

● 講演

超音波応用の歴史と展望

菊池 喜 充

菊池喜充：正員 東北大学電気通信研究所

Historical Review and Future Development of Ultrasonic Applications. By YOSHIMITSU KIKUCHI, Member (Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, Sendai-si).

資料番号：昭 44-96〔講演-6〕 昭和 44 年 3 月 28 日東北大学工学部における昭和 44 年電気四学会連合大会特別講演要旨

緒 言

超音波の応用は大別すると、超音波の波を手段として遠方の情報をつかまえる通信工学的応用と、超音波のエネルギーを直接応用する電力工学的応用となる。前者には、音響測深法、魚群探知法、超音波探傷法、医学的診断法、などのような超音波工学独自の応用のほか、圧電フィルタ、磁わいフィルタ、機械フィルタなど、超音波周波数での固体の振動を利用した通信回線用の周波数フィルタへの応用があり、またこれに加えて、超音波遅延線への応用があって、周波数分散形、周波数非分散形とも各方面に応用されている。

一方、電力工学的な応用としては、超音波洗浄機、超音波加工機、超音波溶接機、など工作機械分野への応用をはじめ、超音波エネルギーを生物体に作用させて治療的に応用したり、超音波による手術など医学への応用も広く展開されつつある。また、超音波の化学的作用も化学工業の反応プロセスへ盛んに導入されている模様である。超音波の化学的作用のうち顕著な作用としては、高分子の解重合、粒子の分散・凝集作用、混和作用、乳化作用、酸化作用、圧力反応の促進作用などがあるので、これらの作用を単独または複合して応用しているものと思われる。なお、超音波によ

る分子構造の決定、化学反応の測定なども化学工場の自動化への手段につかわれつつあるものと考えられる。

以上のような古典物理・化学的応用のほかに、最近ミクロの世界における超音波と電子との相互作用が工学の分野へ入りつつあって、電子音響学、または量子音響学と呼ばれている。

本講演では、これら超音波応用の歴史的な背景と現状を述べ、将来への展望としていささかの私見を述べた。

音響測深・魚群探知

音響による測深法は 19 世紀末にはすでに航海用機器として世に現われている。そのころの音響測深機には可聴周波数の音波が用いられていて、1910 年代

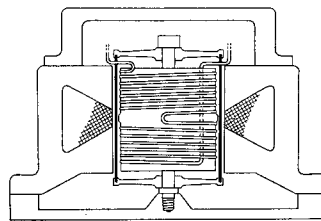


図 1 フェッセンデン送波器の構造

には図 1 に示すフェッセンデン送波器⁽¹⁾といわれる強固な構造のものが現われている。動電形の水中共振器で、高周波発電機で駆動し

て強力な測深音波を発生した。用いられた周波数は 1000 サイクル, 3000 サイクル程度である。水の音響インピーダンスが空気に比べて 3000 倍も大きいので, 大きな駆動力が必要であるから, 可動線輪に相当する部分はしっかりした銅の円筒であって, この円筒が固定の一次コイルからの誘導電流をうけて, 直流磁場との間に駆動力を発生する方式がとられている。

その後, 1918 年に水晶の圧電効果を巧みに利用した超音波送波器が発明⁽²⁾されるに及んで, 音響測深に超音波が使用されるようになった。図 2 はその構造図である。

1930 年代に成層したニッケル薄板による磁わい振動送波器⁽³⁾が発明され⁽⁴⁾, それまでのランジバン送波器は急速に磁

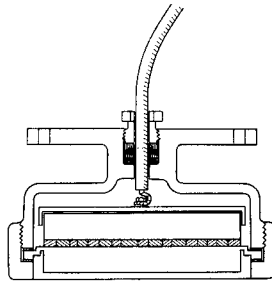


図 2 ランジバン送波器の構造

わい送波器に (図 3) に変わって行った。これは, ランジバン送波器には水晶片をモザイクに, しかも振動応力の腹に近い面で接着して作るという工作上的なむずかしさがあったし, その上, 水晶の圧電効果は物質定数として定まっていて改良の余地というものがないのに反し, 磁わい送波器には工作上的困難がほとんどなく, さらに各種の合金の開発によって磁わい効果の大きいものをつくり出す可能性もあるということなどが, 大きく評価されたためであると考えられる。昭和 9 年にはこの磁わい振動子を用いた超音波の水中電話の実験⁽⁵⁾が塩釜湾で行なわれ, 3 km の通信に成功している。

なお, 磁わい振動子は巻線数の選び方によって自由にインピーダンスを選べるので電気工学的取扱いが便

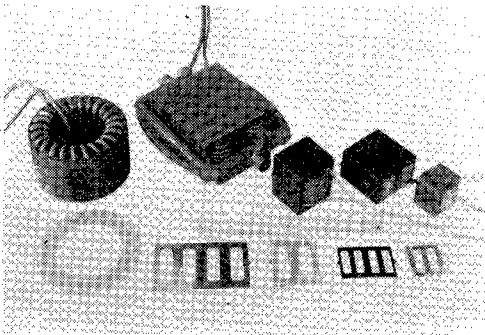


図 3 積層磁わい振動子

利であることも, ランジバン送波器から磁わい送波器へ急速に切り変わって行った原動力となったものと考えられる。しかしわが国ではこの転換は遅れをとった。1935 年に Wood ら⁽⁶⁾の磁わい式音響測深機が JIEE に発表された。発振方法として, 振動子のコイルへの直接コンデンサ放電を採用し, エコーを湿式記録紙に画かせている。わが国へ最初に輸入された磁わい式音響測深機には巻物形振動子⁽⁷⁾が用いられていたようである。その後, 間もなく日本でも磁わい式の音響測深機が製作されたが, 振動子は環状振動子で, 円すい形の反射笠をつけて海底方向へ指向性をつけている。

