

音波のよもやま話（その4）

音の伝播を見る:光弾性超音波可視化

(葡)アイ・エス・エル 宇田川義夫

◆はじめに

前回は弦巻バネで音を観測した。透明な大気や液体中の音の伝播を可視化するのに、昔からシュリーレン現象を用いた装置がある。はじめにこの原理を説明し、続いて一般的に使われる光弾性現象を用いた可視化装置を説明する。その後、この装置で観測した幾つかの結果を示す。「一見は百聞にしかず」で、今まで理論でしか超音波を知らなかった人には、衝撃かも知れません。

◆シュリーレン現象

透明媒質内で場所により屈折率が異なると、その部分が見える現象をいう。屈折率 n は真空中の光の速度 c を媒質内の光速 v で割った値として式 (1) で定義されます。

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\frac{\epsilon\mu}{\epsilon_0\mu_0}} \quad \text{式 (1)}$$

ここに ϵ 、 μ : 媒質の誘電率と透磁率

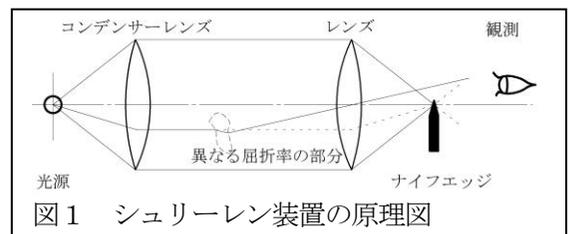
ϵ_0 、 μ_0 : 真空中の誘電率と透磁率

真空中の屈折率は1である。空気の屈折率は1.0003ですから、これは1としても誤差の範囲である。また水の屈折率は1.33である。ガラスでは種類によるが1.5から2程度である。

水中にガラスを浸すと、屈折率が異なるので

透明のガラスも見える。

釣りをする時釣糸を魚に見えなくするには、屈折率を水や海水と同じにすればよい。大半の



釣糸に使われているナイロンの屈折率は1.53なので魚に見つかりやすい。圧電現象を示すプラスチックとして高周波用超音波振動子に使われているPVDF（ポリフッ化ビニリデン、釣糸ではフロロカーボンと呼ばれる）の光の屈折率は1.42とより水に近いことから、ナイロンより魚に見つかりにくいので、また比重が水より重く、強度も強いのでハリス（鉤素）に使われている。

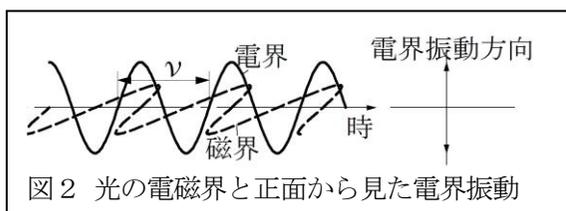
気体中の $(n-1)$ は概略絶対温度や圧力に比例するので、屈折率の違いを利用して、音波=圧力波を可視化する事ができる。大気中では対流や温度斑の観測にも使える。飛行機の翼断面を模擬して、発生する圧縮波の伝播を観測できる。こうした各種光学実験用として販売されているのがシュリーレン装置である。透明であれば固体中も観測できガラスの内部欠陥などの検出にも使われる。図1にシュリーレン装置の概念を

示す。点に近い光源からの光をレンズで平行光にし、平行光をレンズで点に収束させ、そこをナイフエッジで遮り光が通過しない様にする。観測対象は2枚のレンズ間に起き、レンズ間が均質ならナイフエッジの右には光が届かないので、真っ暗である。屈折率の異なる部分があると、光が屈折し偏向し、その結果ナイフエッジに遮られず、通過した光が観測できるという訳である。レンズは大型のものは高価なので、大面積を観測する場合は、レンズの代わりに放物面ミラーが使われる。

このシュリーレン法ですと、通常の探触子から出た音波は何とか観測できますが、傷など個体中に発生した弱い超音波を観測するまでの十分な感度はありません。非破壊検査用超音波では多くの対象が固体ですので、次項の光弾性現象を用いた装置の方が適している。

