

# 超音波と光

——この古くて新しきもの——

Ultrasound and lighth—Old and new aspect—

根 岸 勝 雄\*

Katsuo NEGISHI

超音波と光の関係は前世紀末から始まっているが、著者の37年にわたる研究は光を手段とした超音波の基礎研究が主体であり、特に超音波の可視化は常に新しい驚きと喜びを与えてくれた。本稿ではこの関係の仕事を中心にして、著者の研究を大学院、小林理研、生研と三つの時代に分けて紹介している。

## 1. はじめに

私は1951年に東京大学第二工学部物理工学科を卒業してから今日まで37年にわたって一貫して超音波に関連した仕事をしてまいりましたが、その中で、特に光を測定手段とした超音波の基礎研究が途切れながらも続いていたわけでありまして、本日はこの関係の仕事を中心にして、私のこれまでの研究を振り返ってみたいと存じます。

光を使った音波の研究は前世紀末から始まっておりまして、MachやWoodが空気中で火花放電を起こしたときに出る衝撃波のシュリーレン写真を撮影しております。またAltbergは放電で生じた空気中の超音波を針金を並べた回折格子で波長分析しております。

本格的な超音波の研究はLangevin (1917) が水晶の圧電効果を用いて液体中の超音波発生に成功したことに始まります。1925年にはPierceによって超音波干渉計が発明され、これがその後の分子音響学や音波物性分野の発展の起点となりました。超音波による光の回折現象はDebye-SearsとLucas-Biquardによって1932年に発見され、これに関するRaman-Nathの理論 (1936) は1940年に能本乙彦先生によって実験的に検証されました。この頃すでに、この効果を利用した超音波光変調式のテレビ受像機が英国で商品化され、これは間もなく登場したブラウン管に取って替わられました。今から考えてもそのアイデアは驚くべきものであります。

このような超音波光回折とは別に、1922年にBrillouinは物質中に自然に存在する熱的密度変動による光散乱の理論を出してありまして、これはGross (1930) によって実験的にその存在が検証されました。これは10<sup>9</sup>Hz帯の極超音波の音速を測定する手段として期待されたのですが、良質の光源がなく、永い間、役に立つ測定結果は得られませんでした。このための理想的な光源であるレー

\*東京大学名誉教授

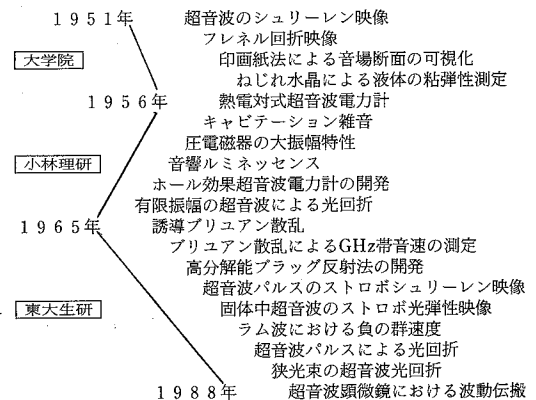
ザを用いた最初のBrillouin散乱の実験は1964年にChiaoらによって行われ、それ以来、周辺技術の進歩もあって、超音波スペクトロスコーピーにおける周波数範囲が一挙に広げられたのであります。私が東大生研に参りましたのはちょうどこの時期に当たります。

私の研究生活は大学院、小林理研、生研と三つの時代に大別できますが、その主な研究テーマを表1に示します。ここには19テーマだけを掲げてありますが、その大部分は直接、間接に光に関係したものであります。

## 2. 大学院時代 (1951~1956)

第二工学部物理工学科を卒業して、大学院に進学し、鳥飼安生先生の研究室に入りました。旧制の大学院では別に講義もなく、日本育英会から奨学金を受けて、全く助手と同じような仕事をしていました。当時の研究室では助手の藤森聰雄氏が超音波パルスの平面板からの反射と透過の実験を、また2年先輩で理学部出身の大学院学生であった松沢喜一郎氏 (現愛媛大教授) が金属の動的弾性率やチタン酸バリウム磁器による超音波発生の実験

表1 主要な研究テーマ



をしていました。

私は同級の白鳥英一氏（現山光技研）が卒業研究で組み立てたシュリーレン装置を引き継いで、超音波の可視化の実験を始めることになりました。シュリーレン法は透明な物体中の屈折率分布を可視化するために Toepler (1867) が始めた方法で、水中の超音波は疎密波すなわち周期的な屈折率変化の波でもありますので、そのままでは目に見えない水中の超音波をこの方法で見ることができます。