磁わい合金

磁わい振動子用合金薄板の研究は, ずっとわが国が世界をリードしていたと考えられる。しかし研究された各種の良好な合金は, コバルトを大量に含む合金であったり, 圧延して薄板にする技術に問題があったりして, 実際には純ニッケルが長い間使用された。第二次世界大戦に突入してニッケルが不足し, その不足が特にはなほだしかったわが国において, 鉄を主成分とし, アルミニウムを 13% 含有する合金が, 東北大学の金属材料研究所で発明され⁽⁸⁾, アルフェロと命名された。AF 合金とも呼ばれている。これはニッケルに匹敵する磁わい特性⁽⁹⁾を有するので, 極端な低温ぜい性のある合金であったにもかかわらず圧延技術の開発にたいへんな努力が払われ, ついに大量に生産されるようになった。ニッケルがたやすく入手できる今日でもコスト上の理由からこのアルフェロが盛んに用いられている。その後, このアルミニウム・鉄合金は世界の注目するところとなり, 1953~1955 年にわたって米国で主として圧延方法の研究が進められ⁽¹⁰⁾, 整・不整格子変態の温度で冷間圧延する方法が発見された。特性も多少良好になっているようであって⁽¹¹⁾, Alfenol と名づけられている。ソ連でも 1964~1967 年にかけてこの合金が再び研究されている⁽¹²⁾。注目すべきこととしては圧延方向に 70×10^{-6} という大きな静磁わいの生ずる製造方法が見付かっていることであろう。なお実用性については甚だ疑問であるがめずらしいものとして, cobalt rondel というスポンジ状の metallic cobalt の静磁わい量が, あらゆる合金材料のレコードを破って 140×10^{-6} という大きな値になるという報告がある⁽¹³⁾。

魚群探知

さて、話は 1947~1948 年に戻るが、音響測深機の感度を 20 dB 程度上げて用いると魚群からのエコーも探知できるということがわが国で発見された。漁業にとって一大エポックであったのである。初期の魚群探知機は大形船舶用の音響測深機とあまり変わらないきわめて大げさなものであったが、わが国の通信機器メーカーの努力と競争の結果、現在では片手で携帯できるほどのものにまで進歩している。また漁業の種類によってそれぞれに適する専用機を設計製作して用いるという時代になっている。

チタン酸バリウム磁器の出現

これらの発達段階において、新しい圧電材料としてチタン酸バリウム磁器の普及が大きく貢献したことは否定できない。チタン酸バリウムという人工鉱物が大きな誘電率と大きな電わい効果を有することは、すでに昭和 19 年 (1944 年) にわが国で発見され⁽¹⁴⁾、物理学分野の学者の注目するところとなっていたが、昭和 26~27 年 (1951~1952 年) までは産業界には現われなかった。機械的強度の強い安定な磁器が生産されるようになってから、前述のランジバン送波器の水晶の代わりにこれを用いる研究が工学技術者の手で進められた⁽¹⁵⁾。構造がランジバン形としての基本構造と全く変わらないので、接着という問題はいつまでも残ったが、チタン酸バリウムの誘電率が水晶より格段に大きく、圧電性もすぐれているため、電気的インピーダンスが手ごろな値にできてしかも変換能率の良好な点を買われ、比較的低出力用の超音波送波器はほとんどすべてこの振動子に変わって行ったのである。

磁わい振動用フェライトの出現

ところが、昭和 30~33 年 (1955~1958 年) にかけて磁わい振動用フェライト^{(16),(17)}が発明され、図 4 に示すように粉末焼結成形法で最終的形狀の磁わい振動子が製作できるようになって、再び磁わい送波器が見直されることになった。基礎的研究⁽¹⁸⁾と企業努力の結果、大振幅の機械的応力にも十分耐えるものが生産できるようになり⁽¹⁹⁾、なお、この頃からバリウム・フェライトという優秀な永久磁石材料が世に現われたので、バイアス磁界を永久磁石でかける型式のものが広く採用されるようになった。わが国で工業化された磁わい振動用フェライト材料は、可能性のあるほとんど

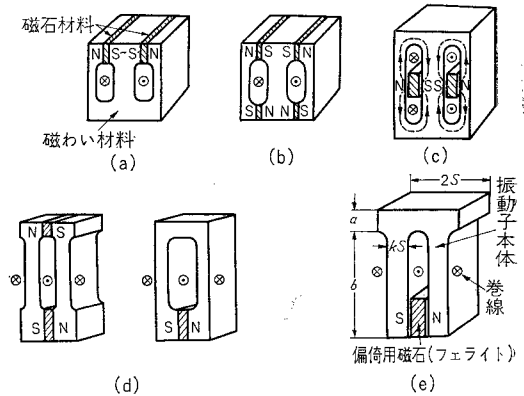


図 4 フェライト磁わい振動子の構造

全範囲のフェライトについて材料学的なサーベイ⁽²⁰⁾を経た上で決定された成分のものであって、Ni-Cu-Co フェライトである。Co 含有量をごく少し制御して、周波数温度係数のきわめて小さい成分のもの⁽²¹⁾ ($0.5 \sim 1 \times 10^{-5}$ 前後)と、電気機械結合係数の大きいもの (23~27%前後)とが現在市販され需要が拡大しつつある。一方、チタン酸バリウム系の磁器にもすてがたい特徴もあって、チタン酸ジルコン酸鉛⁽²²⁾ (PZT と略称) というさらに圧電性のよいセラミックが出現したりしているので、現在、両者は超音波産業上では競争の形になっている。