◆偏光現象

光は進行方向と直角に振動する横波の電磁波である。同時に $E=h\nu$ (h =プランク定数 $6.626 \times 10^{-34} \text{m}^2\text{kg/s}$, ν =振動数) で表せるエネルギーの単位で行動する光量子で素粒子の仲間である。光をマクロに扱う、マックス・プランクによる



電磁波論では、電磁波は電界と磁界が交互に伝播して行く。イメージ的には図2の様に電界と磁界が交互に光の周波数 ν で振動している。電磁界の位相は90度ずれていて、時間経過しても振動の方向は変わりません。観測している全ての光が図の様に、光の正面から見ると電界が直線的に変化している場合直線偏光と呼ぶ。一般的自然光は全ての光の電界の振動方向が同じとは限らず、非偏光と呼ばれる。レーザー・ダイ

オードは接合面に平行な直線偏光を発する。熱による発光ではランダムな状態から発光が起き色々な振動方向の光=非偏光となる。透明固体中を光が伝播していく時、内部の電子と相互作用を起こし、色々な現象が起きる。電子がどちらにも自由に動けると、例えば鏡に様に反射現象が観測できる。一定方向にしか電子が運動できないと偏光と言う現象が起きる。自然光や電球の電界の方向はランダムですが、電子が一定方向にしか運動できない偏光板を通ると、その方向にまず電子が運動し、その運動方向の光が通り抜ける様に観測される。なお、平仮名では同じ「へんこう」でも光の進む方向の代わる「偏向」と光の振動方向が変わる「偏光」を間違えない様に気を付けたい。多くの場合同時にこの二つの現象が起きる事も注意したい。

◆偏光板

カメラレンズ前面に付けるガラスや水面の反射を押さえる為の直線偏光板が売られてる。有る角度以上になると水面やガラス面が光を良く反射し、その反射光は偏光される。特に偏光角(ブリュースター角)と呼ばれる入射角度 θ では全ての光が偏光される。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad \text{式 (2)}$$

ここに n_1 は入射側媒質の屈折率、 n_2 は反射側媒質の屈折率。

水の場合約 53° である。この角度付近は偏光が多いので、この邪魔な偏光された反射光を写真に写らない様にするときに偏光板を使う。

通常の場合 56° 程度で、ガラスケースの中の物体をガラス表の側の反射を避けて撮影できる。

偏光板はポラロイドが有名である。フィルムの上にヨウ素を塗って、フィルムを延伸させると、出来た皺にヨウ素原子が並ぶ。ヨウ素が並んだ方向に電子が動きやすく、ヨウ素が並んだ方向と直角方向には電子は動きにくい。その為、横波である光の透過性が電界方向により大きく異なる。ヨウ素の並んだ方向の電界の偏光は良く透過すが、ヨウ素の並んだ方向と直角方向の電界の光があると遮断される。(厳密には光によってヨウ素の電荷を振動させ、その電流が裏面で二次輻射する。その為、ヨウ素の列の方向に電界が綺麗に揃う直線偏光となる。)

電子レンジのガラスの窓にはメッシュが配置されて電磁波の放射を防いでいる。これをもっと見やすくする為にすだれ状にすると電磁波が漏れる。網目である事が重要である。

偏光板は一方向にのみ電子が動く構造が重要である。高級な偏光板はガラス板の上にアルミなど導電体の細い線をサブミクロン以下のピッチで密に並べた構造でワイヤグリッド型偏光板と呼ばれる(図3)。広い周波数範囲、紫外線から遠赤外線まで、物によってはTHz波の電波領域まで偏光できる。

偏光板の偏光方向を直交させて2枚対向配置し、光を通過させると最初の偏光板で一定の方向に偏光するが、次の偏光板では、電子が動き易い方向と直角なため、光が通過できません。