いろいろの写真を撮りましたが、図1は当時の生産研究の表紙になったシュリーレン写真で、左からやって来た2 MHzの超音波が針金を並べた回折格子によって回折している様子を示しています。このような干渉縞の交替現象は光の回折格子について古くから知られており、Talbot (1836), Rayleigh (1881) などによって発見されていたのですが、超音波音場を通過した光にもこのような交替現象が見られることが能本 (1936) によって見いだされております。これは、光の強さが一様で波面が波打っている位相格子と、波面は平面で光の強さが大きく変化している強度格子との交替現象として説明され、図1はこの現象を光の代わりに超音波で示したシミュレーションになっています。なお、図1の生産研究 (1952年3月号) は誠文堂新光社発行の市販雑誌で、民間会社の広告もあり、定価85円となっております。間もなく生研

の所報になりますが、広告は1965年まで続いていました。

その頃、Zernike (1953年度ノーベル賞) によって発明された位相差顕微鏡の国産化が始まっていましたが、超音波は光学的には位相物体と見なせずので、位相差法では超音波がどのように見えるかの理論計算を鳥飼先生がしていました。その結果、波面映像のときにはシュリーレン法より位相差法が高感度であることがわかりました。超音波の波面を可視化するには光源を超音波と同期して点滅させなければなりません、連続光源からの光を定在波超音波を通し、回折した0次成分だけを取り出すことで、そのような高周波の点滅光源（超音波ストロボスコープ）が得られます。位相差法の理論と実験結果は良く一致いたしました (1953)。図2はその一例です。前述の位相格子と強度格子の交替現象は回折格子の代わりに超音波を用いたときにも生じ、この方法による可視化をフレネル回折映像法といいますが、これについての鳥飼先生の理論と重畳超音波による実験結果も良い一致を示しました (1953年)。

これまで述べた光学映像はすべて超音波を横から透視した像ですが、音場の断面の強度分布を可視化する方法もその当時すでにいくつかの提案がありました。しかし、特殊な薬品や面倒な手順が必要なものばかりでした。そこでもっと手軽な方法として思いついたのが、稀薄な現

