

超音波による光の廻折と音波の映像 並びにその應用について

鳥飼安生・根岸勝雄

はしがき

透明な媒質中に超音波が伝播していると、その超音波の場は光に対して、ちょうど廻折格子と同じような作用をして、入射してきた光を廻折させる。このことはさき本誌上で述べたところ¹⁾、その報告中の第1図にかかげたよ

うな装置により乾板上に第2図のような廻折像が得られるのである。またこの現象を利用していろいろな超音波の場の映像が得られることも報告した通りである。

さてこの際超音波の場のできる廻折格子は普通の光学格子のように、透明な部分と不透明な部分が交互に並んだいわゆる振幅格子ではなくて、位相格子とよばれるものに属する。位相格子とは、透過率は一様に1であるが、透過波に対する位相の遅れが周期的に変化しているような格子をいう。超音波の伝播している場の状態を瞬間的にとらえて第1図のようにあらわすと、音波というものはいわゆる疎密波であるから、その場の中で密度は周期的に大きくなったり小さくなったりする。ところが、光の屈折率は密度の大小に応じてやはり大きくなり、小さくなる性質を持つので、図のように平面波が入射して超音波の場を通過するとき、それに対する各点の optical path (光路=屈折率×距離)が周期的に変つているため、光の受ける位相遅れが同様に变化して、透過波の波面が図のように波を打つたものになるのである。超音波の場が位相格子と呼ばれる所以である。

さてここで顕微鏡の方に眼を転じてみると、最近流行のものに位相差顕微鏡というものがあるが、普通の顕微鏡でははつきり構造の認められないような透過率一様な物体でも、この顕微鏡を用いると、その各部の屈折率の

変化が明暗の変化に変えられ、明瞭に内部構造を識別できるようになるのであつて、特に生物学上、医学上に顕著な應用をみせている。筆者等はこの位相差顕微鏡の理論と方法を超音波

始めに、超音波の映像に対する、位相差顕微鏡の理論と方法の應用という問題を扱つた。これは結局、超音波の場が一種の位相格子であることに基づいているのであるが、理論と実験結果とがよく一致して、位相差法の妙味が感得される。次に、超音波による光の廻折とその映像についての應用という面を展望して見た。割に簡単な事柄であるのに案外色々な應用面が見られるのである。とにかく現象が直接眼に見えるということは、大層楽しくもあり、又心強いことでもある。

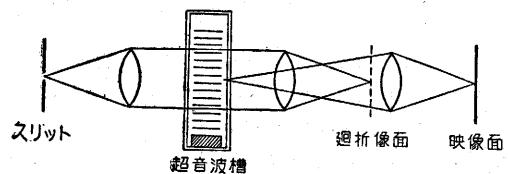
の映像に應用することを思いつき、実際にやつてみたが、理論的に予想された通りの結果になつた。その詳しいことはすでに他の誌上²⁾に報告したが、この稿ではまずこの位相差法の應用について詳しい解説を行いたいと思う。

次にこの超音波による光の廻折や音波の映像の現象は単

に理論的・実験的に興味があるというだけでなく、その應用の面についてもいろいろと面白い研究がなされている。このことの一面(超音波の映像)については前の報告の中に詳しく述べておいたが、この際、この面についてすでに発表された研究、現在企画しているもの、或は考えられるものなどまとめて述べてみることにする。

位相差法の應用

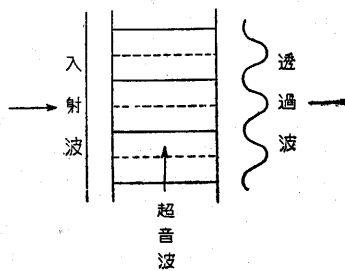
すでに報告した通り、超音波の映像を得るには第2図のような装置を用いるが、更に位相差法を應用するには、光源を超音波と同じ周波数で点滅するストロボ光源とし(超音波の場は第1図に示した位相格子が時間と共に一方に移動しているようなものと考えられるから、それを止つた状態で観察するためにはストロボ光源が必要である)、廻折像面に位相差板をおいて、零次の廻折像に適當な吸収と位相遅れを与え、波面の映像を得るのである。