音響測深・魚群探知の展望

音響測深機および魚群探知機の発展の歴史的背景には超音波送波器の発達がきわめて密接に関連している。したがって、今後のこの面における展開は直接的には超音波送波器の格段の開発ということになるが、どのように応用上の要求が進んで行くかを考えて見なければならない。

すでに開発途上にある応用として、まずあげなければならないのは水平方向の魚群探知であろう。すでに鯨の探知には相当大がかりなものが実用されている。軍用の水平ゾナは金に糸目をつけざきわめて大掛りなものへと進んでいるようであるが、産業機械としての魚群探知機は、この機械をつけることによって得られる漁獲収益の増加分が機械のコストが十分償却できるものでなければならない。したがって、水平魚群探知のシステムに知恵をしぼるとともに、そのシステム・エンジニアリングの面から出てくるであろう指向性に関する各種の要求が、数 kHz から数百 kHz の範囲で具体化できて、しかも、大電力・高効率を保持

できる送波器の研究が不可欠であると考える。

また、海洋開発に関連して高い静水圧の下における音波の送受波が必ず問題になってくるに相違ない。体積誘わい (volume striction) が小さい誘わい材料なら、理論的には静水圧で感度が低下しないから⁽²³⁾、純ニッケルや Ni-Cu-Co フェライトなどによって相当な程度までその要求にこたえられるであろう。一方、高い静水圧の下では超音波キャピテーションによる出力の低下は起こらないから、振動子はその材料の有する最大極限出力⁽²⁴⁾まで使用できるはずである。そのためには、振動子に加わる音響放射インピーダンスを水の3~4倍の値に高める機械的変圧器の研究が必要であろう。固体ホーンも一つの手段であるが、指向性との関連で考える必要がある。ホーンのみにとらわれないうで、電気・音響類推の原理を縦横に活用して通信線路理論、ないしはアンテナ関係の理論から学ぶべきところも多いはずであると考える。

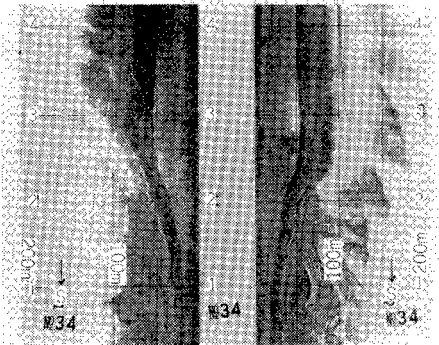


図5 ボトムソナー記録例

海洋開発に係る音響学的技術のうちで、海洋地質の探査も重要な命題である。まず海洋地形の測量は現在すでに超音波による海底地形の表示手段が発達しつつあり^(25a)、bottom sonar と呼ばれている。図5はその記録の一例である。海底より下の地質の音響探査となると、超音波では減衰が大きいのので、どうしても低周波の音波ということになる。現在、スパーカーと称する方式^(25b)が開発されている。船から曳航している放電ギャップを水中でスパーク放電をさせてパルス性の低周波音波を放射し、海底下の地層を記録するものである。その方式は音響測深法と変わらない。

超音波探傷法

超音波探傷法は現在産業上重要な地位を占めているが、1942年に Firestone^{(26),(27)}が MHz 域の超音波

パルスで鋼材内の傷からのエコーを検出するという方式を考え出した。これが今日の超音波探傷法の元祖になったと考えられる。無線のレーダー技術が多分に取り入れられたものである。わが国における研究は残念ながら終戦後の1947年頃に始まったことと、無条件降伏に伴う連合国特許の無条件取扱いのためとで、わが国の産業界は米国特許で相当いじめられた。しかし、それにしてもかなり早い時期に研究に着手できたので昭和24~25年(1949~1950年)には模倣の時代は過ぎ、わが国の重工業現場で実際に用いられた機械はほとんどわが国の技術によるものであったのである。ただ斜角探傷法⁽²⁸⁾だけは米国特許に完全におさえられ、手も足も出なかったと見られる。

超音波探傷法において現在の大きな問題は各種の鋼材製造現場における連続探傷方法であろう。日本学術振興会でこの問題を取り上げてきたが、ついに間に合わず、自動探傷機の輸入という事態が最近目立ってきた。自動探傷は機構的な部分に大変費用がかかるので、わが国の通信機メーカーの手におえなかったのかも知れないが、ちょっと残念である。

超音波探傷法はこのような工業用材料検査のほか、重工業的機械の保守用としても広く用いられていて鉄道レールの保守検査⁽²⁹⁾、車軸の疲労傷の検出、船用エンジンやプロペラ軸の保守検査、航空機のルーチン整備など種々の場面で活用されている⁽³⁰⁾。これらの超音波探傷法におけるこれからの開発目標としては、検査対象ごとの専用機の開発という方向であろうが、音響学としては固体媒質内の波の伝搬モードに関する研究を、探傷法の適用される実体に則した方法で体系化しなければならない。まだ工学的手法の取り入れ方が足りないと考ええる。