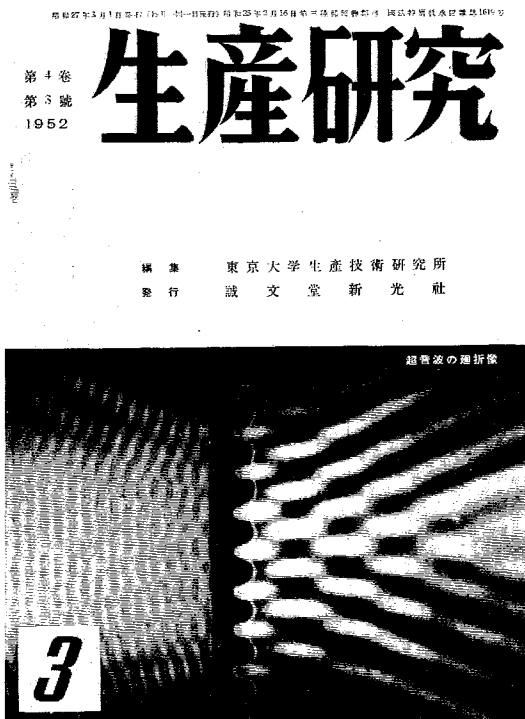


図1 生産研究(1952年3月号)の表紙になった超音波のシュリーレン映像

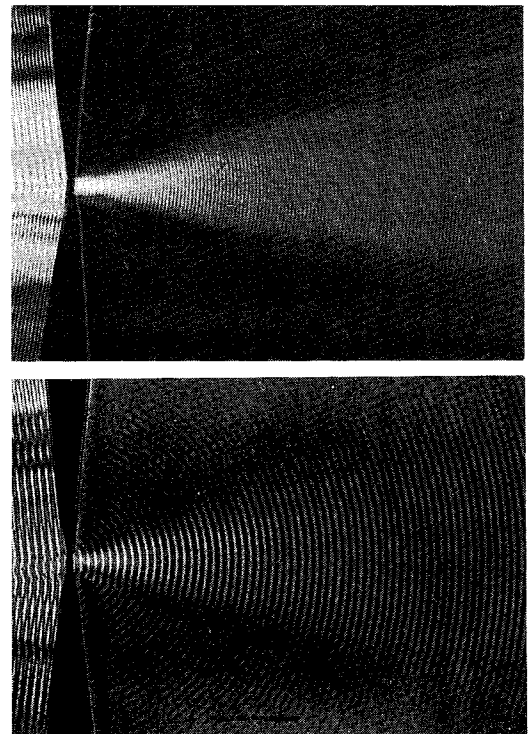


図2 スリットによる超音波の回折のシュリーレン法 (上) と位相差法 (下) の映像

像液の中で印画紙に超音波を照射する方法です。これは明るい所でできますし、適当な濃さになったら印画紙を引き出して定着します。この方法で円形的水晶音源から出る超音波の音場分布を調べますと同心円模様になりますが、音源からの距離が大きくなるにつれて円の数が減少します。このような回折音場の理論式はRayleighによって与えられておりますが、その数値計算は極めて困難でありました。鳥飼先生は適当な近似を導入して、この回折積分を計算する方法を考えられ、実験結果を良く説明することができました。その後、回折音場の計算は鳥飼先生のライフワークのひとつとして、電子計算機を駆使した広範な研究に発展していくことになります。

大学院の後期には、ねじれ振動をする水晶棒の等価回路定数を空気中と液体中で測定して、その差から液体の粘弾性を求める研究を進めました。それまで、等価定数の測定には高周波ブリッジが用いられていましたが、当時の研究室にはブリッジも標準信号発生器もない状態でした。信号源としては高安定LC共振器を自作しましたが、共振点の検出と共振抵抗の測定に双三極管と五極管を組み合わせた位相検波器を使うことを考え、高周波(40 kHz)での動作に苦労しましたが、何とか成功いたしました。私自身はその後粘弾性研究から離れましたが、この位相検波方式は国内のいくつかの研究室で高分子溶液の研究に利用されたようであります。

1956年3月に5年間の大学院生活を終わり、小林理学研究所に移りました。

### 3. 小林理研時代 (1956~1965)

財団法人小林理学研究所は東大教授であった佐藤孝二先生が理事長と所長を兼ねておられ、理論物理、結晶解析、圧電材料、超音波、音響、磁気、有機合成などの研究室があり、各分野の高名な研究者を擁して活発な研究活動を行っており、民間研究所としては極めて異色の存在でした。当時の超音波研究室には河合平司主任研究員(元横浜市大学長)の下に池田拓郎氏(現東北大学教授)と岸本匡氏(現マミヤ光機)が所属しており、これに私が加わりました。能本乙彦先生は非常勤の主任研究員でしたが、懇切な御指導を戴きました。

最初に取り組んだのは超音波音源に加わる高周波の電気パワーを測定するための超音波電力計の研究でした。自乗素子として真空熱電対を用い、MHz域でも使えるように位相補償に工夫をこらしました。その結果、特性の良いものができましたが、何といたっても熱電対が過電流に極めて弱いのが大きな欠点でした。後年、ゲルマニウムの薄板を用いたホール素子が入手できるようになり、これによって高周波の電圧と電流の乗算を行う方式の超音波電力計を1962年に開発しました。これは電子機械工業会の超音波用電力計の規格に取り入れられました。

1957年に東北大学の菊池喜充教授を代表者として「超音波キャビテーションの工学的研究」と題する科学研究費総合研究班が発足し、私もこれに加えて戴きました。まず、キャビテーションに伴う音圧波形の変化や広帯域雑音のスペクトルを測るために超小形のプローブマイクロホンを作りました。白金線の先端を熔かして球状にし、そのまわりにチタン酸バリウム粉末の衣を着せて焼結させ、直径2mmに仕上げました。これが出来上がったときに全く同じ構造のプローブの論文がソ連の雑誌に出て、がっかりしたことを覚えております。これを使って水中でキャビテーション気泡が圧潰するときに出る鋭い衝撃波を図3のように初めて捕えることができました。これについては日本音響学会から佐藤論文賞を戴きました。

キャビテーション研究と並行して、丸竹正一氏(現電通大教授)や浜野勝美氏(現東工大教授)に協力して、圧電材料研究のお手伝いもしました。水晶やニッケルに代わって圧電性磁器の超音波音源としての実用化が進むにつれて、その大振幅特性が問題となっていました。大振幅では共振曲線が非対称となりますが、そのような状態での圧電振動子の機械的Qの測定法を考え、磁器の組成との関連を調べました。図4はジルコン・チタン酸鉛磁器振動子の共振曲線が励振電圧とともに非対称となり、

