

土木工学分野におけるレーザー光の応用

三 木 千 寿*

はじめに

レーザー光線は普通の光とどう違うか。

ろうそくや白熱灯のような通常の光源から放射される光は、太陽の光と同様に高温の物体から出てくる連続スペクトルの光であり、波長の不ぞろいな波からなっているレーザーは、ちょうどトランジスタや真空管発振器の出すラジオ波と同じように、いくらでも長くつづく正弦波を発生する。レーザー光がこのように時間的に一定の

振動となっていることを、時間的にコヒーレントであるという。レーザー光は時間的にコヒーレントであるだけでなく、空間的にもコヒーレントである。すなわち、1本のレーザー光の別々の部分の間にも一定の位相関係が保たれているということである(図-1)。

このようなレーザー光のコヒーレント性、あるいはそれから得られる強力なパワー密度および指向性のよさを利用して、通信、計測、超精密加工、医療技術、核融合など非常に広範囲な応用が研究され、実用化されつつある。本文はこれらのうち、土木工学分野の研究、あるいは現場に関係が深いと思われる項目について紹介するものである。

1. 高輝度と指向性のよさの応用^{1), 2), 3)}

レーザー光はレンズや反射鏡を用いることにより集光することができ、また平行光線にすることができる。そしてその光はほとんど広がることなく、直線的に遠方まで進むので、測量や、土木工事の基準線として利用できる。レーザー光は目で見えることより通信連絡の手間が省け、また長時間継続して照射しておくことが可能なため労力も大きく節約でき、トンネル内の測量、長距離にわたるパイプラインの設置、あるいは海上での浚渫船や浮上物の位置決定などに有効な手段である。またレーザー光で物体を照射し、別の角度からトランシットを使っ

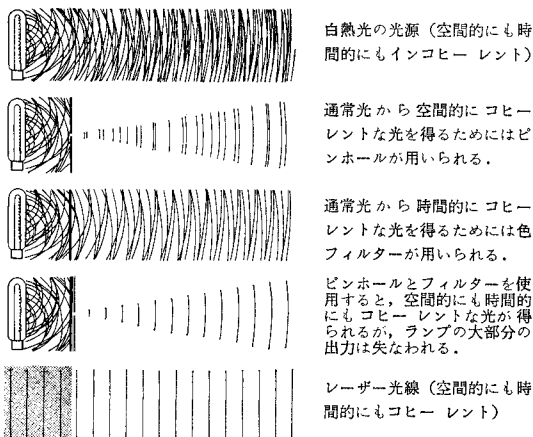


図-1 通常光とレーザー光の比較¹⁾

* 正会員 工修 東京工業大学 助手 工学部土木工学科

て物体とレーザー光の交差点を観測することにより、三次元的な測量を行うことができる。

レーザー光を使うことにより、大気中の汚染物質の分布や動きを、遠距離から調べることもできる。パルスレーザー光〔継続時間が0.3ピコ秒 (0.3×10^{-12} 秒) というような短いパルスレーザー光も作られている〕を大気中に放射し、ちょうどレーダーで雨や雲を観測するのと同じように、散乱された光を受信する。この反射されてきた光を分析することにより、光の通路における汚染物質の濃度変化を知ることができ、広大な地域の汚染の度合いの監視、あるいは特別な汚染物質の源を見つけ出すことが可能となる。

2. コヒーレント性の精密計測への応用²⁾

コヒーレント光線は正弦波的な波動とみなすことができ、したがってその波長を λ 、速度を c とすれば、周波数は c/λ となり、この波動は任意の点で $A \exp[i(2\pi c t/\lambda + \varphi)]$ という形で表わすことができる。Aは振幅で光の強さはAの自乗に比例し、 φ は位相で光線に沿って距離 z だけ動くとして $2\pi z/\lambda$ だけ変化する。

レーザーの出現以前におけるコヒーレント光の主な応用は干渉計であった。図-2に示すようにコヒーレ

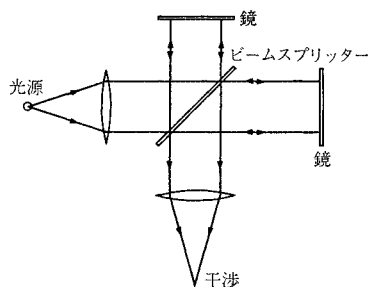
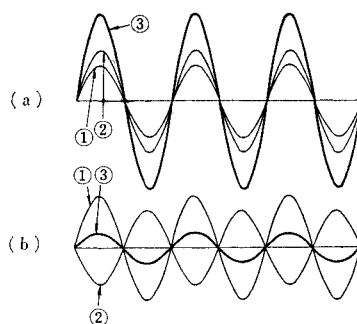


図-2 干 渉 計



a) 二つの波①、②が同位相で到着した場合の合成波③
b) 二つの波①、②が逆位相で到着した場合の合成波③

図-3 光 波 の 干 渉

ントな光をビームスプリッターで二つに分け、それぞれを鏡で反射して1点に戻すと、光路差によって二つの光波は干渉を起こす。すなわち、同相で重ね合わされると個々の振幅の和の自乗が、また逆位相の場合は振幅の差の自乗が観測される光の強さに比例する(図-3)。この干渉を利用すると鏡の位置の変化を光の波長程度の精度で検出できるので精密測長に適しており、長さの国際標準も金属製のメートル原器は廃止され、クリプトン86を光源にしてその波長を干渉によって測定する方法におきかえられている。