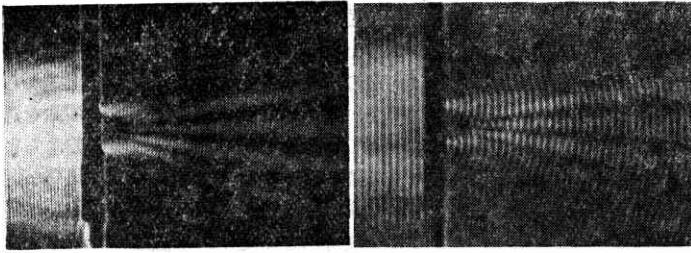
第2図 超音波映像装置

2種類の位相差板につき得られた映像の例を第3図にかかげる。同図(a)にかかげたのは、零次の像を完全に遮つた場合、すなわちシュリーレン法によるものであり、同図(b)は最も適當な位相差板を用いた場合である。

この位相差法の原理は、簡単には次のように説明される。すなわち零次の廻折像に吸収と位相遅れを与えるということは、像面では、その全体に一樣にある大きさと位相を持った光のベクトルをつけ加えるということに相当する。そこで始め像面では明るさが一樣で、ただ位相だけが場所により変化していたものが、上のベクトルを



第1図



(a) シュリーレン法 (b) 位相差法
第 3 図 2重スリットを出た超音波のストロボ映像

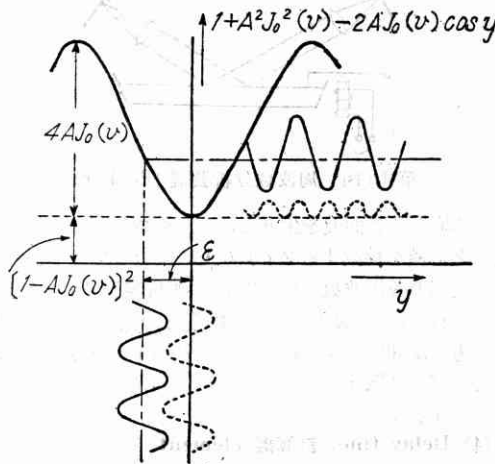
一様につけ加えることにより、このベクトルと位相が一致するところでは強め合つてさらに明るくなるし、逆位相のところでは暗くなるということになり、ここに明暗の像を得ることができるわけである。

筆者の一人の解析によると³⁾、物体が $e^{i\nu \sin \frac{2\pi x}{\Lambda}}$ (ν は位相変化の振幅、 Λ は格子常数) であらわされるような位相格子のとき、transmission (透過度) が g で位相遅れが δ である位相差板を用いたときの映像を表す函数は次式の通りになる。(結像系の倍率は 1 としてある)

$$I(x) = K \left[1 + A^2 J_0^2(\nu) - 2A J_0(\nu) \cos \left\{ \nu \sin \frac{2\pi x}{\Lambda} - \varepsilon \right\} \right]$$

ただし、 $Ae^{i\delta} = 1 - ge^{i\delta}$ 、 J_0 は零次の Bessel 函数、 K は常数である。

$y = \nu \sin \frac{2\pi x}{\Lambda} - \varepsilon$ とおき、上式右辺の括弧内の量と y との関係を図くと第 4 図が得られる。この曲線は像面の光の強さと物体の位相変化とを関係づける、いわば写像曲線というべきもので、ちょうど真空管での陽極電流対格子電圧曲線と同様に考えられ、 $-\varepsilon$ は映像における位相



第 4 図 写像曲線

のバイアスとみなすことができる。シュリーレン法では $g=0$ で、従つて $A=1$ 、 $\varepsilon=0$ であり、従つてバイアスは 0 で、図の点線のように写像され、また適当な位相差板を使うと、バイアス $-\varepsilon$ が与えられて、実線のような写像が行われる。もちろん g 、 δ が変れば、 ε の他に A も変化するから、両者の写像曲線は一致しないが、便宜上同じ曲線を用いて説明をした。第 3 図に示した映像写真も