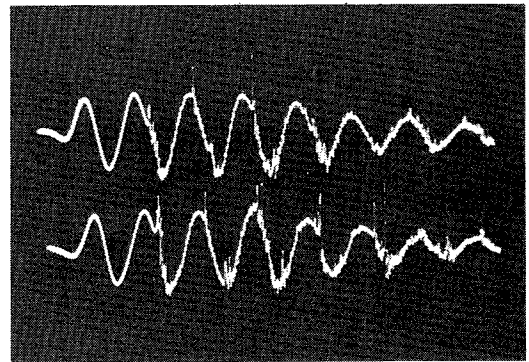


図3 キャビテーションに伴う24kHz超音波パルスの音圧波形

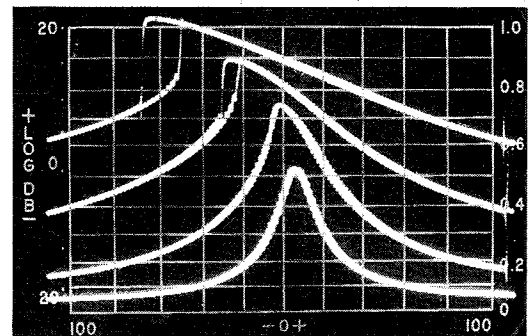


図4 Pb(Zr-Ti)O<sub>3</sub>磁器円板の共振曲線の励振電圧による変化。中心周波数は93kHz、横軸は100Hz/div

ついに跳躍が起こって、ヒステリシスを描く様子を示しています(1959年)。

キャビテーションの発生に伴って液体中で微弱な発光が起こることは音響ルミネッセンスとして古くから知られていました。それがパルス状の発光であることが1957年頃に見いだされたのですが、この発光時期がキャビテーション気泡の発生時か、成長後の圧潰時かについてまだ確認されていませんでした。これが確定すれば発光機構の仮説としての放電説と高温説のどちらが妥当かがわかり、これに付随してキャビテーションの化学作用の機構解明の一助にもなるわけです。1960年にこの研究を始め、光散乱を利用した気泡量の周期的変化と発光パルスとの同期測定によって、図5のように発光が気泡圧潰時に起こることが確認され、高温説を支持する結果が得られました。またルミノールのアルカリ水溶液がかなり明るく発光することを利用して、超音波音場の三次元可視化の方法を提案しました。図6にその一例を示します。これら一連のキャビテーション研究の成果をまとめて、1962年に理学博士の学位を受けました。

その後、有限振幅超音波が伝搬するにつれて、媒質の非線形性のために、その波形が正弦波から鋸歯状に変化する過程を光回折を用いて調べる実験を1963年から始め、図7のように極端に非対称な回折スペクトルに現れる規則性を見いだしました。これは能本先生が展開した理論によって完全に説明されました。この論文は能本先生と

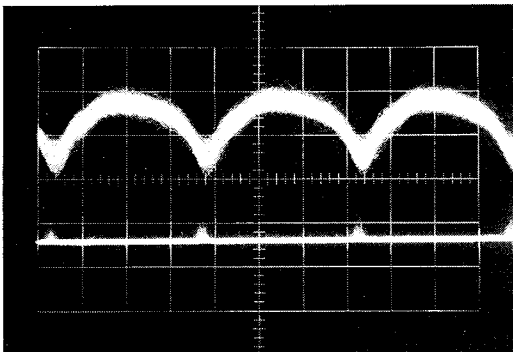


図5 28kHz超音波による水中のキャビテーション気泡の消長(上)とルミネッセンスパルス(下)の同期観測

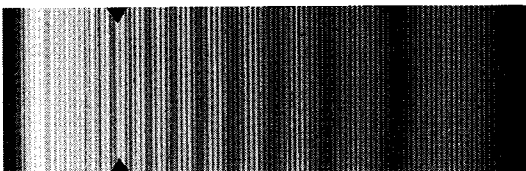


図7 1MHzの有限振幅超音波による光回折スペクトル、三角印が0次の位置。ラマン・ナスのパラメータは26、鋸歯状化率は0.65

共同で日本音響学会から再び佐藤論文賞を受けました。

小林理研では研究の合い間に音楽好きの仲間数人でバロック音楽の合奏を楽しんだことを懐しく思い出します。

#### 4. 生研時代(1965~1988)

1965年10月、9年半ぶりに助教として生研に戻って参りました。この間に生研は千葉から東京への移転を完了していました。鳥飼教授と共同して最初に取り組んだのは、その前年に成功が伝えられたばかりの誘導ブリュアン散乱の実験でした。これは極めて強力なルビーレーザー光を液体試料に当てて、その中に光波長の半分の波長を持つ極超音波を励起し、そこから反射してドップラ効果を受けた光を取り出して分光し、数GHz域での液体の音速を求めようとするものです。その装置を図8に示します。山崎正之助手(現東海大教授)の協力で、エチルアルコール水溶液について測定し、音速分散の濃度依存性に異常が現れることを見いだしました。これは1968年に東京で開かれた第6回国際音響学会議(ICA)で発表しました。

