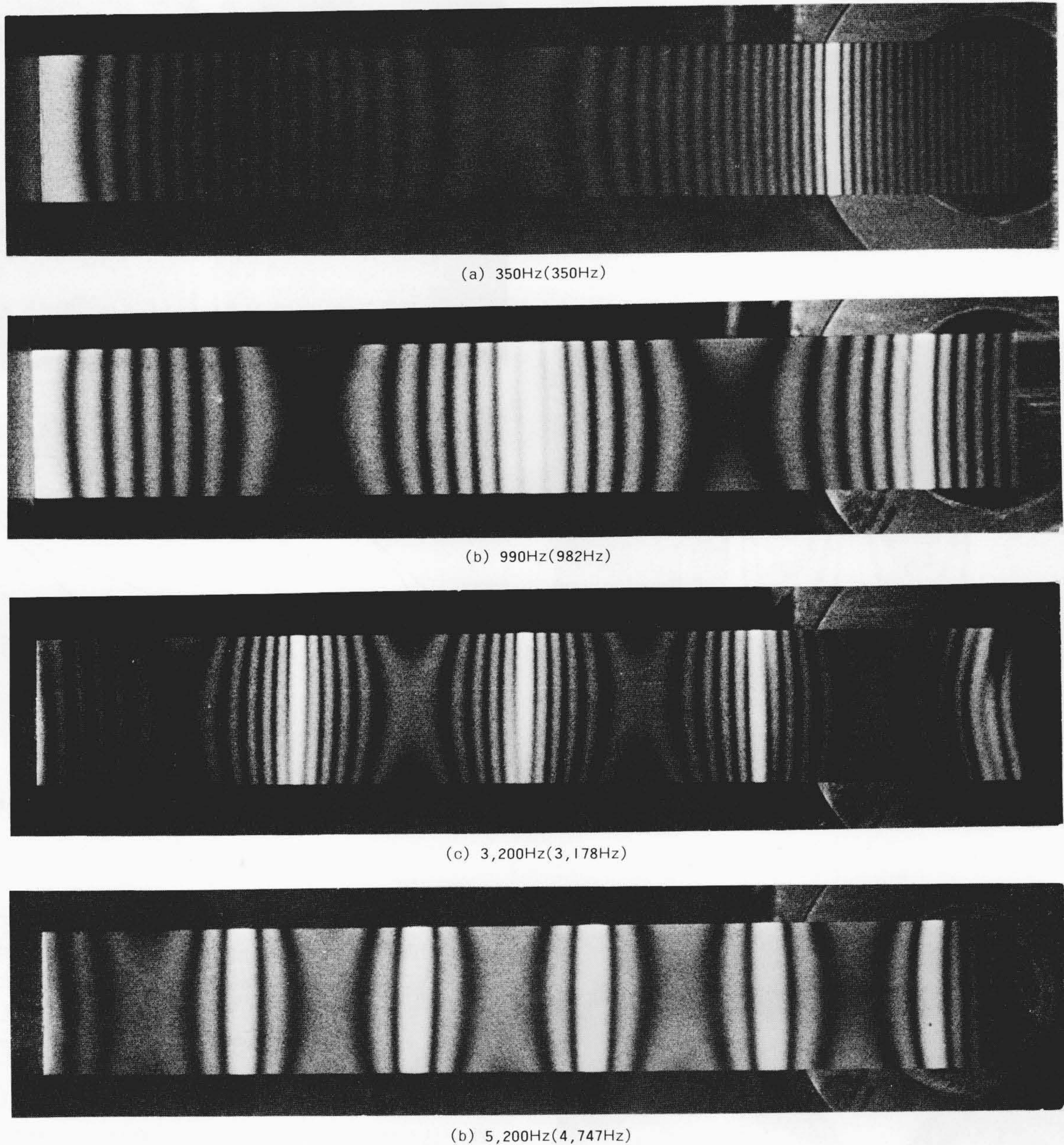


図9 片持ばりの曲げ振動 明るい部分は節，暗い部分は腹に相当し，写真下の各数字は固有振動数(括弧内は計算値)を示す。

を用いて得られた共振周波数350Hz, 990Hz, 3,200Hz, 及び5,200Hzでの写真である。はりの左端は固定，右端は自由で加振されている。最も明るい部分は振幅が零の位置である。等振幅線はポアソン比の影響があり，振動の腹に相当する位置近傍ではわん曲している。写真下の括弧内の振動数は，一端固定-他端自由のはりとして計算した固有振動数である，低次の共振点では計算と実験値とはよく合っている。図10は2次共振周波数(350Hz)及び3次共振周波数(990Hz)における振幅分布についてホログラフィ写真から求めた実測値と計算値とを比較して示したものである。固定端近傍は，計算値と実験値との間には良い一致がみられる。しかし，自由端側は振幅や節の位置について実験値と計算値が一致していない。この一致が見られない理由は，加振器先端とはりとの接触が実験上は弾性的であり，ばねが付加されているかのような状

態であるためと考えられる。

3.2.2 冷蔵庫用圧縮機

冷蔵庫は密閉形圧縮機を内蔵している。圧縮機の振動を防止し，騒音レベルを低下させることは重要な課題である。

図11はふたを取り付けない状態の圧縮機密閉容器の6節振動モードの等振幅線分布を示すホログラフィ写真である。図11に示すように，振動の節や腹と密閉容器周囲の付属品との位置関係が容易に把握できる。

ホログラフィによると，密閉容器の振動モード及び等振幅線が容易に求められ，また，振動モードを知ることによって理論計算との対応がつけやすくなる。これらの結果は設計に種々生かされている。