超音波医学診断法

超音波を医学的診断に応用したのは、オーストリアの Dussik⁽³¹⁾ が最初と考えてよい。つづいて米国の Bolt ら⁽³²⁾、Wild ら⁽³³⁾、ドイツの Güttner ら⁽³⁴⁾の報告があり、わが国では1951年に菊池、田中、和賀井、内田ら⁽³⁵⁾の研究が開始されている。Dussik, Bolt ら初期の研究者の用いた方法は透過の陰影を用いるものであったが、その後はほとんど発達していない。現在、臨床にまで広く用いられている方法は、Wild, 菊池らの展開した“反射法”である。

反射波の表示手段は、ブラウン管による Aスコープ、Bスコープ、Cスコープ、PPI、などレーダ技術に

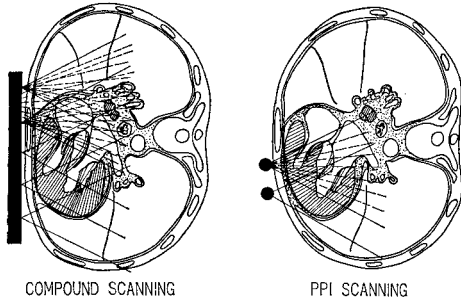


図6 コンパウンドスキャン

おける表示方法と同じ方法が用いられているほかに、図6に示すようなコンパウンドスコープという特殊の表示方法が持ち込まれている。人体に対し、超音波送受波器（探触子という）の位置を変化しながら、さらに扇形走査運動または直線反復運動をさせるものである。これらの方法による人体横断図を医学においては超音波断層像（または断層写真）と呼んでいる。

心拍同期超音波断層写真法

このようにして人体のほとんどすべての臓器の任意の断面が描写できるようになっているが、ただ一つ、心臓の超音波断層像を得ることは、その内部が独特の構造である上、はげしく拍動している関係から、最近まで困難であった。これらに対処するため、心拍と同期させてある任意の心拍位相での断層像のみを得る方法が創始された⁽³⁹⁾。心電電流を利用して超音波装置を心拍で同期制御する方法である。図7はこの方法による心臓の静止断層像である。これは日本が諸外国にさきがけて開発した独特の方法であって、まだ、このカテゴリの報告は世界のどこからも出ていない。さらに進んで、このようにして得られる任意の心拍位相での心臓の断層像を、心拍位相の順につなぎ合わせて動画フィルムとし、いわゆるキネマトグラフィ的に観察できる手段も生まれてきた⁽³⁷⁾。

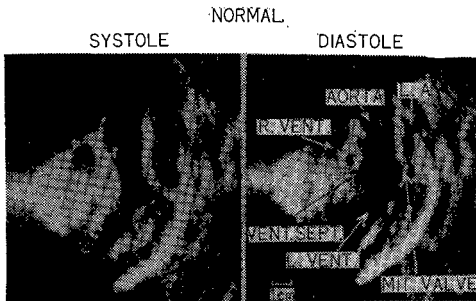
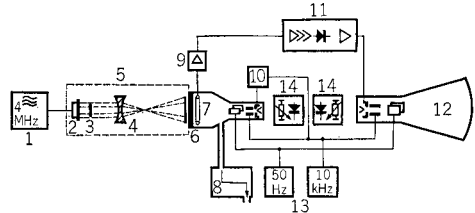


図7 心拍同期心臓超音波断層写真

直接映像法

いままで述べた映像法はパルス超音波による反射法であるが、このほかに連続波による直接映像法がある。これは音響レンズを用いて被検査体の音響的実像を映像槽に結ばせるというものである。映像槽としては、1939年に Pohlman⁽³⁸⁾ がアルミニウム箔粉の懸濁液を使った。一つ一つのアルミニウム箔は超音波によって小形のレーレ板のように働き、可視像が現われる。また図8は Sokolov の考案⁽³⁹⁾にもとづき、1958年にドイツのエーナ大学で試作された電子管方式の映像法で、図中6と記した圧電水晶窓に超音波の音波像をむすばせ、圧電による電荷の像を電子線でスキャンニングするというものである。これら直接映像法にどれだけの実用的な意義が出てくるかはまだわからない。医学的診断にもまだ実用されていない。



電子走査式映像装置 (Freitag & Martin)

図8 超音波による直接映像法の一例

メカニカルフィルタおよび遅延線

固体の機械的共振は一般に共振せん鋭度、 Q が電気的 LC などによる共振回路で得られる Q より格段に高いので、たとえば図9に示すように機械的共振子を適当な機械的スティフネス素子で結合して固体回路を形成し、通信用機器のフィルタとして用いられている。

このような考えが現われたのはかなり古く、1920年代にすでに Stewart, Lindsay⁽⁴⁰⁾ らによってその時代までの方法がまとめられており、1940年代には形

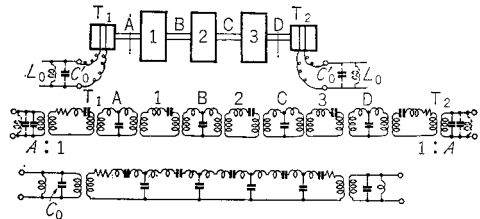


図9 メカニカルフィルタの例 (短円棒を共振子に用いた場合)

