レーザホログラフィの振動計測への応用

明石光一郎*, 村田正義*
Koichiro AKASHI Masayoshi MURATA

1. ま え が き

レーザホログラフィは、三次元像の記録や粗面についての干渉などが可能な画期的光学技術であり、計測、情報処理およびディスプレイなど^{(1)~(3)}の広い分野に応用されている。中でも、振動計測と非破壊検査への応用が最も普及している^{(4)~(7)}。

ホログラフィによる振動計測法が開発されたのは、今から15年前の1964年、アメリカ・ミシガン大学の Powell-Stetson⁽⁷⁾⁽⁸⁾ によってである。それ以来、多くの研究者によって改良と応用の手法がつつぎと提案され⁽⁴⁾、振動計測法としての基礎が築かれてきた。

その後、ホログラフィ装置の製品化⁽⁹⁾がなされるにいたって、基礎研究の段階から実用化の段階

へと漸次進み、ここ数年来、ホログラフィ振動計測法はいろいろの製品の振動特性の計測に活用されめざましい成果を上げつつある。

ここに、ホログラフィ振動計測法の発展を振りかえって、その手法と応用例について解説する。

2. ホログラフィ振動計測法の原理

ホログラフィは、レーザ写真あるいはレンズ無し写真とも呼ばれるように、干渉性の高いレーザ光を利用した写真撮影技術である。そのもっとも重要な特徴は⁽⁶⁾⁽¹⁰⁾、被写体の形状及び幾何学的位置などの三次元空間情報をもつ光波を写真乾板に干渉じまとして記録し（これをホログラムという）、また、任意の時点でもとどりに再生可能という点である。

【筆者紹介】 明石光一郎 昭和3年11月1日生、23年3月宇部工業専門学校機械科卒業、24年三菱重工業株式会社に入社。過給機・蒸気タービンなどターボ機械の実験研究、特に計測技術の開発・研究に従事、現在同社長崎研究所主務。日本機械学会流体力学における視聴覚研究分科会及び燃焼に関するレーザ計測分科会委員、東京大学流れの可視化シンポジウム準備委員会委員、計測自動制御学会正会員。〔趣味〕8mm映画制作、旅行、音楽鑑賞。

【筆者紹介】 村田正義 昭和17年6月17日生、33年4月三菱重工業株式会社に入社、43年3月福井大学工学部応用物理学科卒業。同社長崎研究所にて計測技術の開発・研究、主としてレーザホログラフィ振動計測法の研究に従事し現在にいたる。〔趣味〕テニス、囲碁。

* 正員、三菱重工業株式会社長崎研究所（〒850 長崎市飽の浦町1-1）。

ホログラフィ振動計測法はその特徴を活用した干渉法の応用で、基本的手法として二重露光法と時間平均法の二つがある。

2.1 二重露光法 この方法は供試物体の時々刻々に変化する振動の任意の二つの状態をレーザー写真として二重撮りすることにより、その振動形態の差を干渉じまとして計測するものである。

図1の配置において、レーザー光線を供試物体の振動の二つの代表的状態、たとえば正弦振動の場合、正と負の振幅最大の状態で、2回発射させる。そのレーザー光線を二つにわけて、その一方を照明光として供試物体に照射し、他の一方を参照光として写真乾板に照射すると、その乾板は、まず、第一の状態での供試物体からの反射光（これを物体光という）と参照光とにより露光され、引き続いて第二の状態での物体光と参照光とにより2回めの露光を受ける。そうすると、二つの状態にある供試物体の三次元像がホログラムとして二重に記録される。次に、図2の配置において、ホログラムに参照光だけを照射すると、記録時の供試物体の三次元空間の情報をもつ二つの光波（物体光）が同時に再生される。この二つの物体光は振動形態の差すなわち振動変位に対応した光路差（位相差）をもっているの、これらが重なると干

渉を起こす。

したがって、それを観測者が目視するか、あるいはカメラでのぞくと、その再生像には振動変位に対応した明暗の干渉じまが現れる。

この干渉じまは数式的には式(1)で表される⁽¹¹⁾。二重露光の間の振動変位が物体のp点で $\delta(p)$ 、レーザー光の波長を λ 、暗い干渉じまの次数を n 、ホログラム記録時における照明光と物体光の角度を図3のように表すと、

$$\delta(p) = \frac{\lambda}{2} \frac{(2n-1)}{\cos \theta_1 + \cos \theta_2} \quad \left. \begin{array}{l} n=1, 2, 3, \dots \end{array} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