同一光源から出た二つの光波を重畳したとき、光路差がある以上となると干渉は生じない。この干渉を起こす光路差の範囲は、光源の可干渉距離(コヒーレント長)で決まり、可干渉距離は光のスペクトル幅が狭いほど長くなる。したがって干渉性をよくするためには、単色性の優れた光源が必要で、そのために水銀、カドミウム、クリプトンなどの同位体を用いた放電ランプが用いられる。しかしこれらでは大きな光路差を測定することは不可能で、たとえば高圧水銀灯の場合は数分の1mm以内、スペクトルランプ(カドミウム蒸気)で約30cm

表-1 代表的なレーザー光

種 類	発 振 波 長	備 考
ガスレーザー	ヘリウム-ネオン (He-Ne) 6 328 Å (赤色)	連続発振で安定したガスレーザー、比較的安価。コヒーレント長 20~30 cm のものが容易に得られる。 連続発振 大出力、大気窓(大気中を通過するとき損失が小さい)
	アルゴン (Ar) 4 880 Å (青色)	
	5 145 Å (緑色)	
	炭酸ガス (CO ₂) 106 000 Å (10.6 μ)	
金属蒸気レーザー	カドミウム (Cd) 4 416 Å (青色)	
固体レーザー	ルビ 6 943 Å (赤色)	パルス状のレーザー、10 μsec 程度の単一パルスを取り出すことができ、動体のホログラフィーに適する。 大出力
	ネオジウム-ヤグ (Nd-YAG) 10 600 Å (1.06 μ)	
	ネオジウム-ガラス 10 600 Å (1.06 μ)	
液体レーザー	色素レーザー 3 400 Å~1.17 μ	連続的に波長が変えられる。
半導体レーザー	ガリウム-ヒ素 (Ga-As) 8 000 Å~9 000 Å	小型、高効率、レーザー通信用

発振が確かめられているレーザーの波長は水素ガス (H₂) の 1 500 Å からシアン化水素ガス (HCN) の 773.5 μ まで

以内である。

レーザーは基本的には光を増幅する媒質を2枚の反射鏡ではさんだ構造をもち、媒質の増幅作用と、反射鏡による帰還作用とによって特定の波長の光線が共振し、持続した波として取りだされる。そのために通常の光源と比べるとレーザー光線はコヒーレント性の点で優れており、またサブミリ波から紫外まで広い範囲にわたるいろいろな波長で安定したもののが得られる⁹⁾(表一1)。したがってレーザー光を用いると理論上は数百 km もの光路差をとることが可能となり(現在数 m まで可能)、長距離での干渉測定が現実のものとなる。現在この方法を応用して、ダムの水圧変動に伴う変位測定、あるいは断層に沿った地盤の変動、地殻の微小変形を測定して地震予知などの研究が行われている。

光路差(測定したい変形量)が光の波長を越える場合は、干渉によって生じる明暗が繰り返されるのを数えなければならない、そのための自動計測装置も開発されている。この装置を用い、ドプラー効果を利用することで、干渉計の一方の鏡の移動速度を測定する方法はよく知られている。レーザーを光源として使用すると、動いている紙からの散乱光や、パイプ中を移動する流体、さらには大気中を動く空気からの散乱光などと、元の光の干渉からうなり周波数を検出することができ、これから散乱物体の速度を測定することができる。

図-4 はドプラーシフトを利用するレーザー流速計の概略を示すものである。流体中に微粒子の散乱体を入れ(普通の水などの場合、ゴミなどの不純物が含まれているので必要ない)、レーザー光を照射すると、光の一部は通過し、一部は散乱する。この散乱光はドプラーシフトを受けるため、二光線を一点に集めたときのうなり周波数から、流速を知ることができる。W. Johnston⁵⁾らは、この方法で多孔質物体中の流速分布を測定している。

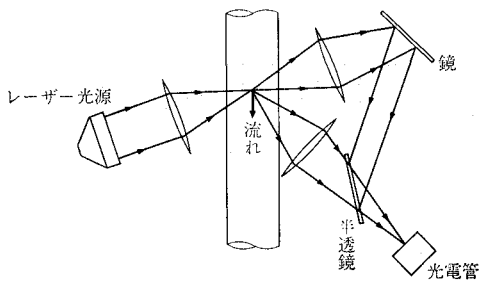


図-4 レーザー流速計

3. 光学的フーリエ変換^{6), 7)}

光学レンズは画像のフーリエ変換機能をもっている。すなわち空間的な強度透過率分布、あるいは振幅透過率分布をもつ。たとえば写真のような透明画 (transpar-

ency) をコヒーレントな平行光線で照射してレンズをとおすと空間周波数を座標軸とし、各点の光強度がもとの画像の該当する空間周波数成分に比例した光パターンが得られもとの画像の空間フーリエ変換像が得られる。

図-5 に示すように、レンズ L から d の位置の面 P_1 に振幅透過率が $g_A(x, y)$ で表わされる透明画をおき、波長 λ のレンズ主軸に平行なコヒーレント光で照射すると、L の焦点面 P_2 には次のような振幅分布が生じる。

$$u_A(\xi, \eta) = \text{const.} \exp \left[2\pi i \frac{\xi^2 + \eta^2}{2\lambda f} \left(1 - \frac{d}{f} \right) \right] \cdot \iint_{-\infty}^{\infty} g_A(x, y) \exp[-2\pi i (\xi x + \eta y) / \lambda f] dx dy \\ = \text{const.} \exp \left[2\pi i \frac{\xi^2 + \eta^2}{2\lambda f} \left(1 - \frac{d}{f} \right) \right] G_A(\mu, \nu)$$