3.2.3 空調機用ファンインペラ

空調機用ファンには流体性能が優れているとともに，低騒

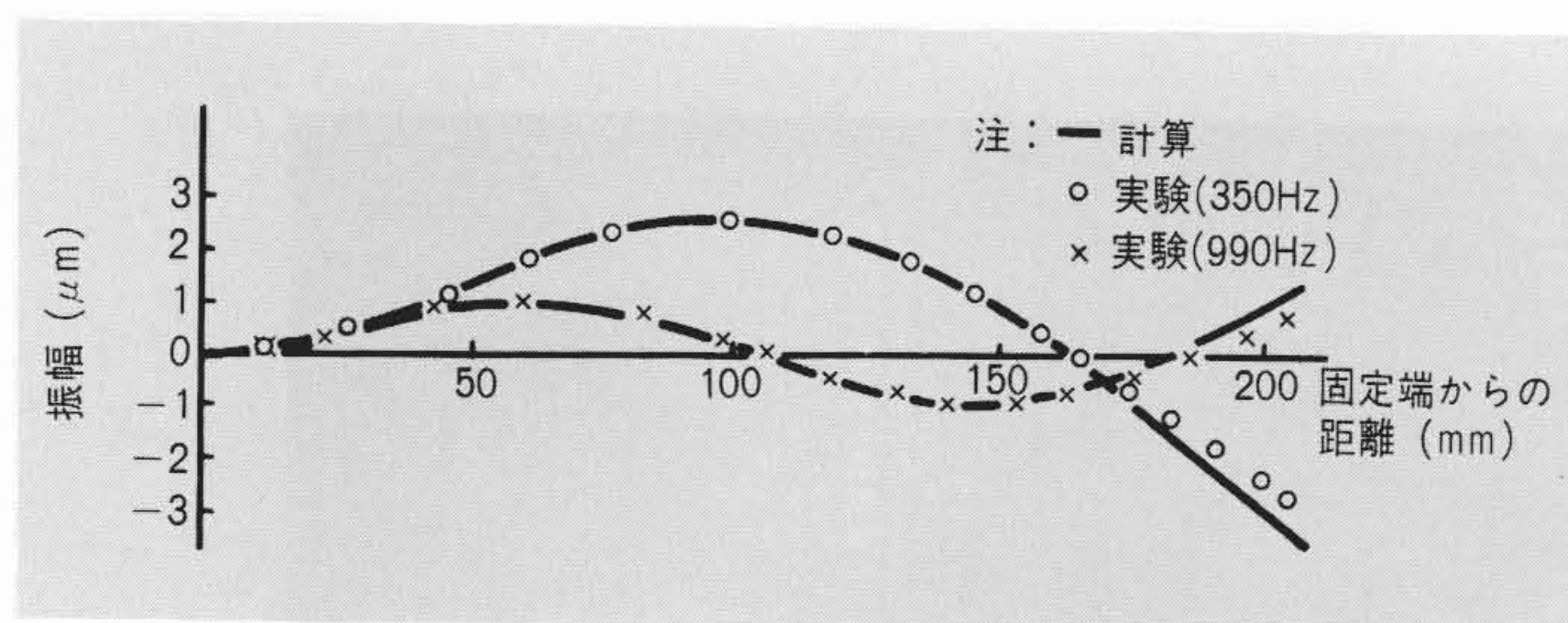


図10 はり曲げ振動における計算値と実測値の比較 自由端を除いてよく一致している。