式開発の努力が払われている。しかし実用化は 1950 年代に入ってからであると見られる⁽⁴¹⁾。これらの技術はすべて電気・音響類推原理に基づく等価回路で回路網学的に取り扱われる。純粋に音響学の受け持つ部分は共振子の振動モードである⁽⁴²⁾。

このような純機械的振動回路によるメカニカルフィルタに対して、磁わいまたは圧電共振子そのものの電気インピーダンスを電氣的フィルタの素子として回路網を構成する方式のフィルタ⁽⁴²⁾、⁽⁴³⁾も実用されている。この方式のものもメカニカルフィルタと呼ばれることもあるが、前者と区別するため、磁わいフィルタまたは水晶(圧電)フィルタと呼ばれている。磁わい振動子をラチス形に接続したり、あるいは適当に差動動作⁽⁴⁴⁾させれば、減衰極の存在するフィルタが簡単に得られる。これは産業的に興味深いもの一つと考えられ、フェライト磁わい振動子を用いた実用化の研究など⁽⁴⁵⁾が発表されている。

一方、チタン酸バリウムまたはチタン酸ジルコン酸鉛磁器の共振子による圧電フィルタもすでに各種のシリーズが市販され実用されている。455 kHz, 1 MHz 程度までの共振子は普通の厚み振動子が用いられるが、10, 30, 60 MHz のような高周波になると、エネルギーとじこめ形共振子⁽⁴⁶⁾といって電極の直径だけを小さくした共振子が発達してきた。1枚の水晶片に何個かの独立共振子を作ることもできる。これは uniwafer 形と呼ばれている⁽⁴⁷⁾。

一方、多重モード形フィルタと呼ばれるものが開発されている⁽⁴⁸⁾、⁽⁴⁹⁾。これは1個の圧電振動子の電極を分割し、一方の電極では対称モード、他方の電極ではたとえば斜対称モードというように別々のモードを励振すると、機械的振動の結合によって、外部の電氣的接続なしにラチス回路と等価なフィルタが構成されるという考えのものである。このような多重モードのフィルタは今後の興味ある研究課題の一つとなるものと考えられる。

超音波の伝搬速度が電波に比べてきわめて遅いという性質を積極的に利用して信号の遅延線が開発されている。通信信号を超音波に変えて金属線または金属帯の一端から入力し、適当な長さの所で受波して遅延させる形式のもの⁽⁵⁰⁾、不正多角形石英板の中を何回も多重反射させながら伝搬させて、所要の遅延を得る形式のもの⁽⁵¹⁾などがある。また最近では固体の表面波を利用する遅延線も研究されている⁽⁵²⁾。なお、細長い金属線または帯を用いる方式の場合、超音波の波

長に比較して太い線、または帯板を用いれば周波数分散形の遅延回路となる。将来の問題としては一般の電子回路の IC 化に対応して、メカニカルフィルタの IC 化を進める必要がある。表面波による固体遅延線や、多重経路干渉法による遅延回路などは特に IC 化の容易な対象であろうと考えられる。

超音波エネルギーの応用

1927 年に W. Wood と A.L. Loomis⁽⁵³⁾ が 30 万サイクルの強力超音波で各種の実験をしている。放射圧のこと、ガラス板に孔があげられること、乳化作用のあること、化学反応や結晶化などが促進されること、生物学的作用などを報告している。この報告はほとんど定性的記述ではあるが、現在の応用面の大部分を暗示していたとみることができる。このような強力超音波のエネルギーそのものを産業面へ応用する技術は近年になって長足の進歩を見せ、Wood らの水と油の乳化のデモンストレーションはむしろ超音波洗浄の方向へ応用され、何十キロワットのユニットから眼鏡屋の店頭の小さな洗浄機まで市販されるようになってきた。精密機械工業がミクロンの精度にまで進んできた今日、機構部品表面の清浄さもミクロン以下のよごれが問題となり、超音波洗浄が広く採用されている。繊維工業、油脂工業、薬品工業、酒造工業、等々においても強力超音波応用の特許が多数現われている。これらの応用は今後拡大する一方と考えられる。

一方、超音波周波数の振動を利用する切削・加工も産業界の各方面に実用されている。その代表的なものに衝撃研摩法 (impact grinder)⁽⁵⁴⁾ がある。超硬質合金とか、水晶、ダイヤモンドなどきわめて硬いものにあてて研摩的に加工する方法である。また、細線の線引加工のダイスを超音波周波数で振動させるとスムーズに細線が製造できるという研究などがあり⁽⁵⁵⁾、また一方には、超音波振動で金属面と金属面とを裸でなじみ合わせる溶接法⁽⁵⁶⁾が産業の各方面に取り入れられている。

特に洗浄・乳化関係では、できるだけキャビテーションを発生できるような手段の導入が望まれる⁽⁵⁷⁾、⁽⁵⁸⁾。キャビテーションしきい値は、(1) 水の空気溶解度の増加で下がり、(2) 周波数が高くなると上がり、(3) 振動子面が水にぬれやすい材質であるほどしきい値が上がる。また、超音波パルスの放射に対するキャビテーションも詳しく研究され、(4) 0.数ミリ sec 以下のパルス幅では無キャビテーション放射ができるこ