しかし、誘導ブリュアン散乱は音速測定法としては必ずしも最良の方法ではなく、ドップラ周波数の光学共振器への引き込み現象による精度不安や、強力なレーザー光による試料容器の破損などの問題があることがわかりま

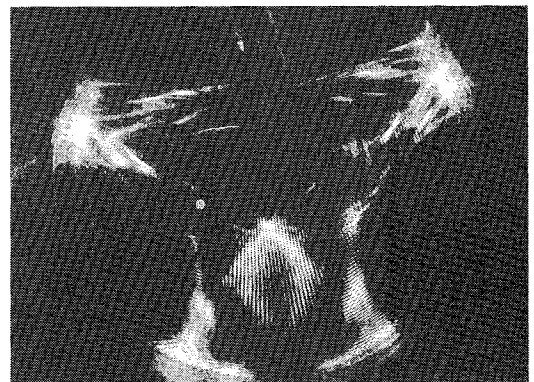


図6 直径24cmの円形水槽における500kHz超音波の干渉模様ルミノール発光映像。音源は上方中央にあり、左右に音を出している

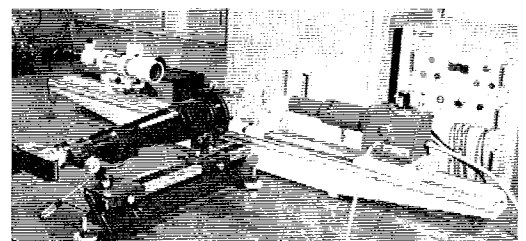


図8 誘導ブリュアン散乱実験装置、右がルビーレーザー、左手前がファブリ・ペロ分光写真装置

した。そこで古くから知られていたブリュアン散乱法に光源としてHe-Neレーザを用いる方法に転向しました。これには大学院学生の子金子透氏(現NTT)や高木堅志郎氏(現生研助教授)が装置の改良に当たり、国内では最も早く気圧掃引形ファブリ・ペロ干涉計による散乱光のスペクトル測定に成功したのではないかと考えておりま

す(1969年)。

同じ頃、超音波可視化の実験も始めました。温度によって色が変わるコレステリック液晶が入手できるようになりましたので、これを塗ったプラスチック薄板に水中で超音波を照射し、音場断面の強度分布を色の変化として可視化しました。長方形、楕円形、円環形などの超音波音源について、その距離と音場分布との関係を調べ、鳥飼先生が計算した音場分布と比較しました。

また、シュリーレン法的一种であるイソクロマート法についても研究し、超音波映像に現れる色を計算して、逆に映像の色から超音波振幅を求められるようにしました(1970年)。図9は白色光源を用い、1次回折光だけで映像を作ったときの色度図で、超音波の振幅(正しくは音場を通過した光が受ける位相変化の振幅で、ラマン・ナスのパラメータという)が増すにつれて白から黄、橙、紫、青、緑と変化しますが、これは薄膜の干渉色の膜厚による変化とよく似ています。図10はこの方法で撮影したスリットによる超音波の回折の模様で、円形音源の中心軸上断面の音場分布もこれとよく似た形をしています。このほか、音場分布の絶対測定のために、超音波の放射圧による液面の10 $\mu$ m程度の盛り上がり簡単な光学系で測定する液面レリーフ法の開発(1972年)や、1次元走査超音波ホログラフィの実験(1972年)なども行いました。これには大学院学生の高木茂氏(現NTT)や田子弘氏(現三菱化成)の協力を得ました。