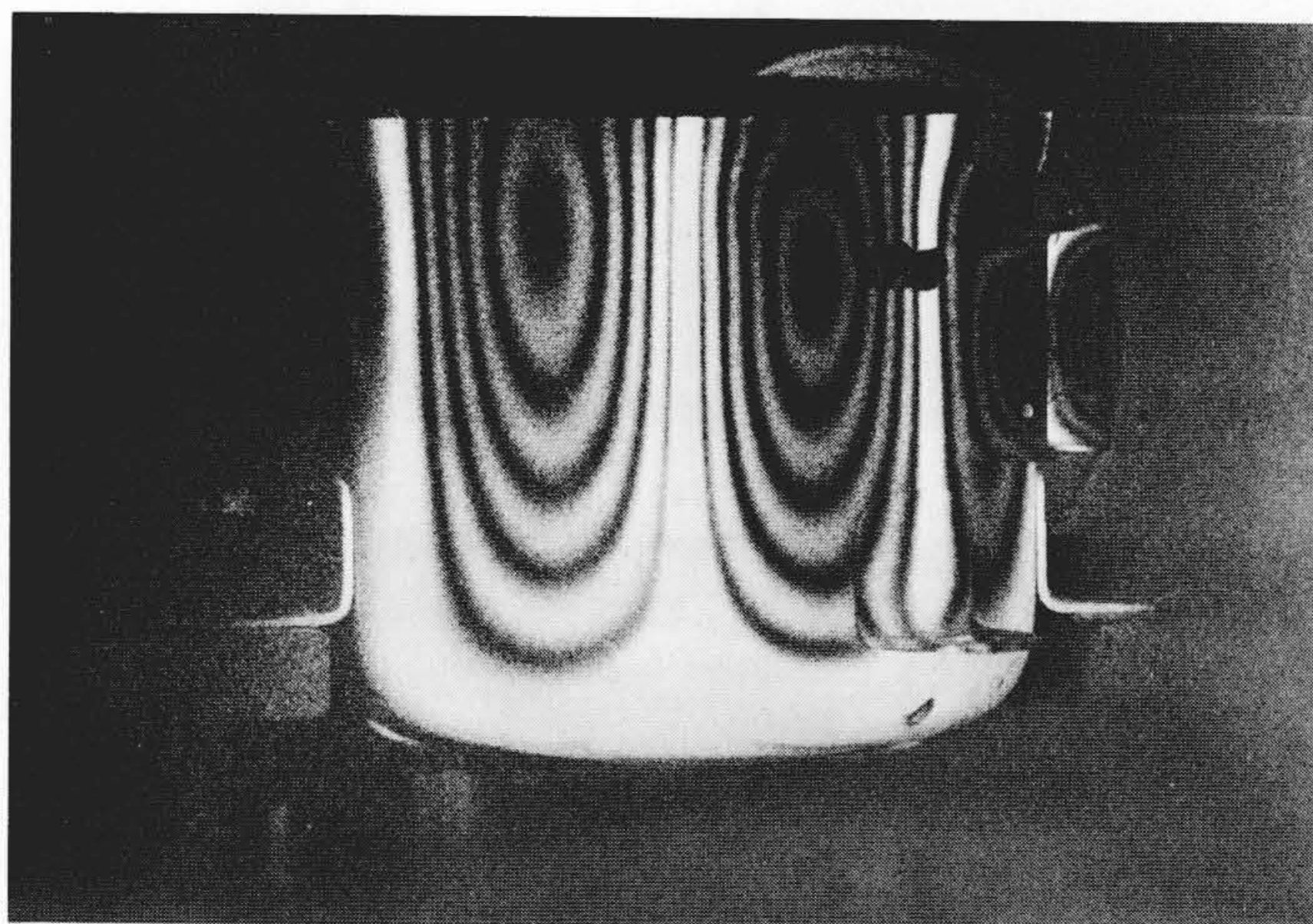