$G_A(\mu, \nu)$ は $g_A(x, y)$ のフーリエ変換であり、変数 (μ, ν) は空間周波数で、 P_2 面の実寸座標を (ξ, η) とすれば、

$$\mu = \xi / \lambda f, \nu = \eta / \lambda f$$

の関係がある。とくに P_1 面がレンズ L の物体側焦点面に相当する場合は $d = f$ となり、

$$u_A(\xi, \eta) = \text{const.} G_A(\mu, \nu)$$

と正しいフーリエ変換が得られる。光の強さはこのフーリエ変換の振幅の自乗、すなわち $g_A(x, y)$ のパワースペクトルであり、単に写真フィルムを焦点面にとりつけるだけで $g_A(x, y)$ のパワースペクトルを表わす透明画を作ることができる。この性質の土木工学分野への適用の可能性は、日野⁸⁾によりすでに指摘されている。

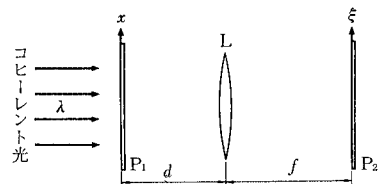


図-5 フーリエ変換

図-6 は空間周波数フィルタリングとよばれる光学情報処理システムであり、次のことを表わしている。

- 1) 点光源 P から出たコヒーレント光がレンズ L_0 で平行光線となる。
- 2) 平行光線がレンズ L_1 の物体側焦点面においた入力画像 $g_A(x, y)$ を照射し、そのフーリエスペクトル $G_A(\mu, \nu)$ がレンズ L_2 の焦点面 P_2 に生じる。
- 3) $G_A(\mu, \nu)$ に適当な振幅透過率 $T_A(\mu, \nu)$ をもつフィルターを重ねて、フーリエスペクトルを $G_A(\mu, \nu) \cdot T(\mu, \nu)$ と変化させる。
- 4) さらにこれをレンズ L_2 を用いてフーリエ逆変換を行い、 P_3 面に、

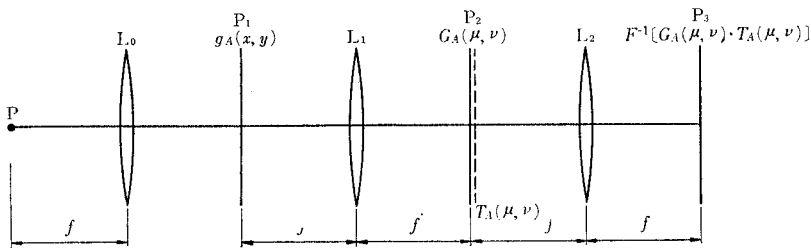


図-6 空間周波数フィルタリング

$$g_A'(x', y') = \iint_{-\infty}^{\infty} G_A(\mu, \nu) \cdot T(\mu, \nu) \cdot \exp[2\pi i(\mu x' + \nu y')] d\mu \cdot d\nu = F^{-1}[G_A(\mu, \nu) \cdot T_A(\mu, \nu)]$$

を得る。

目的に応じたフィルターを選ぶことにより、不鮮明写真の鮮明化、写真像からの雑音の除去、あるいは画像の微分など多種の処理が可能である。

光学的フーリエ変換の応用は光学情報処理の一部であるが、このような光学的手法は二次元的な処理が瞬時に行えること、直接視覚に訴えることなどから、今後多く利用されるものと考えられる。

4. ホログラフィー^{7), 9), 10), 11)}

光が物体を照射すると、その振幅および位相が空間的に変調され、振幅は物体の明るさの、位相は物体のある位置や奥行の情報を与える。普通の写真は、照明された三次元光景を光を感じる平面上に、レンズなどの結像装置を使用し、反射光の強さ（振幅の自乗値）からなる二次元像として記録するもので、位相に関する情報は失われてしまい、その光景の立体感は得られない。

ホログラフィーは、物体から反射される光（物体光）の振幅と位相の情報を同時に記録し（これをホログラムとよぶ）、次にそのホログラムを照明することにより、記録した光の波面そのものを再生する技術である。また記録するとき、レンズなどの結像装置を使用しないことも特徴の一つである。ホログラフィーの記録も普通の写真と同じく、光の強度のみにしか感度をもたない乾板に行われるが、物体光の波面を変調をうけていない光（参照光）との干渉縞の強度分布として記録することがその原理である。したがって、光源にはコヒーレント光が必要となる。

ホログラフィーの基本的な概念は、1948年にD. Gabor^{12), 13), 14)}によって考案された。これは電子顕微鏡の分解能を高める目的で考えられたもので、電子線の物体による回折波と、参照波として物体のまわりを通過したバックグラウンド波の干渉縞を写真に記録し、それを

この型のホログラフィーはあまり発展しなかった。

現在のホログラフィー技術の端緒となったのは、1962年のE.N. Leith^{15), 16)}らの報告である。1960年ころからレーザーの開発が進み、良好なコヒーレント光源が得られるようになったことによって、E.N. Leithらは物体からの回折波と、物体の側方をとる傾むいた参照波との干渉によりホログラムを作り、再生も斜めの照明光により像を得る方法を考案し、D. Gaborの方法のもつ欠点を一挙に解決したものである（図-8）。

図-9に示すごとく、ホログラフィーの記録は一般に一つの光源をビームスプリッターで2本にわけ、一方の光線で物体を照射して物体光を写真乾板に受け、もう一方の光線を参照光として直接写真乾板を照射すること

光で照射し、拡大された光学像として再生したものである（図-7）。これにより物体の像を三次元で観察することには成功したが、不必要な回折波を分離することが困難なため良好な再生像は得られず、またコヒーレント性のよい光源もなかったため、その後