となる。

二重露光法で得られた干渉じま写真の一例として、図4に遠心送風機インペラの振動モードの測定例（光源：Ruby レーザ）を示す⁽¹²⁾。同図の干渉じまは、振動変位の等高線を示しているが、そのしまの次数 n はその写真だけではわからない。干渉じまの次数の決定にはノードの位置を知る必要がある。

2.2 時間平均法 この方法は、正弦振動して

図1 ホログラム記録の基本配置

図2 ホログラム再生の基本配置

図3 ホログラフィ干渉

図4 二重露光法によるホログラフィ写真（光源に Ruby レーザを使用）

いる物体を連続的に照明することによってレーザ写真をつくり, その振動振幅を干渉じまとして計測するものである。

図1の配置で, 正弦振動している物体を連続照明し, その物体光と照明光を同時に写真乾板に当てて, その振動周期より十分長い時間露光する。そしてその乾板を現像してホログラムをつくる。この場合, 露光中に存在し得る振動変位の値は無数にあるが, その無数の状態のおおのの露光時間は各状態が存在する時間的割合, いいかえれば全露光時間に対する各状態の占有時間の比となる。したがって, 振動速度が零となる正と負の最大振幅状態での露光が最も多く, 振動速度が最も大きい振幅0の状態からの露光は非常に少ない。

再生は図2の配置で行う。ホログラムから無数の状態における物体光が同時に再生されるが, 振動の正と負の最大変位での物体光が最も強く再生され, それ以外の状態の物体光は非常に弱い光となるので, その再生像では, 正と負の最大振幅に対応した物体光が支配的になる。再生された物体光を観測者が目視すれば振動振幅に対応した干渉じまを再生像として見る事ができる。もちろんその再生像はカメラで撮影できる。

この干渉じまは式(2)で表される⁽⁵⁾⁽⁸⁾。振動物体のp点での振幅を $\delta(p)$, ホログラム記録時の照明光と物体光の角度を図3のように表すと, 暗い干渉じまは式(2)を満足する振幅の位置に現れる。

$$\delta(p) = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\rho_n}{\cos \theta_1 + \cos \theta_2} \dots\dots\dots (2)$$

ただし, ρ_n は0次のベッセル関数の0点($\rho_1=$

2.40, $\rho_2=5.52$, $\rho_3=8.63$, $\rho_4=11.99$, $\rho_5=14.93$,), λ : レーザ光の波長である。

時間平均法で得られた干渉じま写真⁽¹³⁾の一例を図5に示す。その暗い干渉じまは等振幅線を表している。図6にその干渉じま写真の見方を示す。

3. ホログラフィ振動計測法の種類

ホログラフィ振動計測法を大別すると, 光源としてHe-Ne レーザあるいはArgon-Ion レーザなどの連続波レーザを用いる連続波レーザホログラフィ法と, Ruby レーザを用いるパルスレーザホログラフィ法とがある。この二つの方法の中で, 現在, 実用に供せられている代表的な方法を表1に示している⁽⁴⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。

ホログラフィ振動計測法として最初に発表されたのは, 1965年 Powell-Stetson による時間平均法である⁽⁹⁾。これは正弦振動状態にある物体のノードラインと等振幅線を, 定量的にパターンとして計測できるという従来にない全く画期的な振動モード計測法であった。この方法は, 連続波レーザが比較的安価であること, 実験テクニックも簡単であることから実用価値が高く, 現在もホログラフィ振動計測法の主流として用いられている。

しかしながら, その当時, ホログラフィの研究の間から時間平均法の特有の問題として次の不具合点が指摘されていた。① 振動振幅が増大するにつれて干渉じまのコントラストが著しく低下するため, 振幅の大きい部分の等振幅線が得られ

図5 時間平均法によるホログラフィ写真

図6 図5に示すホログラフィ写真(時間平均法)の説明

ない, ② 振動モードをリアルタイムで観察できない, ③ 振動の相対位相が不明である. その改善のための数多くの研究が積極的に行われ, 次に述べるような新しい方法⁽⁴⁾が続々提案された.

まずコントラストの良い干渉じまを得る方法として, 1968年 Shajenko らによってストロボ法⁽¹⁶⁾が提案された. この方法は, 物体の振動に同期したストロボ照明光を用いて, 振動1周期中の二点, たとえば正と負の振幅最大の状態にあるときのみを照射して, その物体光をホログラムとして記録するというものである. この方法によれば, 振幅の増大に関係なくコントラストの良い干渉じま(等振幅線)が再生像として得られる. しかしながら, ① ノーダルラインの判別が困難であること, ② リアルタイムの観察ができないこと, ③ 振動の相対位相が不明などの短所がある. また, 回転円板⁽⁴⁾, ポッケルスセル⁽¹³⁾あるいは音響セルなどのストロボ装置が必要である.