◆光弾性現象

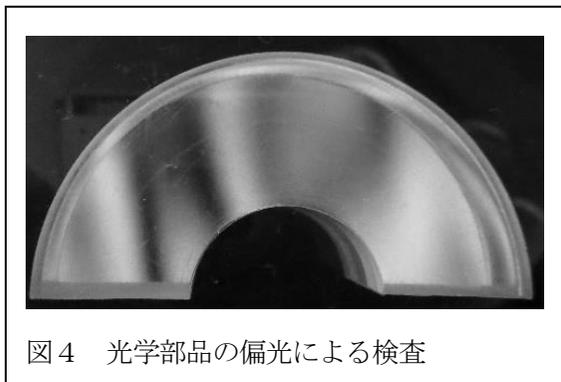
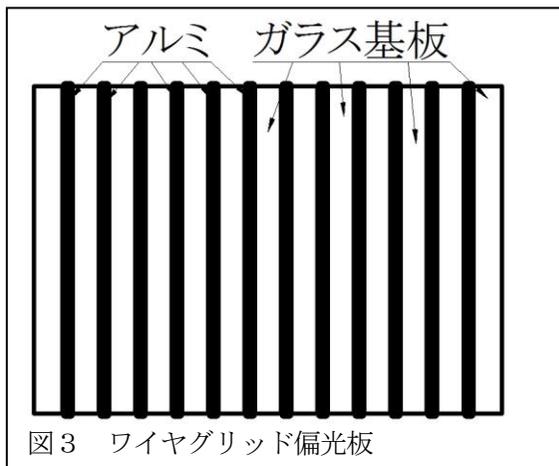


図4 光学部品の偏光による検査

透明固体中を音が伝播していくと応力の方向と他の方向で電子の動きやすさに違いが発生する。その為偏光現象が起きる。高校、大学授業で、透明な材料を2枚の偏光フィルムに挟んで材料に加わる歪=応力を観測することがある。図4は偏光板を使って光学部品を検査している一例で、左の黒い縦縞の部分には内部応力が無



く、他の白い部分は残留応力が残っている部分ある事が示されます。このように透明体であれば応力を可視化出来る。光学部品は偏光現象を使って検査する事もある。液晶TVには2枚の偏光フィルム間に薄い液晶の層を、その裏に光源が配置され。液晶の層は電圧に依って偏光状態が変わる。偏光量をTV画面のそれぞれの点で変えて、裏からの光を通したり、通さなかったりで、輝度を変えている。光弾性装置は全く同じ構成である。透明な材料の代わりに電圧制御できる液晶が使われている。

TVの生産量が多いので、TV用偏光フィルムは安価に売られていて、これを流用して光弾性現象を試す事もできる。

◆光弾性現象のより詳しい原理

方解石の様な複屈折を起こす材料は、光子の振動方向により光速が異なる。結晶中の電子の動き易さが方向により異なる(分極)為であるが、結果屈折率が異なる事になる。自然光は色々

な振動方向を持った光子で、方解石を通して文字などを見ると二重に見える（図5）。大小の差はあるが、ほぼ全ての結晶に見られる現象である。正常光と異常光と呼ばれる2つの光速 C_oC_e は内部応力により変死し、2つの経路の時間差 Δt は、

$$\Delta t = K\sigma$$

ここに、 σ は内部応力、 K は比例係数。

方解石の多結晶が石灰石で、石灰石の様な多結晶の場合、ランダムに小さな結晶が配置しているので、光が二つに分かれて見えませんが、各結晶粒で

伝搬時間がずれて重なるため、偏光が起きます（量子力学的にはそうすると観測される光が多くなる）。これは応力に比例する事になる。

ポアソン現象の為、等方性なら上記現象は圧方向の力で最大なら、それに直角な方向にもピークが発生する。入射光の偏向角が45度毎に輝度の大小を示すので、45度異なる偏光入射光の画像を合成する必要がある。