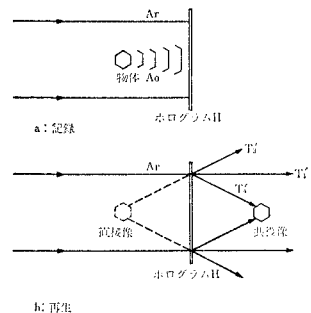


図-7 D. Gabor のホログラフィー

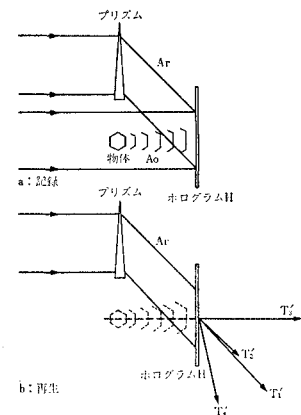


図-8 E.N. Leith, J. Upatnieks のホログラフィー

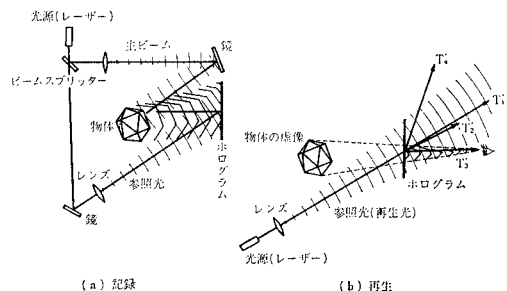


図-9 ホログラフィーの記録と再生

により行われている。物体で回折され、写真乾板 H に到達する物体光の複素振幅を $A_0(x, y)$ 、参照光の複素振幅を $A_r(x, y)$ 、それぞれの波面の振幅分布と位相分布を $a_0(x, y)$ 、 $\phi_0(x, y)$ 、 $a_r(x, y)$ 、 $\phi_r(x, y)$ とすると

$$A_0(x, y) = a_0(x, y) \exp[i\phi_0(x, y)]$$

$$A_r(x, y) = a_r(x, y) \exp[i\phi_r(x, y)]$$

と表わせる。 A_0 と A_r の重ね合せにより生じる干渉縞の強度分布を $I(x, y)$ とすると、

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |A_r(x, y) + A_0(x, y)|^2 \\ &= |A_r(x, y)|^2 + |A_0(x, y)|^2 + A_r^*(x, y) \cdot A_0(x, y) + A_r(x, y) A_0^*(x, y) \\ &\quad (\ast \text{ 共役複素数を示す}) \end{aligned}$$

となり、 a_0 、 a_r 、 ϕ_0 、 ϕ_r で示すと、

$$\begin{aligned} I(x, y) &= a_r^2(x, y) + a_0^2(x, y) + 2 a_r(x, y) \\ &\quad \cdot a_0(x, y) \cos[\phi_r(x, y) - \phi_0(x, y)] \end{aligned}$$

となる。

上式で $a_r^2(x, y)$ と $a_0^2(x, y)$ はそれぞれ参照光と物体光が乾板面に単独に到達したときの強度であり、したがって $a_r^2 + a_0^2$ は干渉縞の平均の明るさを示すことになる。

第3項が物体光と参照光の振幅と位相の情報を含んでおり、干渉縞の強度変化の振幅が $2 a_r \cdot a_0$ で、位相が $\phi_r - \phi_0$ で与えられることを示している。この干渉縞の強度 $I(x, y)$ を記録した写真乾板がホログラムである。

写真ではその露光量 E と、現像処理後の乾板の振幅透過率 T には 図-10 に示すような関係があり、露光量 E は露光時間を一定とすれば I に相当する。したがって露光量を直線範囲として作られたホログラムの振幅透過率 T は次式のように表わせる。

$$\begin{aligned} T(x, y) &= k_0 + k_1 I(x, y) \\ &= (k_0 + k_1 |A_r|^2) + k_1 (|A_0|^2 + A_r^* A_0 + A_r A_0^*) \\ &= T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \end{aligned}$$

物体光波面を再生するには、このホログラムにコヒーレント光を照射すればよく、再生光は参照光と同じ光が

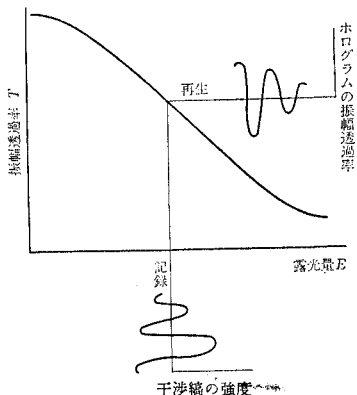


図-10 露光量と振幅透過率

用いられることが多い。そのときの透過した光の振幅分布 $T'(x, y)$ は次のように表わせる。

$$\begin{aligned} T'(x, y) &= A_r \cdot T(x, y) \\ &= \{k_0 + k_1 |A_r|^2\} A_r + k_1 |A_0|^2 A_r \\ &\quad + k_1 |A_r|^2 A_0 + k_1 A_r^2 A_0^* \\ &= T_1' + T_2' + T_3' + T_4' \end{aligned}$$

上式において第1項 $T_1' = \{k_0 + k_1 |A_r|^2\} A_r$ は再生光が一定の減衰をうけてそのままホログラムを透過する光に相当し（0次回折光）、第2項 $T_2' = k_1 |A_0|^2 A_r$ は物体光の振幅の情報は含んでいるが、位相の情報は失なっている。第3項 $T_3' = k_1 |A_r|^2 A_0$ は物体光とまったく同じ波面 A_0 に $k_1 |A_r|^2$ の減衰がかかっているだけであるので物体光の再生に相当し（一次回折光）、ホログラムを記録したときに物体があった位置から、あたかも射出しているごとく透過する回折光である。この再生波は、もとの物体と同じものをホログラムの後方に結像していることになるので、この再生像を直接像とよんでいる。第4項 $T_4' = k_1 A_r^2 A_0^*$ は、物体光と共役な光波 A_0^* が $k_1 A_r^2$ の変化をうけて出てくることを示している。これは共役なことより、ホログラム面に対し直接像と対称な共役像を形成する性質をもっているが、その係数 $k_1 A_r^2 = k_1 a_r^2(x, y) \exp[2i\phi_r(x, y)]$ は、 A_0^* の振幅に対して $k_1 a_r^2$ 、位相に対して $2\phi_r$ の変化を与えるので、共役像とは異なった方向に、ゆがんだ実像を形成することになる。