リアルタイムで振動モードを観察できる方法としては, 1968年に Archbold らによって, リアルタイムストロボ法⁽⁴⁾が提案された. この方法は振動の無い状態すなわち, 静止物体のホログラムをあらかじめ作成しておき, 次に物体を振動させて, 振動1周期に1回だけ, 例えば正の最大振幅にある状態でストロボ照明を行いながら, 静止物体のホログラムをとおして振動物体を観察するもので, 物体表面に振幅の大きさに対応した干渉じまをリアルタイムで見ることができる.

振動の相対位相を計測する方法としては, 1969年 Aleksoff によって参照光正弦波位相変調法⁽⁴⁾

カット：連続波ホログラフィ実験中

が提案された. この方法では, 正弦振動状態の物体のある1点の振動に同期して参照光の位相を変調させ, 正弦振動物体のホログラムをつくる. その再生像には位相情報と等振幅線を表す干渉じまが得られる.

以上に述べた以外にも, 多くの研究者によって改善及びくふうがなされ, 連続波レーザホログラフィ法のソフトウェアの充実がはかられてきた.

連続波ホログラフィ法の研究と並行して, 1968年ごろから Wuerker らによって, レーザを瞬間的に発射させるパルスホログラフィ法⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾の研究がなされていた. 1970年にいたりホログラフィに使用可能な大出力のしかも干渉性の良い Ruby レーザが製品化されてパルスホログラフィ法の本格的実用化研究が始まった. これは, パルス幅が数十 ns の光パルスを振動に同期して二度続けて

表 1 ホログラフィ振動計測法の種類

方 法		原理	干渉じまの情報	適 用 上 の 制 約		
				振幅範囲	現 象	実 験 環 境
連 続 波 ホログラフィ法	時 間 平 均 法 ⁽⁸⁾	時 間 平均法	ノ ー ド 等 振 幅 線	0.1~1.5 μm 程度	正 弦 振 動	防振定盤及び 暗室が必要
	参 照 光 正 弦 波 位 相 変 調 法 ⁽⁴⁾		相 対 的 位 相			
	ス ト ロ ボ 法 ⁽¹⁶⁾	二 重 (リアルタイム計測)	等 振 幅 線	0.1~3 μm 程度		
	リ アル タイム ス ト ロ ボ 法 ⁽⁴⁾		等 振 幅 線			
パ ル ス ホログラフィ法	ダブルパルス法 ⁽¹⁷⁾	露光法	等 振 幅 線	0.1~30 μm 程度	定 常 } 振 動 非 定 常 } も 可 能	生産現場, 及び 明所でも可能
	回 転 ダブルパルス法 ⁽¹²⁾		ノ ー ド 等 振 幅 線 相 対 的 位 相			

発射するもので、ダブルパルス法と呼ばれている。連続波ホログラフィ法が、ホログラム記録の露光時間に数秒かかるため、防振定盤や暗室を必要とするのに対し、パルスホログラフィ法はこれらが不要となるのみならず生産現場や運転時における振動計測、過渡振動、非定常の振動計測が可能という長所がある。

最近では振動位相の計測ができるダブルパルス法として、Abramson らによるサンドイッチ法など^{(19)~(21)}が報告されている。

4. ホログラフィ振動計測法の応用

4.1 連続波ホログラフィ法 連続波ホログラフィ法は、① リアルタイム計測が可能、② 種類が豊富にあり目的に応じて選べる、③ 干渉じまの解釈が容易、④ 光源の連続波レーザが安定しているので実験計測が容易などの利点があって、実用化が著しく進んでいる。しかし、計測は暗室の防振定盤上で行う必要がある。

従来から行われている加速度ピックアップによる固有モード計測法と比較すると、ノードライン・振幅分布の計測に関し、連続波ホログラフィ法は、計測精度および情報量の面ではるかに優れている。また、労力あるいは計測時間もともに1/5 から 1/10 で実施できるというメリットを持ち合わせている。