上の説明から容易に理解できるであろう。
なお、最もよい映像を得るためには、第 4 図から最も都合のよい A と ε とをそれぞれ独立に求めて、それから g 、 δ を計算すればよい。第 3 図には $\nu \approx 0.7$ 位のものを示したが、 ν がずつと大きくなつてくると、第 4 図の写像曲線からみて、映像に微細構造が生ずることが予想されるが、このことについては、他の誌上に詳しく述べてある。

とにかく、超音波の場が位相格子であるということから位相差法の応用ということが考えられ、実際にうまく行つたのだが、また逆にこの場合は格子常数を任意に選ぶことができ、しかも精度のよい、また位相変化の振幅を随意に変えられる位相格子を提供するという意味で、位相差顕微鏡の動作に関する一つの実験試料を与え得ると考えられる。

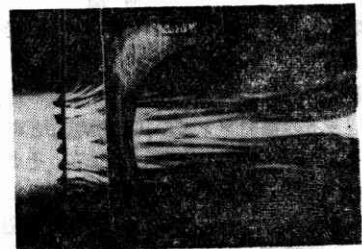
超音波の光学的作用の研究という点と、光学系の上からとの両面からみて興味のある方法である。

廻折現象の応用

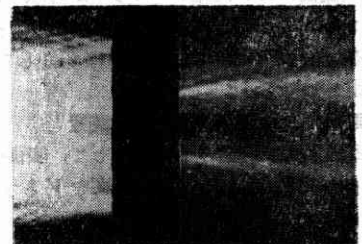
超音波による光の廻折や音波の映像は単に現象として興味があるだけでなく、その応用面にもいろいろ興味深いものがある。その第一は媒質中の音速、減衰の測定で、相当の精度でそれらの量を求める有力な方法を与えており、また前節に述べたのもその一面であるが、以下その他の応用の面に眼を向けてみよう。

(1) 波動現象の解析、探傷装置

超音波の反射、干渉、廻折などの問題が特に 2 次元的に扱えるときは、前報告¹⁾に述べた方法で直接それらの模様を眼に見ることが出来る。その多くの例をその報告中に載せたが、第 5 図には廻折格子と凹レンズの組合せ



第 5 図 廻折格子と凹レンズとの組合せ



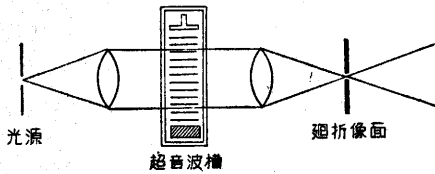
第 6 図 厚さ 10mm の真鍮板中の直径 4mm の円筒状空洞による超音波の影と廻折

における映像を示した。レンズの焦点面に収縮像が結ば

れているが、零次の像の両側に1次の廻折像が現れているのが見られるであろう。レンズを出た波の収斂の模様がなかなか面白い。第6図は板の中に円筒型空洞のあるときの超音波の透過の映像である。このように探傷装置にも応用できる。

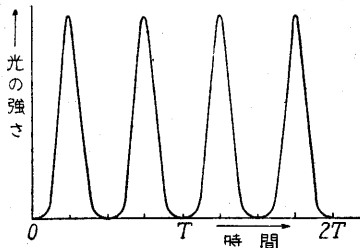
(2) ストロボスコープ

前節に述べた超音波の波面の映像を得るためにはストロボ光源を必要とするが、従来そのために用いられたケルセル利用のものに対して、超音波を利用したものはずっと低い電圧で明るいストロボ光源が得られる特長がある。その装置については前にも述べたが、第7図のような光学系にする⁴⁾。超音波槽内には反射板をおいて定常



第7図 超音波ストロボ装置

超音波を生ぜしめ、廻折像面上の零次の像だけをスリットで取出して光源とする。超音波の振幅が適当のとき、この光源の強さの時間的変化は第8図のようになり、超音波の周波数の2倍の周波数で点滅するストロボ光源が得られる。



第8図 超音波ストロボ光の時間的変化 (Tは超音波の週期)

上の装置で得られるストロボ光源の点滅の周波数の限界は、スリットの幅やレンズの焦点距離などによるのだが、大体1Mc以下になると難しくなる。そこで超音波を使つてもつと低い反復周波数のものを得るため、次のような方法が考えられる。すなわち数Mcの超音波を望みの繰返し周波数のイムパルスで変調して、その映像を面かせ、映像面においた細いスリットから取り出すのである。実はこの方法にはいろいろ欠点があり、実用上うまく使えるかどうかやってみなければわからないので、今後の問題としてある。