円偏光を使うと合成の必要はなくなるが、完全な円偏光作る方法は少なく、一般に画像は直線偏光の方が良くなる。

また、音の応力の方向を直線偏光では偏光板を回転させある程度確認できます。

◆光弾性観測装置

図6に光弾性の観測装置の原理を示す。シュリーレン装置のナイフエッジを無くして、2枚の偏光板を追加しただけである。光源に近い偏光板は偏光子と呼び、目に近い偏光板は検光子と呼ぶ。光源にレーザーなど偏光方向の揃った光源では偏光板は不要である。シュリーレン同

様に平行光を作り、一定方向に偏光された光が図の媒質中を左から右に伝わる。媒質によって偏光されますが、光の媒質中距離が同じで、媒質が均質なら同じ量が偏光される。この偏光した光が透過しない様に、検光子を回転調整すると、右から観測すると真っ黒である。図では検光子の後は点線で光の経路を書いておりますが、光の伝播は検光子までである。媒質の中に偏向現象が異なる部分があると、そこを通過した光は他の部分とは異なる偏光が起き、その偏光量に応じて検光子を漏れて通過し、明るさを観測する事ができる。圧力が異なる部分があると、「偏光」が起きますが、同時に「偏向」も起きる。条件によっては「偏光」と「偏向」を同時に観測している場合もある。検光子の調整を少し光が漏れる様にし、ナイフエッジを追加し漏れの一部を遮ると、偏光が起きにくい空中と、偏

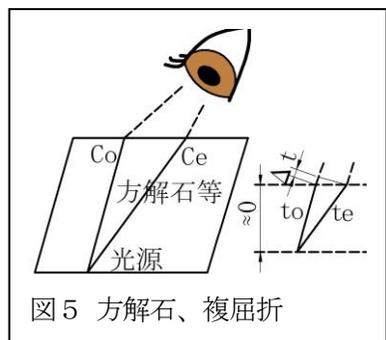


図5 方解石、複屈折

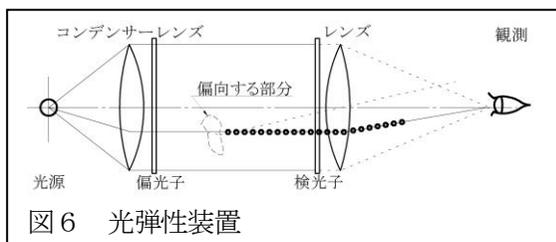


図6 光弾性装置

光の起きやすい水中など同時に観測できる。

また、後ろのレンズを除いて、直接検光子を覗くと、偏光と偏向の両方の現象の結果を直接目視できる。この場合、両目である程度立体画像を観測できる。

音波の観測に使う光弾性装置は、圧力で光が大きく偏光される透明体（BK7 など）を選び、又正面の中心軸上で観測されるので、「偏光」を観測しているとして大方問題ない。

◆伝播して行く音の観測

音の伝播速度はアクリルで約 2500m/s、ガラスは約 5000m/s 前後である。音は 10mm の距離を数マイクロ秒で伝播する。瞬間通過するので光弾性装置そのままでは、目視は出来ない。目は 100Hz 程度以上の速い現象は残像として

しか、観測できない。高速カメラは数 n 秒のシャッター速度があるが、これで試しても駄目である。一般にシャッター速度と感度は相反するので、高速カメラは感度が悪い。軍隊が使う暗視カメラの様なマクロチャンネル・プレートを使う手もある。が、画像に斑が発生し、画像が劣化する。超音波可視化装置で実用レベルの方法は、光源に強力且つ発光時間の短いストロボを使って、音が見たい部分に来たとき発光させる方法である。図 5 の光源はストロボである。最近ストロボには高強度 LED やレーザーも使われ始めていますが、輝度コストなどストロボ管にはまだかありません。

医療や非破壊検査に使う音の強さは非常に弱く、大気圧の 1/10 に達する事も滅多にありません。ストロボを使っても十分とは限りません。その場合天体観測に使う様な、スローシャッターで画像の光を集積出来るカメラを使う。毎年デジカメの性能が上がっているので、将来は目で見える画像はカメラで観測できそうである。