連続波ホログラフィ法による各種製品の振動

計測を用途別にみると、蒸気タービン、ガスタービン、ジェットエンジン、空気圧縮機、過給機など回転機械の動翼またはインペラの振動強度問題^{(15) (22)~(24)}、各種小形内燃機関、空調機などの騒音問題^{(25)~(27)}、及びオーディオ機器、楽器などの振動特性問題など^{(28) (29)}がある。そしてホログラフィによる固有振動モードの計測データは、① 振動の基本特性の把握、② 振動応力の評価（曲げモーメント算出による推定）、③ 振動・騒音低減対策立案のための振動特性評価、④ 振動特性計算手法の精度の検証、⑤ 回転機械の動翼、インペラの実負荷振動応力計測のためのひずみゲージてん付位置の決定及び振動応力計測結果の評価などに際して有用な実験手法となっている。

以下に連続波ホログラフィ法による各種製品の振動モード計測例を述べる。

図7は、蒸気タービン低圧段動翼群のホログラフィ写真⁽¹⁴⁾である、(a)は時間平均法によるもの

(a) 時間平均法

(b) 参照光正弦波位相変調法

図7 蒸気タービン低圧段動翼群

図8 過給機羽根根（日立造船会社 藤原裕彦氏提供）

図9 自動車用ディーゼル機関（三菱自動車工業会社 亀谷正郎氏提供）

で、高次の固有振動モードが得られている。翼先端部のノードは、従来の方法では加速度計の接触によりモードの変化をきたすため、計測困難なものであった。図7(b)は、同じ振動状態の参照光正弦波位相変調法⁽¹⁴⁾によるホログラフィ写真である。(a)では、振動の相対位相が不明であるが、この方法によると最も明るい干渉縞は、同位相でしかも同振幅という情報をもっている。(a)と(b)の2枚のホログラフィ写真で、ノード、振幅分布及び相対位相がわかるので翼群としての振動モードが的確に得られている。

図8は、時間平均法による過給機羽根車の高次振動モードである。図9は、自動車用ディーゼル機関のホログラフィ写真であるが、ディーゼル機関特有の複雑な振動モードが把握されている。

図10は、ターボジェットエンジン動翼のかなり高次の振動モードで、パネルモードとも呼ばれ

る複雑な振動モードである。

図11は自動車エンジンのヘッドカバーの振動モードの例である。

4.2 パルスホログラフィ法 パルスホログラフィ法は、防振定盤及び暗室が不要で、しかも非定常振動計測への応用も可能との特徴があり、連続波ホログラフィ法に比べて、適用範囲ははるかに広い。

この方法の用途は、連続波ホログラフィ法とほぼ同じであるが、計測対象の振動の種類、実験条件は全く異なっている。連続波ホログラフィ法が防振定盤にある物体の正弦振動を計測対象としたのに対し、パルスホログラフィ法では、①生産現場における各種製品の正弦振動⁽¹²⁾、②運転時

図10 ターボジェットエンジン動翼
(石川島播磨重工業会社
青野比良夫氏提供)

図11 自動車エンジンのヘッドカバー (いすゞ自動車会社 落合一臣氏提供)

(a)

(b)

図12 乗用車ボデー (ダブルパルス法)

図13 自動車用ディーゼル機関 (モータリング時、ダブルパルス法)

内燃機関のクランクケースのような強制定常または非定常振動^{(12) (32) (33) (34)}, ③ インパクト加振時の過渡振動^{(30) (31)}, ④ 回転中の動翼やインペラの共振または強制定常振動⁽³⁵⁾などが取扱われている。しかし、適用上の問題として、光源の Ruby レーザの発振調整にかなりの時間を要すること、及びダブルパルス法以外の計測手法が実用に供せられるほどに整っていないなど、現在のところ不具合点がある。

図 12 は、乗用車ボデーのダブルパルス法によるホログラフィ写真で⁽¹²⁾, (a) が上面, (b) が側面から見た振動の等振幅線を示している。パルスホログラフィ法によって実車（全長約 4 m）が 1 枚のホログラムに記録され得ている。もちろん、防振定盤は不要である。

図 13 は、自動車用ディーゼル機関のモータリング時の振動をダブルパルス法により計測した例である⁽¹²⁾。この場合の振動は、多くの周波数成分からなる複合振動であるので、干渉じまとして表されている等振幅線は、複合振動としての振動モードを示している。

5. む す び

振動計測におけるホログラフィ法は、既に実用化の段階であるが、パルスホログラフィ法は、ハード、ソフト共に今後いっそうの進歩が期待される技術である。

レーザ光源も当初の数十 mW の He-Ne レーザからせん頭出力数十 MW の Ruby レーザへと進歩し、ホログラフィ装置も最近では従来の写真乾板に代わって、サーモプラスチックホログラム装置が開発されている。さらに回転物体の振動計測法が発表されるなどますます発展しつつある。今後は、ホログラフィ写真の自動解析処理技術も開発されてゆくであろう。