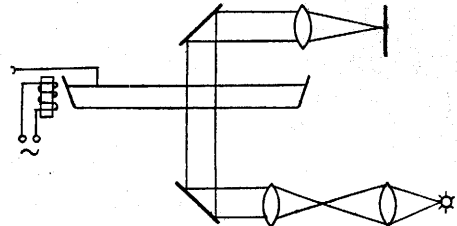
(3) 表面張力の測定、周波数分析装置

液体の表面張力の測定の一方法として、表面張力波の速度から求める方法がある。その速度をVとすると、表面張力Tと次のような関係がある。

$$V^2 = \frac{g\lambda}{2\pi} + \frac{2\pi T}{\rho\lambda}$$

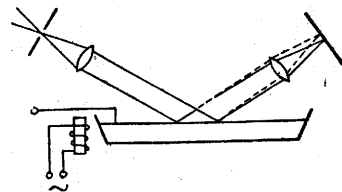
但し、λは表面波の波長、ρは液体の密度、gは重力の加速度である。

ところが、(速度)=(周波数)×(波長)の関係があるから、あるわかつた振動数で駆動されて生じた表面波の波長を測れば、その速度が直ちに判る。よつて上式から表面張力が計算される。さて表面波の存在する液面を透過する、或は液面で反射する光に対して、表面波はちやうど超音波同様に位相格子の働きをするので、同様な廻折現象が見られ、またその格子常数は表面波の波長に等しい。よつてこの廻折角を測定すれば直ちに波長が求まる。第9図はインドの Subbaramaiya⁵⁾による測定装置で、左の電磁的駆動装置により、ある判つた周波数の表面波が生じて右に進むと、図のような光学系によつて、乾板上に廻折像が得られるのである。(図は透明な液体の場合であるが、不透明の場合には第10図のように反射を利用すればよい。)



第9図 表面張力測定装置 (Subbaramaiya)

上の原理は、次のように周波数分析に応用される。ドイツの Becker⁶⁾による装置を第10図にかかげる。この場合には液体として水銀を使い、表面反射法で廻折像を得ている。分析しようとする波形を左の駆動器に入れ、



第10図 周波数分析装置 (Becker)

それに応じて表面波を生ぜしめる。表面反射に際してできた廻折像を移動するフィルム上に撮影して行くと、表面波波形の各周波数成分に応じた廻折像がフィルム上に印せられて、周波数成分の時間的変化が求まるのである。この方法は非常に速い周波数分析法の1つを与える。以上超音波とは関係ないことだが、位相格子の応用という意味で記述した。

(4) Delay line, 計算機 element

Delay line とは電氣的イムパルスを送ると、あるきまつた短時間後にイムパルスが発生する装置である。この目的のために超音波がよく使われるが、普通媒質として石英棒や水銀槽が使われるところを、透明な液体を用いて、光学的方法を応用してみようというのである。すなわち窓のついた超音波槽で、生じたイムパルス超音波の映像を面かせ、スリットから取出して光電管で受けると、電氣的遅延イムパルスが得られる。この方法の特長は、窓をいくつも設けることにより、いくつもの delay

の値を同じ超音波槽から得られることである。

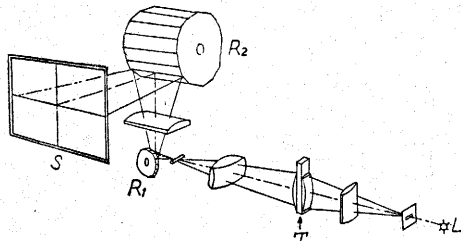
Digital な電子計算機にも超音波槽が store 回路の 1 element として使われているが、その動作はイムパルスが時間的に不規則に加えられる delay line と考えればよい。従つて上の考えがそのまま成立つことになる。しかし更に面白いのは、超音波槽の窓をある程度ひろげて、適当な光学系と、電気系とを用いれば、その窓内に現れたイムパルスの数を一度に読み取ることができることである。またかような超音波槽を何本も平行にならべて、各々に窓を設けて光がそのすべてを貫通するようにすれば、また違った効果を得ることができる。