この間に液体のブリュアン散乱の研究も進んでいましたが、この方法で測れるのは数GHz域に限られます。音

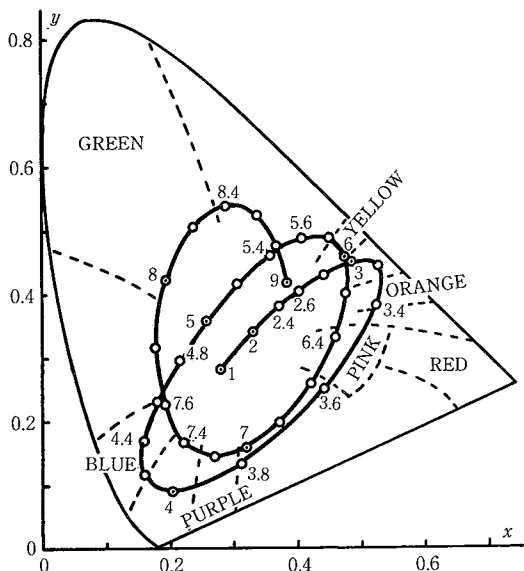


図9 白色光源によるイソクロマート映像の色度図。図中の数字は光波長540nmの緑色光に対するラマン・ナスのパラメータ

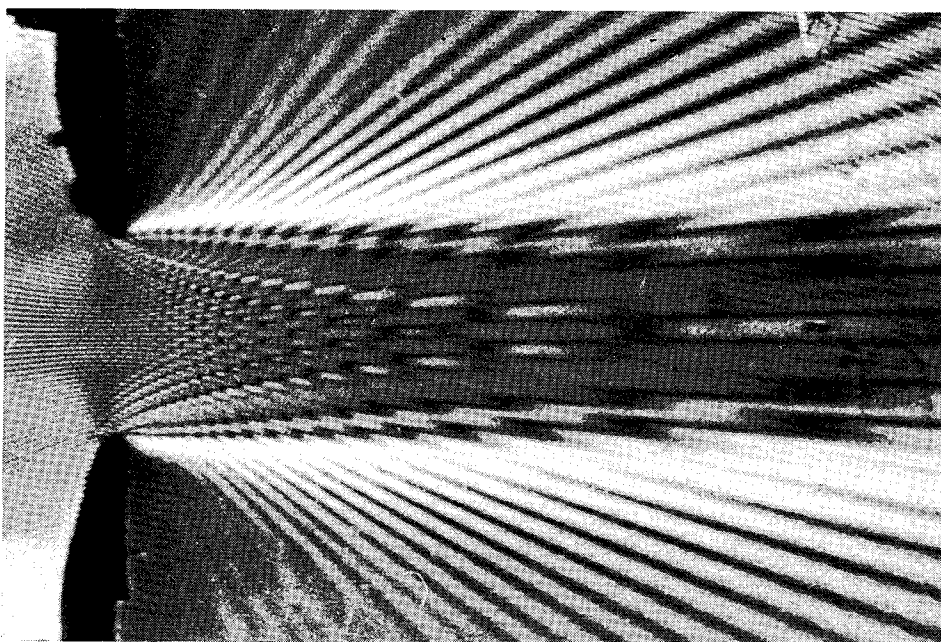


図10 15mm幅のスリットによる3.5MHz超音波の回折のイソクロマート映像(原画はカラー写真)

波物性の議論をするにはできるだけ広い周波数範囲で音速と吸収のデータが必要です。従来の超音波パルス法では数MHzから200MHzくらいまでが限度で、それ以上は超音波の減衰が大きくなるため著しく測定困難になります。この1桁の周波数範囲の空白を埋めるための新しい技術開発を高木堅志郎助手と始めたのは1973年であります。連続波音源から出た超音波が液体中で急速に減衰すると、その周波数は一定ですが、波数に分布が現れます。これにレーザー光を入射させ、音波によってブラッグ反射された光の角度分布と中心角を光ヘテロダイン技術を用いて高い角度分解能で測定することによって、試料の吸収と音速を求めることができます。音源には東北大学の中鉢研究室で作って戴いたZnOのスパック膜を用いました。

初期の測定範囲は250~600MHzでしたが、従来のパルス法とブリュアン散乱法の間をつなぐ有力な方法であることが確認できましたので、高分解能ブラッグ反射法(HRB法)と名付けました。図11に当時の測定装置を示します。その後、電気系と光学系の改良と測定結果の解析が高木堅志郎助教授、崔博坤助手によって進められました。現在では100MHz以下から1.9GHzまでに測定周波数が広げられ、より低周波のパルス法、共鳴法および高周波のブリュアン散乱法と合わせて、100kHzから8GHzくらいまでの範囲をカバーできる世界で唯一の研究室になっております。超音波スペクトロスコピー、特に液体の音波物性分野の進展に少なからず寄与できたものと考えております。