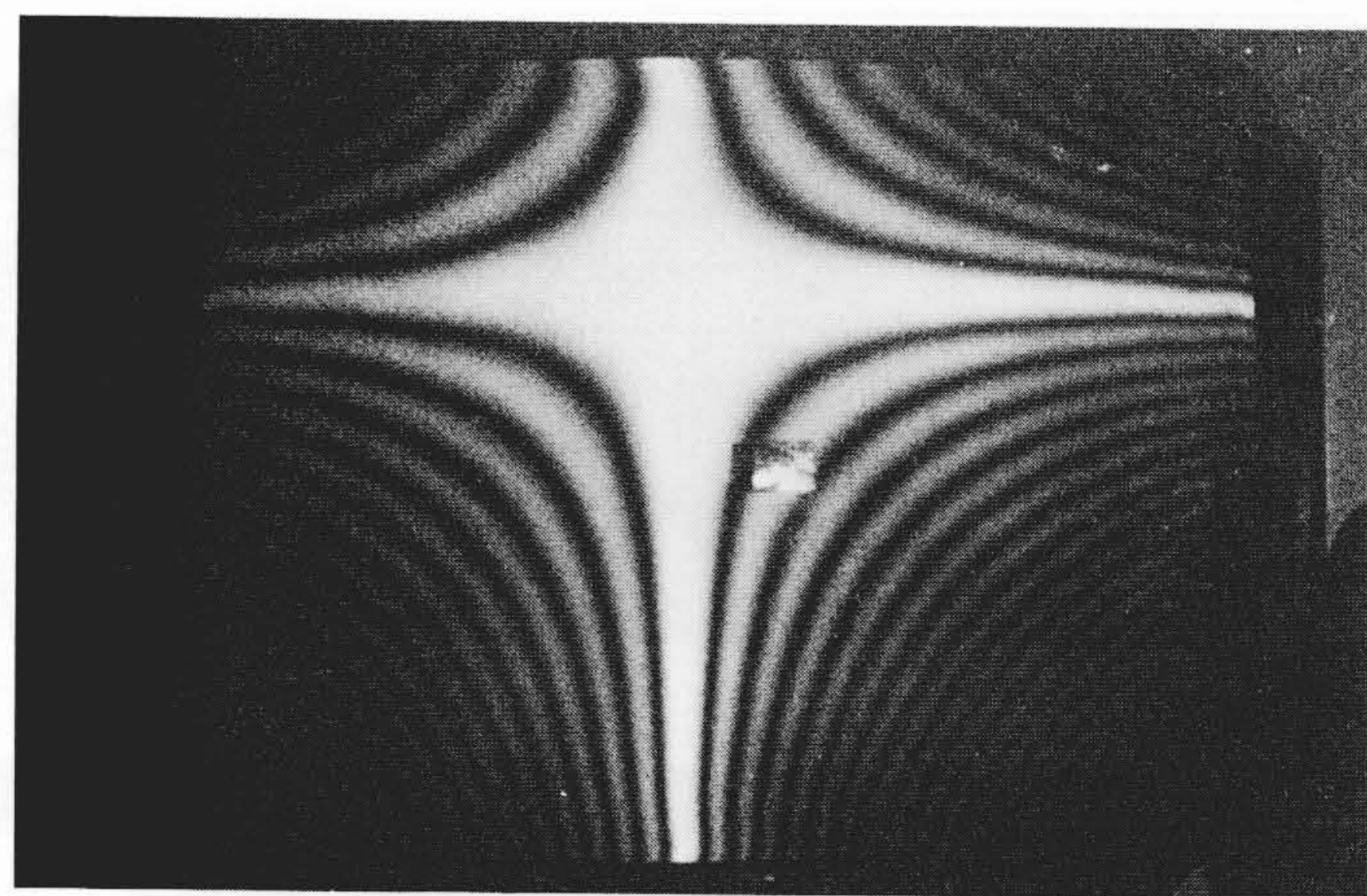
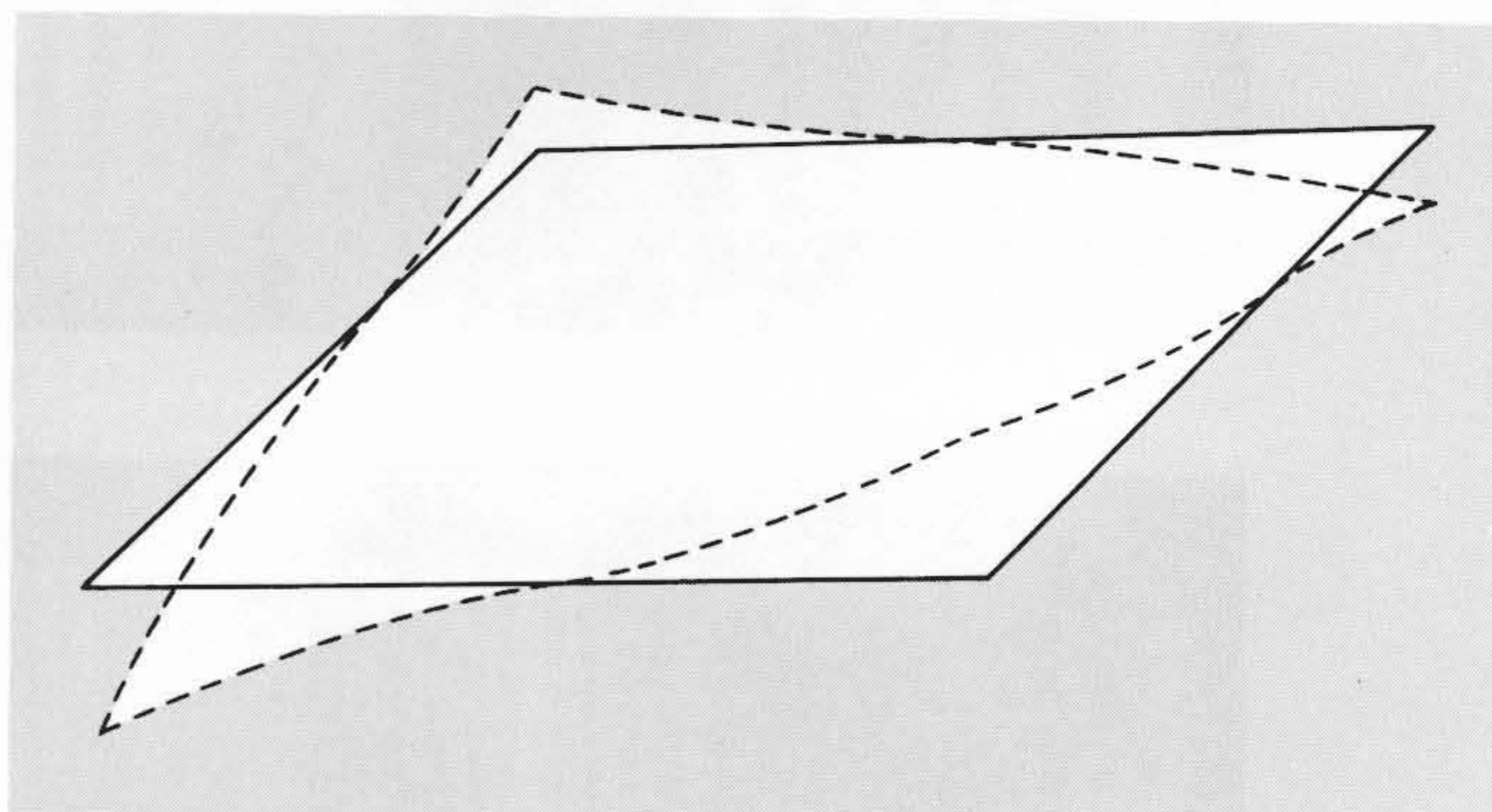