と、(5) パルス放射の休止時間が長いほどキャパシタンス値の上がること、などが明らかになっている⁽⁵⁹⁾。

強力超音波の応用は医学面にも昨今急速に渗透し、医用器具の洗浄に専用機械が市販されるようになったが、一方、直接生体へ照射して種々の物理療法的な効果をあげる方法が普遍化しつつある⁽⁶⁰⁾。また、集束超音波⁽⁶¹⁾・⁽⁶²⁾を用いて生体内部の一点を破壊する手段も、生理学的⁽⁶³⁾・病理学的⁽⁶⁴⁾研究手段として盛んに用いられているばかりでなく、臨床的手術の手段⁽⁶⁵⁾としてその適用範囲が拡大してきた。これらの面における目前の問題は、生体内における超音波強度の測定法がまだ確立されていないことで、理工学関係者の協力が強く望まれている。

電子音響学⁽⁶⁶⁾・⁽⁶⁷⁾

電子音響学(acoustoelectronics)という用語は1965年に私共が提唱⁽⁶⁸⁾したものであるが、その後あまり学界でも異論がなく、今日では国の内外⁽⁶⁹⁾で用いられるようになってきている。「電子工学と音響学との境界領域の学問」という積りのもので、主として電子との相互作用を取り扱う。周波数範囲が超高周波域になるのは、相互作用を巨視的な量としては握できるようにしようとする結果であると考えべきであろう。物性論的にはきわめて興味ある問題が続々と提起され、まず金属中における超音波の伝搬減衰と超電導現象^{(70)~(73)}との関連性や、フェルミ面によるその変調現象⁽⁷⁴⁾・⁽⁷⁵⁾、magnon-phonon相互作用⁽⁷⁶⁾などの研究が行なわれている。最近インジウム薄膜の超電導状態における電子と超音波の相互作用を利用して、10 GHzの超音波を能率よく発受信した報告がある⁽⁷⁷⁾。また、YIGの薄膜でのmagnon-phonon相互作用を利用して、1~4 GHzにわたる可変周波数のトランスジューサができるという報告があり⁽⁷⁸⁾、また、YIGの単結晶棒で2.1 GHzで200 MHzのbandを持つトランスジューサができるという報告⁽⁷⁹⁾もあり、これらの分野は工学的にも興味ある分野となりつつある。

半導体中の超音波伝搬については、伝導電子と超音波が変形ポテンシャル、あるいは圧電性を仲介として相互作用を持つので面白い問題がいくつも出てくるのであって⁽⁸⁰⁾、電子の粒子性またはスピン性、あるいはその両性質と音響波動とが直接的にまたは間接的に関連し合う現象が盛んに研究されている。

工学面におけるこの分野の研究課題としては、ドリフト電子と音響波動の相互作用による進行波増幅現象の応用である。1961年にこの現象が発見⁽⁸¹⁾されて以来、VHF・UHF帯における超小形の増幅器を得ようとして研究が進められてきた^{(82)~(84)}。その目的達成のために、超高周波域超音波のトランスジューサの研究⁽⁸⁵⁾・⁽⁸⁶⁾が盛んに行なわれて、拡散層形⁽⁸⁷⁾、蒸着膜形⁽⁸⁸⁾、空乏層形⁽⁸⁹⁾、自蔵形⁽⁹⁰⁾と大いに進展した結果、ついに電気端子から電気端子までの間で電力利得のある進行波増幅器が実現したのである⁽⁹¹⁾・⁽⁹²⁾。また、増幅器としての雑音指数に関する研究も進められ⁽⁹³⁾、数百MHzで最低約6 dB、平均約10 dBのものが得られるようになった⁽⁹⁴⁾。このようにして雑音指数の上でも一般のトランジスタ増幅器に肉迫できたのであるが、一般のトランジスタの雑音指数も平行して改善されつつけているので、まだそれを追い抜けないという状態におかれている。

一方、この種の進行波増幅器はドリフト電界による発熱と雑音束のbuild upという宿命的な欠点があり、一步一步と解決に向かう研究成果⁽⁹⁵⁾も出てきてはいるものの、まだ工学的な意味では不都合な点が多く、きわめて小形である点は誠に結構なのではあるが、まだ工業界に取り入れられるところまではきていない。また、進行波の伝搬時間を利用すれば増幅作用を自蔵する遅延線、あるいは記憶素子が得られるが、電子計算機や電子交換機のシステム工学の面とうまく噛み合わないためか、この方面の利用も進展していない。このまま進むと電子音響学的進行波増幅器の研究は工学上の目標を失うことにもなりかねないが、それが果たして本質的なものであるか、それとも音響研究者側のPR不足によるものなのか、あらためて学術的な検討を加えて見る必要があると考える。

なお、表面波による超音波増幅の研究もR.M. Whiteらによって開始され⁽⁹⁶⁾、8 MHzにおいて10 mmの伝搬で10 dBの増幅が得られ、一方、柴山らによってこのCdS結晶の代わりにCdS蒸着薄膜の膜面を伝搬する表面波の技術⁽⁹⁷⁾が開拓された。これらは、将来一般のIC化の中へ取り入れられる可能性があると考えられる。

最後に、最近急速に脚光をあびている研究分野として超音波と光の相互作用の応用がある。超音波による光の回折、あるいは散乱現象の研究はかなり古く、1920年代にブリルアンによって始められたものであるが⁽⁹⁸⁾、以上述べて来たような最近の超高周波超音