◆観測した画像例 UOE パイプ

1994~1995 年、東北大学で可視化装置による画像が沢山撮られました。教育目的で、動画も

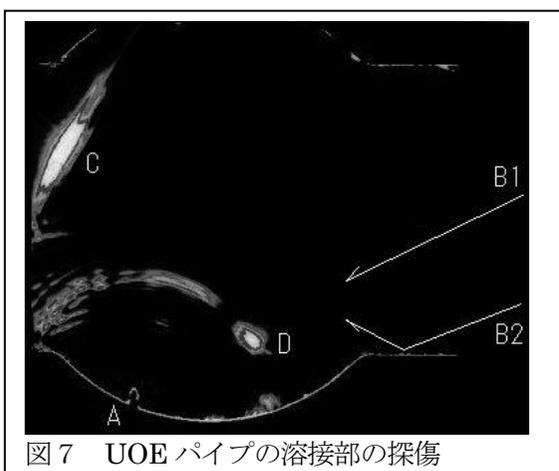


図 7 UOE パイプの溶接部の探傷

作成し、以下のウェブで見ることが出来る。斜角探触子、二分劃探触子、水浸探触子など音が如何伝わるかの理解を深める事が出来る。

<http://www1.kcn.ne.jp/~isl/libj.html>

当時の観測機器の性能が十分でないので細かな物理現象までは捉えにくい、欠陥からどの様に音が探触子に戻ってくるかなど、この画像で実用に近い現象の観察できる。この頃の画像では疑似カラーで、それを白黒に変換した為グレースケールの輝度と音圧の関係が逆転している場合があるので注意してください。図 7, 8 の左の輝度スケールを参照してほしい。なお、上記ウェブの動画は白黒で、音圧が高いほど白く観察されます。

1mを超えるような大径のパイプは、厚板を U の字型に曲げて、更に O の字型に曲げ、円形として、接触部分を溶接してパイプ状にし、最後に中から広げ (Expand) 円形に近づける。UOE パイプと呼ばれ、板厚は 10~50 mm 程度で径は 400~1600 mm である。

図 6 は UOE パイプの溶接部の探傷の模擬ガラス片を使った可視化像である。ガラスの音速は比較的鋼に近く良い模擬になる。画像に現れていませんが、画像外の右上に配置された斜角探触子からの送信音波は B1B2 の矢印の方向に音が伝播し、溶接部下部にある欠陥 A で反射し元ってくる状態を観測している。写真右下の板の下面で反射した音は左上に伝播した強い白い像 C である。入射方向に戻ってくる小さな強い点 D が送信した探触子に戻ってくる途中の音ですが、ピッタリ探触子に戻るとは限らない。この場合も D の戻る方向の中心は探触子のケースの大きさの範囲にも戻らない。D が拡散して広がった音が探傷画面で観測されている。

◆観測した画像 棒鋼

図 8 は機械部品の素材用の棒鋼の検査の模擬である。A は水浸用探触子、B は棒鋼の模擬ガラスで、その間は水である。探触子の振動子の径は棒鋼の径の半分程度である。C は縦波、D は横波である。音速の違いから縦波横波を区別できる。もちろん偏光板の方向を変えて、どち