(第11図 a, b)

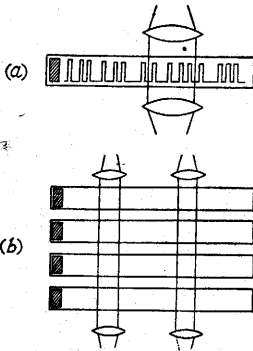
もちろんこのような装置が果して使いものになるかならぬかは検討を要することだが、かような操作が行えるのは光学系の応用ならではのことであろう。

(5) テレビジョン

超音波の映像の面白い応用の 1 つとしてテレビジョン受像機がある。これは要するにテレビジョンの映像信号電圧を超音波槽内の水晶圧電子に加えて超音波の信号に変え、これの映像をこれまで述べてきたのと同じ方法でスクリーン上に出しているのである。装置の概略図を第12図にかかげる。超音波槽 T 内に生じた超音波が、光源 L よりの光と途中の光学系によりスクリーン S 上に映し出されるようになっており、また回転鏡 R₁ と R₂ により左右と上下の scanning がなされる。この装置は英



第12図 テレビジョン受像装置 (Lee)



第11図 計算機 element

国の Scophony 会社⁷⁾によつて考案されたもので、特長として、割に広い面に明るい像の得られること、必要な電圧が余り高くないことなどであるが、機械的な回転部分もあつて取扱いに不便であり、現在は用いられてはいないと思うが、とにかく面白い着想である。

むすび

超音波による光の廻折現象が発見されたのは、ちようど 20 年前のことであるが、その後その方向の研究は、3~4 年後の Roman-Nath の位相格子の理論を頂点として余り大した進歩は見せていないようである。その応用としてはもつぱら液体中の音速、減衰の測定に用いられたが、これとても他にもつと精度のよい方法もあるようである。

音波の映像が盛んに波動現象の観察に用いられ出したのは最近のことであり、これを利用した固体中の音速測定法が 2~3 篇あるが、まだ広く音場の解析には利用されていない。この方法の特長は 2 次元的に現象を同時に観察できることであり、また観測に当つて音場を全く乱さないというよい点もあるから、装置や方法にもつと工夫を積み、理論的解析の方もくわしく行えばある程度の精度をもつて音場の解析も行えると思う。そういう点を離れてもすでに述べたいろいろ面白い応用もあり、決して等閑に附すべきことではないであろう。

終りにのぞみ、いろいろ御援助いただいた久保田教授に厚く謝意を表する。(1952.10.30)

参考文献

- 1) 鳥飼・根岸：生産研究 4, (1952), 13.
- 2) 鳥飼・根岸：応用物理 21, (1952), 350.
- 3) Y. Torikai: J. Phys. Soc. Japan 7, (1952), 330.
- 4) H. E. R. Becker, W. Hanle und O. Maercks: Phys. Z. 37, (1936), 414.
- 5) S. Subbaramaiya: Proc. Ind. Acad. Sci. (A) 6, (1937), 333.
- 6) H. E. R. Becker: Ann. d. Physik 36, (1939), 585.
- 7) F. Okolicsanyi: Wireless Engr. 14, (1937), 527.

H. W. Lee: Nature, 142, (1938), 59.

生産技術研究所報告 第3巻 第2号 予告

木本 浩二 著「硫酸セリウムによる有機工業分析法の研究」
 "Studies on technical organic analysis by ceric-sulfate method"

硫酸第2セリウムは酸性水溶液中で強い酸化力と安定性を有し、これを用いた分析法はセリウム滴定法としてよく知られている。本報では硫酸セリウムの硫酸々性水溶液中で種々の有機化合物を常温又は加温して酸性化させ、反応後過剰に残る第2セリウムの量より、これらの酸化反応機構について推察を行つた。更にこの結果に基づいて、硫酸第2セリウムを用いた1価及び多価アルコール、高分子炭水化物、フェノール類、芳香族アミン類、アミノ酸の容量分析法について論じている。