波技術の進歩が、レーザ技術および光弾性結晶育成技術の進展とにより、再び注目されるようになった^{(99), (100)}。この現象を積極的に利用して光の変調あるいは光の scanning の技術が展開され、光通信、情報処理技術への応用に関する研究が進められている。超音波によるロッキング⁽¹⁰¹⁾、可変時間遅延線⁽¹⁰²⁾、超音波によるテレビジョンのディスプレイへの試み⁽¹⁰³⁾、あるいは相関器⁽¹⁰⁴⁾への応用などが考えられている。

結 言

以上、超音波の応用について、古く低周波音波による音響測深の時代から、ごく最近の電子と超音波の相互作用まで、それらの大要を述べたのであるが、超音波応用は種々の産業目的、あるいは物理学上または医学上の目的に対する解決手段として、超音波による以外に手段のない場面において地道に進展し、一步一步、確固たる地歩を獲得してきたといえよう。これからもそのような道を進展して行くにちがいないが、その速度は相当加速度的になるであろう。しかし、電子音響学的な部面においては、地道に進展するというよりは、思いがけない原理に基づくものが、ある日、突然に産業と噛み合って急速な展開を見せるということが起こるかも知れないと考える。

文 献

- (1) F. Aigner: "Unterwasserschalltechnik", p. 174, M. Krayn, Berlin (1922).
- (2) A.B. Wood: "A textbook of sound", p. 154, London G. Bell and Sons Ltd. (1957).
- (3) 菊池: "磁歪振動と超音波—増訂版—", コロナ社 (昭 38).
- (4) 抜山, 青柳: "磁歪音波及超音波発生または感受装置", 日本特許 109289 (昭 10-01-22).
- (5) 抜山, 菊池, 福島: "磁歪振動装置に依る水中超音波搬送式電話", 昭 10 連大, 117.
- (6) A.B. Wood, F.D. Smith and J.A. McGeachy: "A Magnetostriction echo depth-recorder", J. Instn Elect. Engrs, **76**, p. 550 (1935).
- (7) 文献 (3), p. 98.
- (8) 本多, 増本, 白川, 小林: "金属学会第 10 回仙台大会 (昭 16), 同誌, **12**, 7~12 号 (昭 23) および K. Honda, H. Masumoto, et al.: "On the magnetostriction of iron-aluminum alloys and a new alloy, 'Alfer'", Sci. Rept. Res. Inst. Tohoku Univ., Ser. A-1, **4**, p. 341 (1949-12), および H. Masumoto and G. Otomo: "On the dynamical characteristics of the magnetostriction alloy Alfer", Sci. Rept. Res. Inst. Tohoku Univ., Ser. A-2, **3**, p. 413 (1950-06).
- (9) 文献 (3), p. 171.
- (10) J.F. Nachman and W.J. Buehler: "Sixteen percent aluminum-iron alloy cold rolled in the order-disorder temperature range", J. appl. Phys., **25**, **3**, p. 307 (1954).
- (11) C.M. Davis and S.F. Ferebee: "Dynamic magnetostrictive properties of alfenol", J. Acoust. Soc. Amer., **28**, **2**, p. 286 (March 1956).
- (12 a) Z.N. Bulycheva, E.I. Gurvich and Y.P. Seliskii: "Magnetic alloys used in ultrasonics", Soviet Progress in Applied Ultrasonics, **1**, p. 190 (1964).
- (12 b) O.N. Altgauzen, L.S. Bezuglaya, Z.N. Bulycheva and O.V. Lyubetskaya: "Magnetic properties of alloys for magnetostrictive transducers", Soviet Phys. (Acoust.), **12**, p. 249 (Jan. 3, 1967).
- (12 c) Z.N. Bulycheva, M.M. Borodkina and V.L. Sandomirskaya: "Texture and magnetic properties of Fe-Al Magnetostriction alloys", The Physics of Metals and Metallography, **19**, **1**, p. 147 (1965).
- (13) H.E. Strauss: "Magnetostriction of low-density cobalt rondel", J. appl. Phys., **29**, **12**, p. 1690 (1958).
- (14) 小川: "チタン酸バリウム磁器について", 物性論研究, **8**, p. 1 (昭 22-07).
- (15 a) 阿部, 田中, 斎藤, 三浦: "電歪振動子としてのチタン酸バリウム磁器の研究", 第 25 回連大 III 2.9, p. 177 (昭 26-05).
- (15 b) 阿部, 田中, 平野, 村田: "チタン酸バリウム磁器を用いる水中用電歪振動子", 音響学会誌, **7**, **1**, p. 16 (昭 26-05).
- (15 c) 阿部, 田中, 斎藤, 平野, 岡崎: "チタン酸バリウム磁器の電歪振動子に就て", 音響学会誌, **7**, **1**, p. 20 (昭 26-05).
- (16) Y. Kikuchi, et al.: "Study on ferrite for the use in magnetostriction vibrator, Part I, Ni-Zn Ferrite", Sci. Rept. Res. Inst. Tohoku Univ., Ser. B, **7**, **1**, p. (1955-01) および同上 Part II, Ni-Cu Ferrite, 同上, **3**, p. 171 (1955-12) および 菊池, 他: "Ni-Cu-Co 系フェライトの磁歪振動特性", 東北大学電通談話会記録, **27**, **1**, p. 49 (昭 33-07) or 昭 32 信学全大, 39.
- (17 a) 文献 (3), p. 118.
- (17 b) C.M. van der Burgt: "Dynamical physical parameters of the magnetostrictive excitation of extensional and torsional vibration in ferrites", Philips Res. Rep., **8**, p. 91 (1953).
- (17 c) C.M. van der Burgt: "Performance of ceramic ferrite resonators as transducers and filter elements", J. Acoust. Soc. Amer., **28**, p. 1020 (1956).
- (18 a) 菊池, 清水, 奥山: "倍周波型フェライト磁歪振動子の試作", 昭 32 信学全大, 40.
- (18 b) 菊池, 清水, 奥山: "フォーク型フェライト磁歪振動子", 昭 35 連大, 1075.
- (18 c) Y. Kikuchi, H. Shimizu and M. Terajima: "Magnetostrictive ultrasonic transducers made of ferrites", Sci. Rep. RITU, B-(Elect. Comm.) **7**, **1** (June 1955).
- (18 d) Y. Kikuchi: "Performance of magnetostrictive transducers made of aluminum-iron alloy or