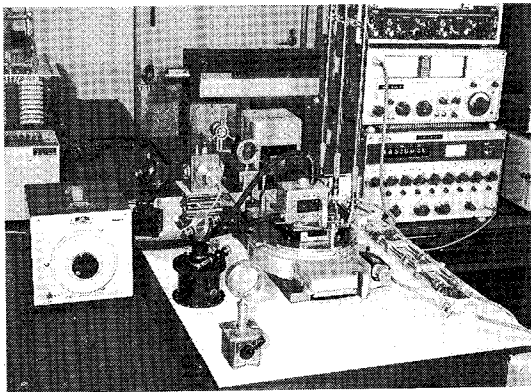


図11 高分解能ブラッグ反射法の初期の実験装置 (1974年)

1975年頃から再びシュリーレン可視化の研究を始めました。そのきっかけは、パルス法による音速測定において、多重反射する超音波パルスが一見異常な変形を起こし、その解釈に困っていたからです。シュリーレン光源として発光時間が $1\mu\text{s}$ 以下のストロボ光源を用い、音源に送波パルスを加えてから、適当な遅延時間を置いてストロボ光源を発光させます。この遅延時間を調節することによって、超音波パルスの静止像やスローモーション像が得られます。この可視化によって当初の問題はすぐに解釈がつかまりました。図12は水晶音源と受波器の間で多重反射する超音波パルスの映像と受波波形ですが、共振形変換器で反射するパルスはその表面からの直接反射成分と変換器が共振を始めることによる逆相の再放射成分との和と考えることで説明できます。パルスの場合には

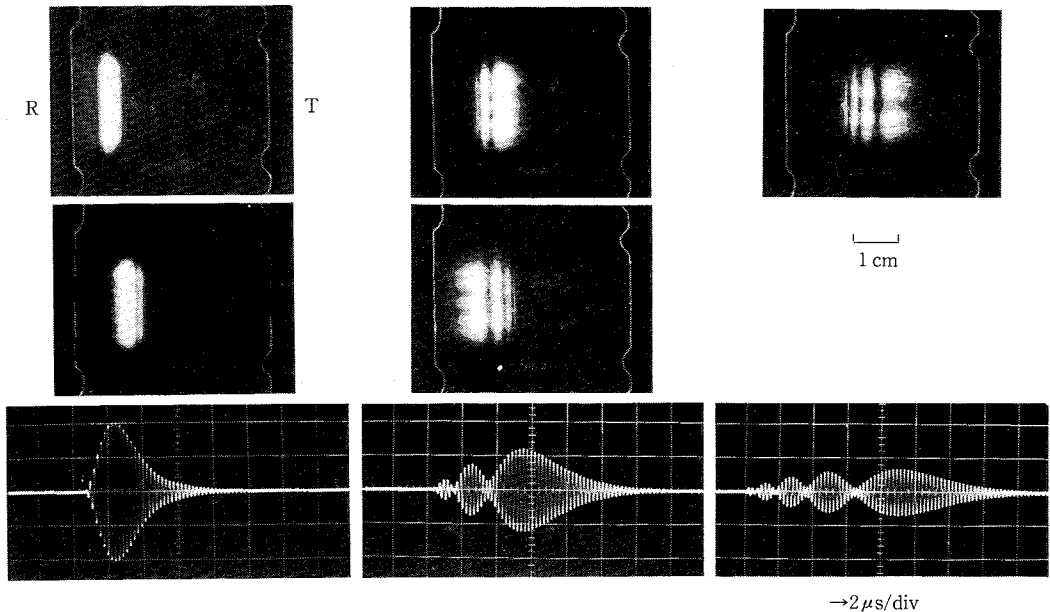


図12 向き合った水晶送波器 (T) と受波器 (R) の間で多重反射する  
4.6MHz超音波パルスの時間経過(上)と対応する受波出力波形(下)

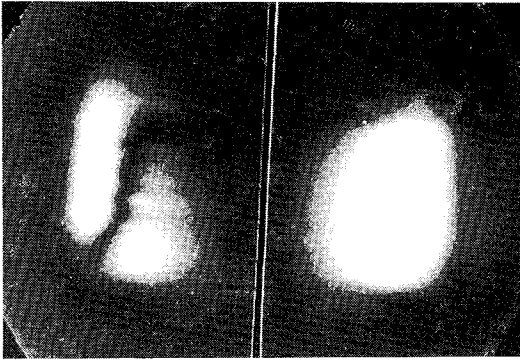


図13 1 mm厚のアルミ板に2.7°で入射した3.0MHz超音波パルスの反射(左)と透過(右)