図11 冷蔵庫用圧縮機容器 6分割振動モードを示す。



(a) ホログラフィ計測による一次振動



(b) 有限要素法による一次振動

図13 シャドウマスク (a), (b)図両者のモードは良く一致している。

共振する恐れがあり、このような共振は、色ずれの原因となることがある。このため、シャドウマスクの振動特性及び剛性について実験と理論の両面から種々検討を加えて振動を抑えてきたが、その一つにホログラフィ計測を応用した。図13(a)にシャドウマスクの一次振動モードを示す。このモードの振動は、直交節2本の面外振動である。同図(b)は、有限要素法による計算結果を示すものである。両者のモードには良い一致が見られ、シャドウマスクの振動特性の把握を確かなものにしている。

4 結 言

ホログラフィ計測について、その基礎に簡単に触れ、この計測法の各種製品への応用例について紹介し、ホログラフィ計測法が製品の信頼性向上、あるいは振動騒音の低減に優れた手法であることを示した。更に、微小で複雑な形状を持っている部品についても、変形や振動の把握が必要であり、現在この方面へのホログラフィの活用も進められている。

終わりに、御懇切な御指導をいただいた理化学研究所齊藤弘義主任研究員、及び中島俊典研究員に対し厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 辻内ほか：ホログラフィによる変形の測定，応用物理，37，887（1968）
- 2) Powell, R.L. and Stetson, K.A., : Interferometric Vibration Analysis by Wavefront Reconstruction, J.Opt. Soc. Amer. 55, 1593（1965）