ホログラフィーでは、三次元物体は三次元の像が現われ、その形状や位置はレーザー光の可干渉距離だけで決まるため、その物体を完全に再生しているといえよう。したがって側面や、陰にかくれた物体を視線を動かすことよりのぞき見ることができるし、遠近に応じて視差も生じる。また位相も記録していることから、次に述べる干渉測定が可能となる。

5. ホログラフィー干渉法^{7), 9), 10), 11)}

標準状態の物体から反射する波面をホログラムに記録しておけば、物体に変化を与えた状態での波面が得られたとき、いつでも標準状態の波面を再生させて、その両者を干渉させることができる。こ

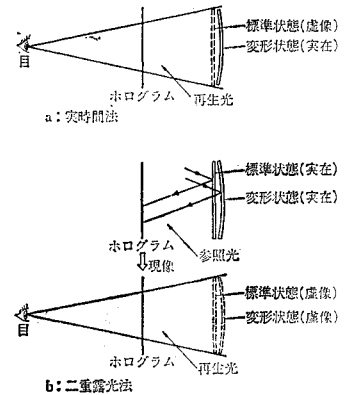


図-11 ホログラフィー干渉法

れがホログラフィー干渉法であり、次の二つの方式がある（図-11）。

① 実時間法（再生波を基準として用いる方法）

標準状態の波面をホログラムに記録し、現像後もとの位置に正しく取りつけ、参照光と同じ光で再生する。再生された波面と変化後の物体からの波面を干渉させる。

この方法は、一度標準状態のホログラムを作りさえすれば、物体の変化を実時間で観測できる（live fringe）長所がある。しかし、ホログラム現像のときおこる乾板のわずかな変形が、測定誤差を生じるおそれがあること、現像後のホログラムをもとの位置にもどすとき、その位置合わせに高精度が要求されること、などが欠点とされている。

② 二重露光法（同一乾板への重ね写し）

標準状態からの波面と、変形後の波面を、同じ乾板の上に重ね写しする。現像後のホログラムからは標準状態と変形状態が同時に再生され、干渉縞が観測される。

この方法は乾板現像による誤差がなく、取付けの精度もさほど問題にはならないが、変化の実時間観察が不可能である（frozen fringe）。

ホログラフィー干渉法の特徴の一つに、粗面の干渉測定があげられる。ホログラフィー干渉法では対象物は光学的に研磨された面である必要はなく、ありふれた粗面でよい。すなわち粗面がある変形をしたとき、変形前後の波面を重ねてやれば変形に相当する干渉じまが生じ、粗面の凹凸によるランダムな位相分布は打ち消されて、干渉縞には影響しない。このことはこの手法の適用範囲を大きく広げることとなる。

物体表面に特別な処理を施す必要もなく、粗面のままの実物を対象にできる点、また光波長単位の精密測定ができて、弾性域での微小変形に十分感度があることなどから、変形の測定はホログラフィー干渉法の特長を生かした応用であろう。

図-12 は斎藤ら¹⁷⁾により行われた実験装置であり、

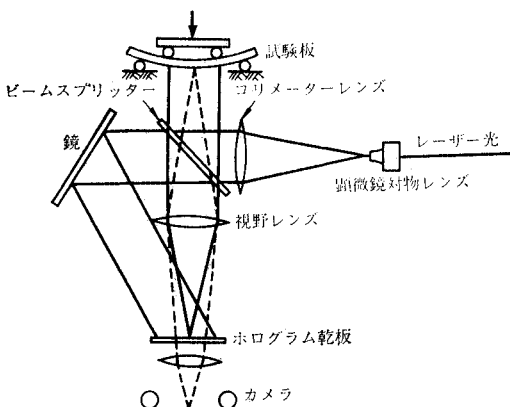
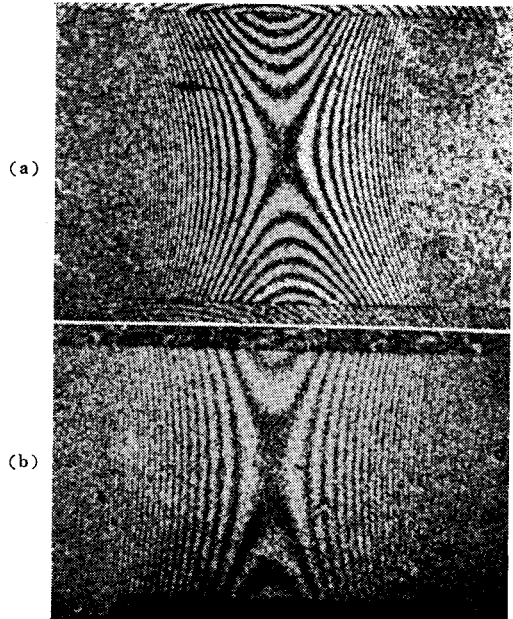


図-12 ホログラフィー干渉装置



(a) 銅板 (b) セメント板
写真-1 ポアソン比測定に用いた干渉縞（斎藤）¹⁷⁾

長方形断面をもつはりの単純曲げによる表面変形を測定し、ポアソン比を求めることを目的とした実験である。写真-1 は曲げ前後の波面を干渉させて得られた干渉縞で、表面の垂直方向変位が $1/2$ 波長ごとに干渉縞が1本生じ、変位の等高線となっている。