連続波理論の常識からは予想できないような現象がしばしば現れ、こんな時にパルスの可視化は有力な解明手段になります。

続いて板に斜入射する超音波パルスの反射と透過を調べているうちに図13のような映像が得られました(1977年)。この角度では板上に励振された板波からの再放射のために通常は反射パルスは上向きに尾を引く形になるのですが、この図では再放射成分が下にずれています。これは特定のラム波において位相速度と群速度が逆向きになること、すなわち負の群速度が実在することの実験的証拠となるものであります。

1981年の生研公開で、ストロボシュリーレン装置を用いて、医用超音波診断装置のリニア電子走査探触子から出る超音波パルスの移動と集束のスローモーション映像を展示しました。これ以後、国内の診断装置メーカーはこぞってシュリーレン装置を導入しました。

1982年からガラス中の超音波パルスの可視化を始めました。固体中の超音波は縦波、横波のほか、境界面で反射するときモード変換が起こり、表面波も発生します。これらのすべてを可視化するには円偏光を用いた光弾性法を使い、ストロボ光源も水中用より発光時間の短いものを用います。これによってガラスブロック内でのモード変換、ラム波の振動モードなどを調べました。

1984年からは和田八三久東大名誉教授を代表者とする特定研究「超音波スペクトロスコピー」のグループに加えて働き、可視化設備をととのえることができました。この研究計画の中に超音波顕微鏡における波動伝搬の可視化があり、水中とガラス中での超音波パルスをシュリーレンと光弾性を併用して同時に可視化する方法を考え、図14のように水とガラスの境界面における漏洩表面波の可視化に成功しました。これは1987年度生研公開にビデオ展示し、超音波顕微鏡関係者に大きな反響を呼びました。これらの研究には李孝雄技官の協力を得ました。

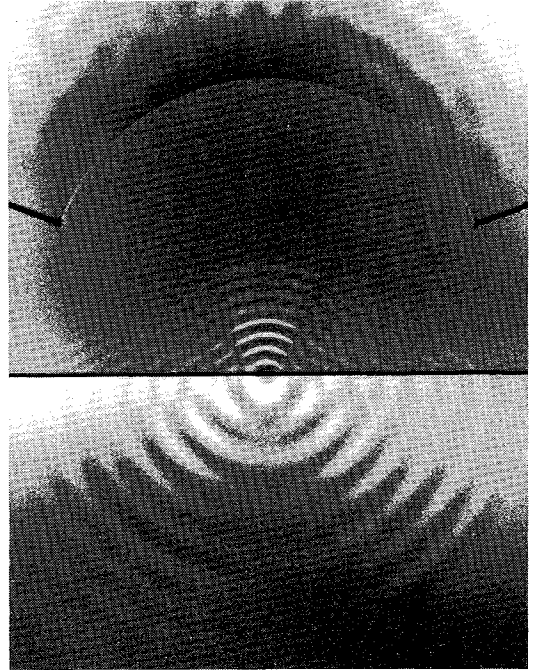


図14 超音波顕微鏡における波動伝搬のモデル実験。上のガラスレンズから出た1 MHz超音波パルスが水中を進み下のガラスブロック表面に集束した後に反射した状態で、漏洩表面波とその再放射波が見られる

この研究と並行して、超音波による光回折の研究も進め、超音波パルスによる光回折や、狭光束の超音波光回折などについて理論計算と実験を行い、良い一致を得ました。これらの測定回路については小久保旭技官の協力を得ました。

## 5. お わ り に

本日は「超音波と光」と題しましてこの関係の研究を主として御紹介いたしました。副題にもありますように古いテーマではありますが、常に新鮮さを感じながら過ごしてまいりました。37年にわたる研究テーマは多岐にわたり、本日は言及できなかったものも数多く、またこれに御協力戴いた諸氏の氏名を割愛せざるを得なかったことを申し訳なく存じます。この間に多くの優れた先輩と同僚の御指導と御支援を賜ることができ、また多くの職員や学生達の御協力を得て超音波の研究を進めることができ、超音波物理学および超音波工学の進展にいささか寄与できましたことは私にとって誠に幸いであり、心から有難く感謝している次第であります。

終わりに生産技術研究所の益々の発展をお祈り致します。本日は長時間にわたり御清聴戴き有難うございました。(1988年6月13日受理)