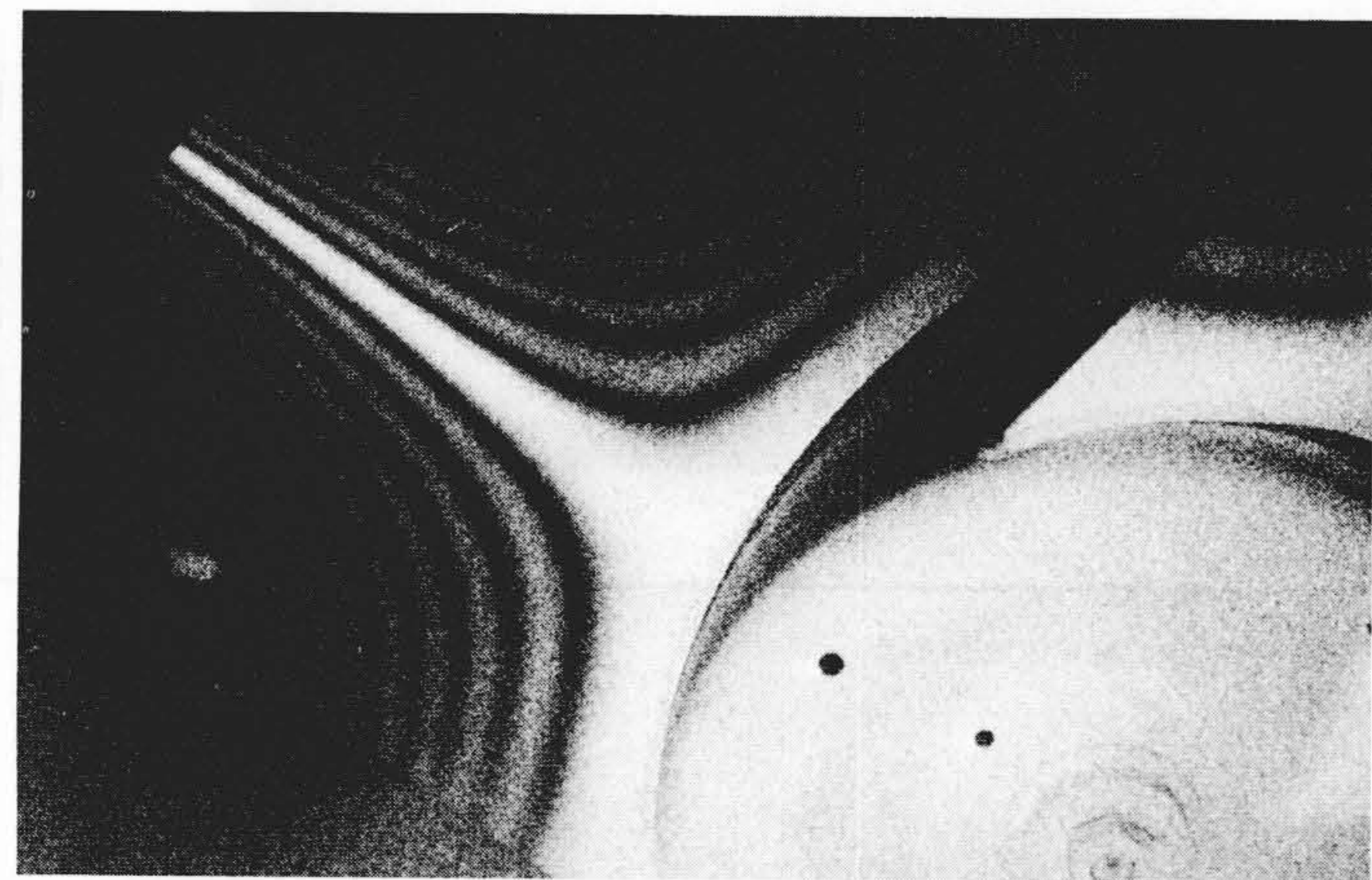


図12 空調機用ファンインペラ 4枚羽根のうち、1枚の羽根の振動モードを示す。

音で強度的にも信頼性の高いことが要求される。強度に関しては、振動によって生ずる応力を低減することが重要である。この応力を低減する一連の基礎研究の中で、ホログラフィ計測によりファンインペラの振動モード及び振幅分布を求めた一例を図12に示す。同図はインペラの1箇所を機械的に加振したときのホログラフィ写真である。

3.2.4 カラーテレビジョンシャドウマスクの振動

カラーテレビジョン用ブラウン管には、内部にシャドウマスクが取り付けられている。スピーカから発生する音のある周波数によっては、周囲の振動と連成してシャドウマスクは