干渉縞から変位への換算は、照明、観測、変位のそれぞれの方向が関係してくる。また変位は一般に三次元であり、 x, y, z の三成分を求める必要がある。したがって実際の測定においては種々の工夫が必要であり、また干渉縞の解釈についての十分な知識が必要となってくる。しかし変形の大局的な情報を得ることや、薄板の面外変形などは容易に測定でき、有効な手段となるであろう。

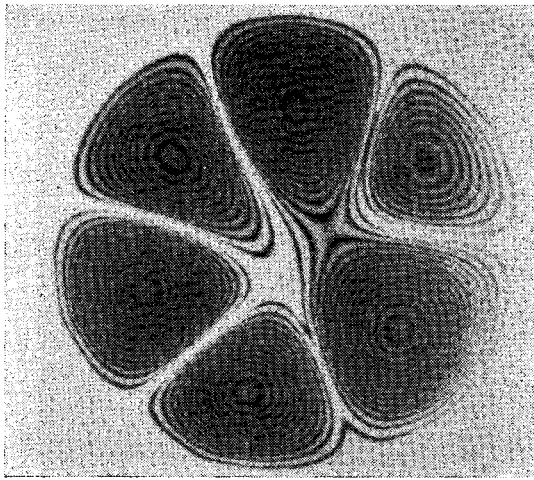
振動現象も、ホログラフィー干渉法により、非接触でどのような複雑なモードでも簡単に振幅分布が求められる。測定方法は、ホログラムに記録するときの露光方法により、時間平均法とストロボ法に大別される。

時間平均法とは、ホログラム撮影時の露光時間を振動体の周期よりも十分長くとり、行う方法である。振動体の振幅の大きさにより物体光の位相は時々刻々変化し、したがってホログラムに生じる干渉縞のコントラストが変化する。このホログラムを再生すると、物体の各状態の時間平均したものとして明暗が現われる。

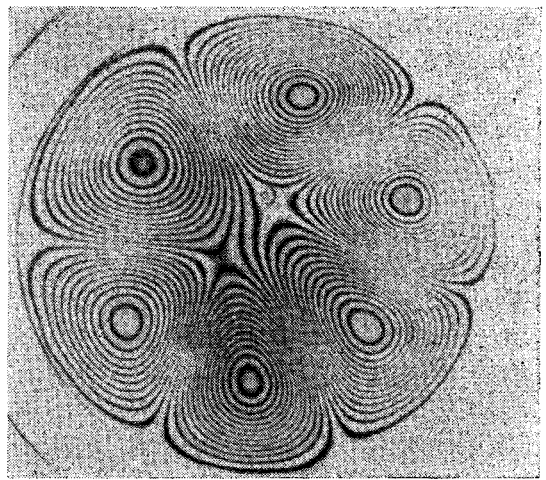
ストロボ法とは、物体の振動に同期したストロボ照明光を用い、静止した状態のホログラムに対して照明する瞬間の位相を一定とし、そのホログラムの上に重ね写しをすればその位相における変形を測定できる。したがって実時間法により各位相ごとにこの測定を繰り返せば、

振動の一周期における物体の変形を観察できる。また振幅の正負の最大の二つの状態のみ露光してホログラムを作る方法も行われている(写真-2)。

R.D. Woods ら^{19),20)}は 図-13 に示すような装置を用い、地盤に動的外力が加わったときの表面波の伝播、およびそれに対する溝、丸穴、杭、障壁などの影響を調



(870 Hz)
時間平均法



(870 Hz)
ストロボ法

写真-2 ホログラフィー干渉による振動円板の再生像(中島)¹⁸⁾

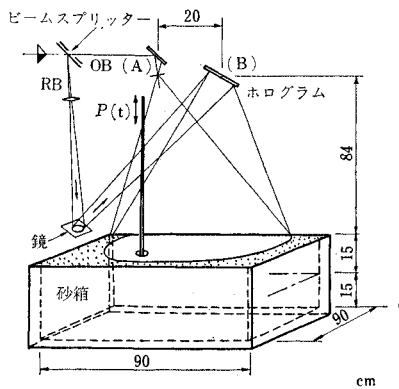
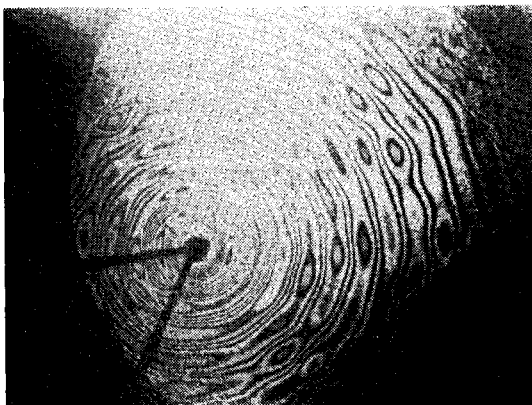


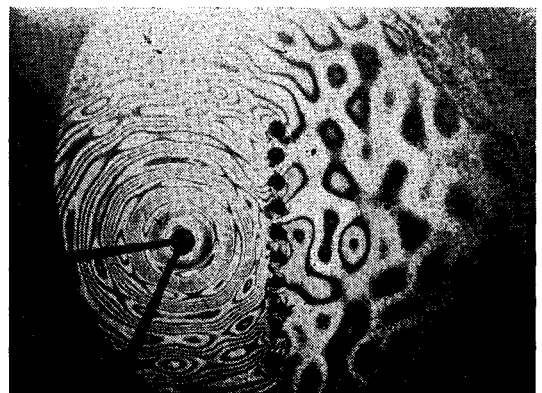
図-13 Woods らの実験装置²⁰⁾



写真-3 静的載荷時の地盤表面変形(二重露光法)
(R.D. Woods, N.E. Barnett, R. Saegesser¹⁹⁾)