らの方向の応力かを確認する事もできる。通常

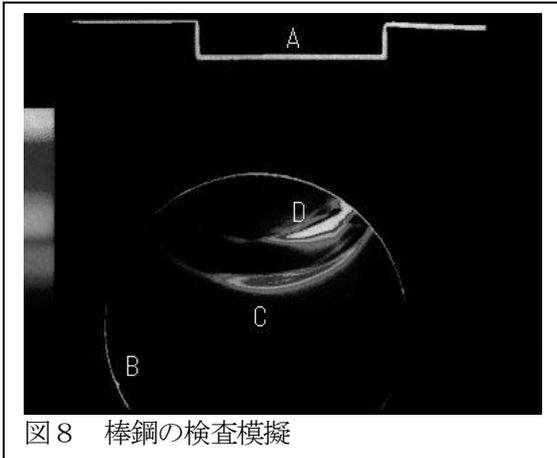


図8 棒鋼の検査模擬

スネルの法則に従って縦波は横波より大きな角度で屈折しますが、棒鋼の場合表面の形状の為に横波の方が縦波より大きく屈折する。スネルの法則が成り立たないのでは無く、水から固体への入射時、水中の縦波がそのまま縦波に成る割合と、横波に成る割合が、入射点で異なる為に一見スネルの法則が成り立たない様に見えるのである。要はモード変換の割合が角度に依存するからである。またスネルの法則自体は無限大平面境界に入る無限大平面波では正しいが、有限幅の超音波ビームや無限平面以外では色々な現象が起きる。単純にスネルの法則が成り立つと考えると間違いを犯す。

◆観測した画像 広帯域探触子

探傷器やパルサーレーザで大きな反射を観測すると 1.0 波や 1.5 波の波形が観測される (図 9)。所が、可視化で送信音波を観測すると、正の半波の音しか観測されない。2MHz 以上の公称周波数の広帯域探触子を何種か試したが、同様で正の半波の音圧は観測されるが、それに続く負の音圧は観測されても僅かである。図 11 は 5MHz 10φ の広帯域探触子から出た音の可視化像を示します。当時、広帯域探触子をスパイク励振すると正負 1.0 波 (1.0Cycle) の音が発生すると信じられていました。また、その受信波形は図 9 の 1.5 波 (1.5Cycle) と思われてい

た。一方で当時 50MHz のポリマー探触子と高周波用パルサーレーザの組み合わせでは、レーザの出力には時々正負 1.0 波の音が観測されていた (図 10)。

最近では表面の変位をレーザーで計測するレーザー速度計やレーザー変位計が市販されていて、これで表面に伝わった縦波ビーム中央付近での音波波形は比較的正確に計測できる。広帯域探触子からの音は半波～1 波である事が確認されている。

通常の探傷器と広帯域探触子の組み合わせでは観測波形は多くは 1.5 波なのに、実際の音波音圧波形は半波又は 1 波となっている理由はその後判り、以降の連載で詳しく述べる。

◆更なる疑問

可視化像を見ると色々な疑問が沸く。例えば振動子からガラスに入射する音波の状況と、ビームがガラスの底面で反射した直後の音波の状況が酷似している。また、市販の水浸法探触子をガラス TP に直接接触させ超音波可視化装置で観測すると、探触子から超音波がガラスに入射する時の平面波音圧の激しい乱が観測されるが、直接接触探触子では明瞭には観測されない。これらの疑問は 20 年経って原因が判った。この件も次号以降で説明する。