しかしながら、ホログラフィ振動計測法は、以上述べてきた種々の優れた計測技術に加うるに、ホログラフィデータ解析法のソフト面の開発が伴って初めて成果がみられるものである。

おわりに、美事な写真を提供していただいた日立造船の藤原裕彦氏、三菱自動車の亀谷正郎氏、石川島播磨重工の青野比良夫氏及びいすゞ自動車の落合一臣氏に厚くお礼申し上げる。

（原稿受付 昭和 54 年 9 月 13 日）

文 献

- (1) 田中, 計測と制御, 5-4 (昭 41-4), 242.
- (2) 辻内, (久保田編), 光学技術ハンドブック, (昭 43), 200, 朝倉書店.
- (3) 村田, ホログラフィ入門, (昭 51-10), 152, 朝倉書店.
- (4) 中島, 応用物理, 41-6 (昭 47-6), 560.
- (5) 村田, 機械の研究, 28-10 (昭 51-10), 1164; 28-11 (昭 51-10), 1297.
- (6) 斎藤, 非破壊検査, 20-9 (昭 46-9), 507; 20-10 (昭 46-10), 557.
- (7) Stetson, K.A., (ed. Erf, R.K.), *Holographic Nondestructive Testing*, (1974), 181, Academic Press.
- (8) Powell, P.L. and Stetson, K.A., *J. Opt. Soc. Amer.*, 55-12 (1965-12), 1593.
- (9) 鈴木・金谷, 光学技術コンタクト, 15-4 (昭 52), 11.
- (10) 斎藤, 機誌, 78-682 (昭 50-9), 826.
- (11) 深堀・ほか 2 名, 三菱重工技報, 8-3 (昭 46-5), 405.
- (12) 明石・ほか 3 名, 機講論, No. 788-2 (昭 53-5), 25.
- (13) 深堀・ほか 2 名, 三菱重工技報, 9-3 (昭 47-5), 304.
- (14) 山本・ほか 2 名, 三菱重工技報, 10-3 (昭 48-5), 318.
- (15) 山本・村田, 三菱重工技報, 12-6 (昭 50-11), 680.
- (16) Shajenko, P. and Johnson, C.D., *Appl. Physics Letters*, 13-1 (1968-1), 44.
- (17) Wuerker, R.F. and Heflinger, L.O., *S.P.I.E. Journal*, 9 (1971-5), 122.
- (18) Wuerker, R.F. and Heflinger, L.O., (ed. Robertson, E.R. and Harvey, J.M.), *The Engineering Uses of Holography*, (1970), 99, Cambridge Univ. Press.
- (19) Abramson, N. and Bjelkhagen, H., *Appl. Optics*, 17-2 (1978-1), 187.
- (20) Holloway, D.C., ほか 2 名, *Appl. Optics*, 17-8 (1978-4), 1213.
- (21) 村田・ほか 3 名, 機講論, No. 788-2 (昭 53-5), 28.
- (22) Hockley, B.S. and Butters, J.N., *J. Mech. Engng. Sci.*, 12-1 (1970-1), 37.
- (23) Brandt, G.B., *Optical Spectra*, 4 (1970-10), 26.
- (24) 藤原・ほか 2 名, 内燃機関, 17-6 (昭 53-6), 9.
- (25) 長松・ほか 2 名, 精密機械, 44-9 (昭 53-9), 75.
- (26) 平野・村田, 昭和 50 年度日本冷凍協会学術講演会論文集, (昭 50-11), 55.
- (27) 熊沢・ほか 3 名, 日立評論, 59-10 (昭 52-10), 863.
- (28) Reinicke, W. and Cremer, L., *J. Acous. Soc. Amer.*, 48-4 (1970), 988.
- (29) Ågren, C.-H., *J. Acous. Soc. Amer.*, 51-6 (1972), 1971.
- (30) Aprahamian, R., ほか 3 名, *Exp. Mech.*, 11-6 (1971-6), 309.
- (31) Aprahamian, R., ほか 3 名, *Exp. Mech.*, 11-8 (1971-8), 357.
- (32) Monnier, D.J. and Jones, K.D., *Laser Focus*, 8-12 (1977-12), 72.
- (33) Levin, R., *Electro-Opt. Systems Design*, 8-4 (1976-4), 31.
- (34) Felske, A. and Happe, A., *SAE Paper*, No. 770030 (1977-3).
- (35) MacBain, J.C., ほか 3 名, *Exp. Mech.*, 19-1 (1979-1), 17.