(a) 障害物なし



(b) 丸穴群が1列あり

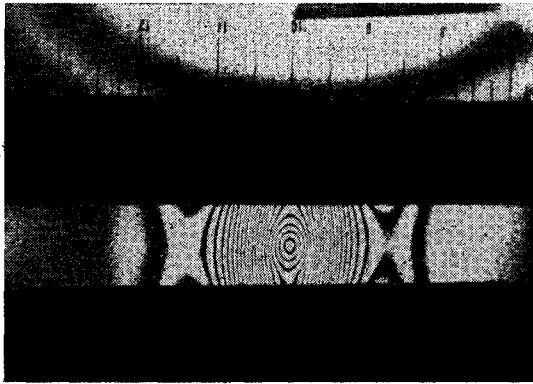
写真-4 動的載荷時の地盤変形(ストロボ法二重露光)(R.D. Woods, N.E. Barnett, R. Saegesser¹⁹⁾)

べるためのモデル実験を行っている。写真—3 は静的載荷時の表面変位を、無載荷時との二重露光法で求めたものの、写真—4 は動的載荷時の表面波の伝播状況を、ストロボ法により二重露光し、撮影したものである。

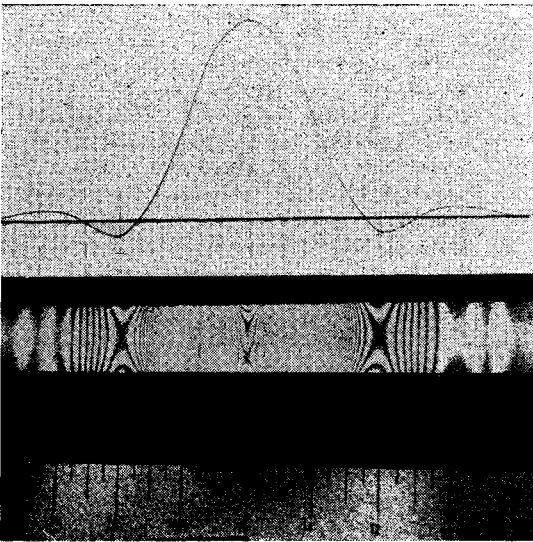
非常に短い時間の露光を行うために、ルビーレーザー



衝撃後 12.5 μsec



衝撃後 25 μsec

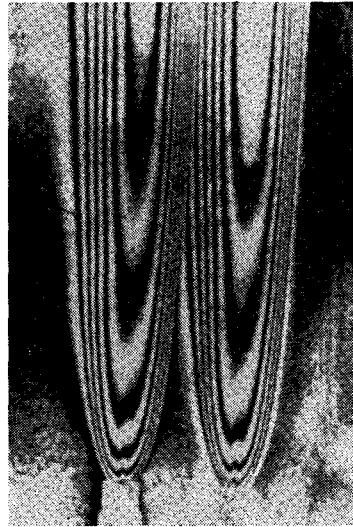


衝撃後 50 μsec とそれから解析した変位

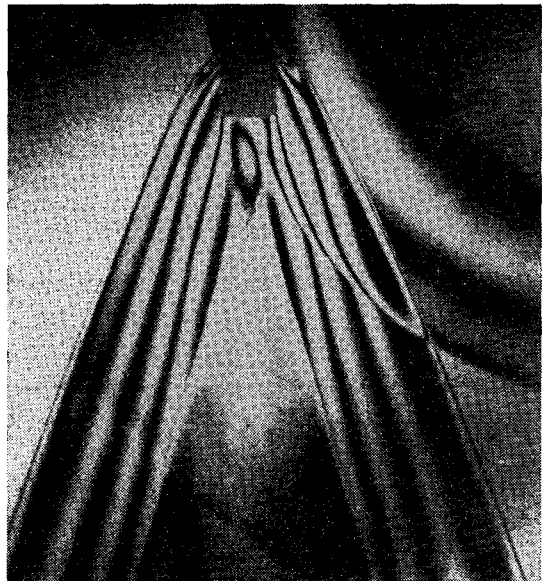
写真—5 はりに衝撃力を加えたときの変形の伝播
(R. Aprahamian, D.A. Evensen,
J.S. Mixson, J.E. Wright²¹⁾)

ーなどから得られるパルスレーザーを光源にすれば、高速な現象を観察することができる。写真—5 は、はりの中央部に衝撃力を加えたときの変形の伝播性状を観察したもので²¹⁾、それぞれ衝撃力を加えてから後の、異なる時間で露光している。

空気の流れの状態の観察など、流体力学の分野にもホログラフィーは応用できる²²⁾。流れのある状態とない状態で二重露光したホログラム、あるいはそれぞれの状態から得られた二枚のホログラムの再生像を重ねたとき、流れの状態を示す干渉縞が観察でき(写真—6)、また流れのある状態のみのホログラムの再生像からも、通常の



写真—6 ガスバーナーの炎の干渉縞(二重露光法)
(C.H. Tanner²²⁾)



写真—7 小銃弾による衝撃波(+20°からの観測)
(A.B. Witte, R.F. Wuerker)

シュリーレン写真,あるいは影絵法による写真を得ることができる。

パルスレーザーを用いれば,超音速状態の現象,たとえば飛行中の小銃弾のまわりの流れや衝撃波などを観察することができる²³⁾。写真-7はA.B Witteらにより撮影されたものであり²⁴⁾,現象は奥行約6inchの立体像として再生されるため,一枚のホログラムで-20度から+20度までの角度から観察を行っている。