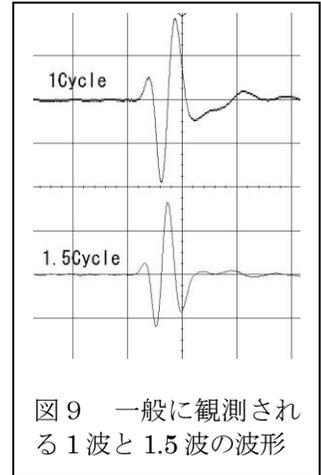


図9 一般に観測される 1 波と 1.5 波の波形

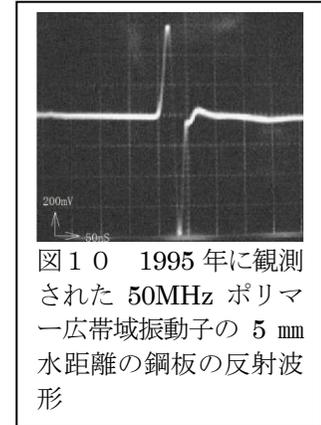


図10 1995年に観測された 50MHz ポリマー広帯域振動子の 5 mm 水距離の鋼板の反射波形

◆光源に偏光レーザーを用いた観測装置

前述の可視化装置の画像は、ある瞬間の静止画像である。探傷器やパルサーレーザーの出力

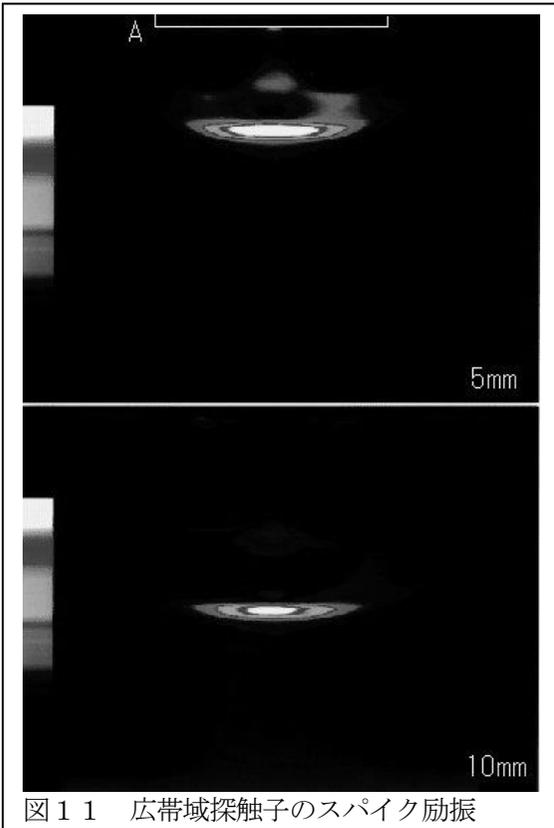


図 1 1 広帯域探触子のスパイク励振

と同じ様に、横軸が時間の波形データが取れると比較検討が容易となる。多くのレーザー発振器はその出力窓から出る光は偏光している。レーザーは直進性が良いので、例えば図 1 2 の様にガラスの一点を狙って、そこを通過する音の時間変化を観測する事ができる。光弾性レーザー・プロファイラーと呼んでいる。市販電子部

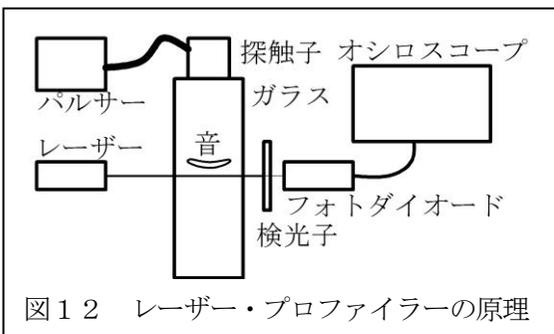


図 1 2 レーザー・プロファイラーの原理

品のレーザー・ダイオードとフォトダイオードを使って簡単且つ安価に作れるので DIY するのも良からう。高価なレーザー変位計では表面の音波（表面反射）変動しか判らないが、この方法で透明体に限るが伝播途中の音の時間変化がオシロスコープで観測できる。

◆あとがき

今後可能な限り可視化像載せる事にする。一見は百聞にしかずで、本当の事を知るには現実の音を見るのが一番良いけれども、「観測機器の歪、フィルターなどが加わった結果を観測していないか？」を常に頭に留めて眺めてほしい物である。

◆今回知った事

- (1) 音を可視化するにはシュリーレン法と光弾性法がある。
- (2) 光は音によって偏向と偏光を受ける
- (3) 空気水中音圧の可視化は光の偏向
- (4) ガラス内音圧の可視化は光の偏光
- (5) 丸棒に超音波を入射すると、縦波より横波の方が強く曲がるように観測される事がある
- (6) 広帯域探触子をスパイク励振すると正の半波の音が出ている様だ
- (7) 表面に伝わった音の変位はレーザー変位計で確認されている
- (8) レーザー・プロファイラーを DIY で作ろう

<参考文献>

超音波技術入門—発信から受信まで (2015/04 初版 2 刷、日刊工業新聞社)