その他,有限要素法などによる応力解析の結果を表示する手法の一つとして,その解析結果から二重露光法ホログラフィー干渉縞の濃淡を計算し,ブラウン管に出力させることなども研究されている^{25),26)}。

おわりに

以上にレーザー光の応用について,計測を中心に簡単に紹介したが,レーザーのもつ卓越した種々の性質は,今後土木工学の分野にも多くの革新的な技術をもたらすであろうと感じている。

最後に本文とりまとめにあたり有益な意見をいただいた東京工業大学土木工学科日野幹雄教授および電子工学科古屋一仁氏に深謝する次第である。

参考文献

- 1) 藤岡由夫:レーザーI, レーザーの原理と性質, 共立出版, 昭和48年1月。
- 2) 藤岡由夫:レーザーII, レーザー光の性質と応用, 共立出版, 昭和48年1月。
- 3) 別冊サイエンス, 特集レーザー, 未来をひらく光, 日本経済新聞社, 1975年9月。
- 4) レーザーハンドブック, 朝倉書店, 1973年1月。
- 5) Johnston, W., Dybbs, A. and Edwards, R.: Measurement of fluid velocity inside porous media with a laser anemometer, The Physics of Fluids, Vol. 18, No. 7, July 1975.
- 6) A. ローゼンフェルド:電子計算機による画像処理, 石田晴久・島村 勲・佐藤 充訳, 共立出版, 昭和46年4月。
- 7) 辻内順平・村田和美:光学情報処理, 朝倉書店, 昭和49年6月。
- 8) 吉川秀夫, 角屋 睦, 日野幹雄, 堀川清司:水工学における資料解析について, 土木学会誌, 第58巻, 第4号, 昭和48年4月。
- 9) Viénot, J.Ch., Smigielski, P. and Royer, H.: ホログ

ラフィー入門, 辻内順平, 中村琢磨訳, 共立出版, 昭和50年8月。

- 10) 斎藤弘義:機械工学のためのレーザホログラフィとその応用, 日本機械学会誌, 第78巻, 第682号, 昭和50年9月。
- 11) 辻内順平:ホログラフィーの精密測定への応用, 機械の研究, 第22巻, 第1号, 1970年1月。
- 12) Gabor, D.: A new microscopic principle, NATURE, No. 4098, Vol. 161, May 15, 1948.
- 13) Gabor, D.: Microscopy by reconstructed wave fronts, The Proceedings of Royal Society, A 197, 454, 1949.
- 14) Gabor, D.: Microscopy by reconstructed wave fronts, II, The Proceedings of the Physical Society, Sec. B, Vol. 64, Part 6, June, 1951.
- 15) Leith, E.N. and Upatnieks, J.: Reconstructed wavefronts and communication theory, Journal of the Optical Society of America, Vol. 52, No. 10, Oct. 1962.
- 16) Leith, E.N. and Upatnieks, J.: Wavefront reconstruction with continuous-tone objects, Journal of the Optical Society of America, Vol. 53, No. 12, Dec. 1963.
- 17) 斎藤弘義:ホログラフィーと応用力学, 応用物理, 第39巻, 第3号, 1970年。
- 18) 中島俊典:ホログラフィーによる振動解析, 応用物理, 第41巻, 第6号, 1972年。
- 19) Woods, R.D., Barnett, N.E. and Saegesser, R.: Holography—A new tool for soil dynamics, Journal of ASCE, Vol. 100, No. GT 11, Nov. 1974.
- 20) Richart Jr., F.E.: Some effect of dynamic soil properties on soil-structure interaction, Journal of ASCE, Vol. 101, No. GT 12, Dec. 1975.
- 21) Aprahamian, R., Evensen, D.A., Mixson, J.S. and Wright, J.E.: Application of pulsed holographic interferometry to the measurement of propagating transverse waves in beams, Experimental Mechanics, July, 1971.
- 22) Tanner, L.N.: Some applications of holography in fluid mechanics, J. Sci. Instrum., Vol. 43, 1966.
- 23) Siebert, L.D. and Geister, D.E.: Pulsed holographic interferometry vs Schlieren photography, AIAA Journal, Vol. 6, No. 11, Nov. 1968.
- 24) Witte, A.B. and Wuerker, R.F.: Laser holographic interferometry study of high-speed flowfields, AIAA Journal, Vol. 8, No. 3, March 1970.
- 25) Sanford, R.J.: Computer-simulated Stress-Optic patterns, Experimental Mechanics, Sept. 1971.
- 26) Ford, J.L. and Boresi, A.P.: Computer mapped hologram images in stress analysis, Journal of ASCE, Vol. 100, No. EM 2, April 1974.

水 工 学 に 関 す る 夏 期 研 修 会 講 義 集

●1976●新刊

A. コース

B 5・152・4 000 円 (〒 200)

1. 水中における微粒子の挙動/楠田
2. 開水路流れの乱れ特性/今本
3. 確率過程/室田
4. 密度流/栗谷
5. 流力弾性/中村
6. 流れの可視化/種子田
7. 桜島の土石流/田原
8. 流路形態/村本

●1975●新刊

B. コース

B 5・152・4 000 円 (〒 200)

1. 風波の発生機構/竹松
2. 沿岸の波の変形/酒井
3. 海洋波のスペクトル構造/光易
4. 沿岸水域における混合現象/玉井
5. 瀬戸内海の水質汚濁/中西
6. 博多湾の海洋生物環境/石尾
7. 浮遊構造物の動揺と波浪荷重/田才
8. 日本沿岸の漂砂特性/佐藤

●1976年以前のバックナンバーもあります。学会へお問合せ下さい●