- nickel-copper ferrite", J. Acoust. Soc. Amer., **29**, 5, p. 569 (1957).
- (19) 菊池, 他: "フェライト磁歪振動子の機械的強度について", 音響学会論文集 1-1-8 (昭 38-05) および私信.
- (20) 菊池, 他: 日本特許 Nos. 251927, 239673, 264568, 264569, 266862, 266860; 米国特許 Nos. 713557, 737445; カナダ特許 Nos. 745220, 751974, 751975, 751976; 英国特許 No. 4817/58; 仏国特許 Nos. 758351, 766394, 766395, 766396, etc.
- (21) 菊池, 他: "Ni-Cu-Co 系フェライトの磁歪振動特性", 昭 33 信学会大, 39.
- (22) 丸竹, 根岸, 鈴木: "Pb(Zr-Ti)O₃ 系磁器振動子について", 音響学会論文集 1-1-7 (昭 33-05).
- (23) 清水: "磁歪および電歪の Phenomenological theory", 信学会超音波研 (昭 29-11).
- (24 a) 菊池: "磁歪振動に依る機械的出力の極限值に関する理論的研究", 信学誌, **29**, p. 197 (昭 21).
- (24 b) 菊池, 清水: "磁歪振動による極限出力に関する理論的研究", 音響学会論文集 1-3-17 (昭 32-05), 信学会超音波研資 (昭 32-04).
- (25 a) 中条, 高橋: "ボトム・ソーナーの開発", エレクトロニクス (昭 41-03).
- (25 b) 鈴木, 西村, 片沼: "水中放電による音波式探査装置", 音響学会論文集 1-1-20 (昭 36-05).
- (26) F.A. Firestone: U.S. Patent 2,280,226 (April 1, 1942).
- (27) F.A. Firestone: "The supersonic reflectoscope an instrument for inspecting the interior of solid parts by means of sound waves", J. Acoust. Soc. Amer., **17**, 3, p. 287 (Jan. 1946).
- (28) A.C. Rankin: "Welding", Lond., **18**, p. 199 (1950).
- (29) 学振製鋼 19 委員会: "超音波探傷法", 日刊工業新聞社, p. 254 (昭 39).
- (30) たとえば, 緒方, 有馬, 岡崎: "造船, 造機に関する超音波探傷器使用例", 超音波探傷法 (日本学術振興会編), p. 143, 丸善, 東京 (昭 31).
- (31) K.T. Dussik: "Über die Möglichkeit, hoch frequente mechanische Schwingungen als diagnostisches Hiefsmittel zu verwenden", Z. Neurol., **174** p. 153 (1942) および同上: "Ultraschallanwendung in der Diagnostik und Therapie der Erkrankungen des zentralen Nervensystems", Ultraschall in der Medizin, p. 283, Zurich, Hirzel (1949).
- (32) H.T. Ballantine, R.H. Bolt, T.F. Hueter and G.D. Ludwig: "On the detection of intracranial pathology by ultrasound", Science, **112**, p. 525 (1950).
- (33) L.A. French, J.J. Wild and D. Neal: "Detection of cerebral tumors by ultrasonic pulses", Pilot Studies on postmortem material, Cancer, **3**, p. 705 (1950).
- (34) V.W. Güttner: "Über Ultraschallabbildungen und menschlichen Schadel", Acustica, **2**, p. 148 (1952).
- (35) 菊池, 田中, 内田: "超音波による頭蓋内解剖学的異常検出, 第 1 報", 音響学会誌, **8**, 2, p. 111 (昭 27).
- (36) 田中, 他: "心臓の超音波断層写真法 (第 4 報) 一人の心臓および大血管の超音波断層写真", 超音波医学学会論文集 9-7 (昭 41-05).
- (37) 菊池, 他: "心臓の超音波断層動画法", 東北大学通研音響工学研資 (1968-06) および, Y. Kikuchi, et al.: "Cardiac 'Kineto-Ultrasonomography'", The 6th I.C.A. (Tokyo, Japan) M-1-8 (1968-08).
- (38) R. Pohlman: "Über die Möglichkeit einer akustischen Abbildung in Analogie zur optischen", Z. Phys., **113**, p. 697 (1939).
- (39) S.Y. Sokolov: "Microscopy by ultrasonics", J. Tech. Phys. (USSR), **19**, p. 271 (1949).
- (40) G.W. Stewart and R.B. Lindsay: "Acoustics, A text on theory and applications", D. Van Nostrand Company, Inc., New York (1930).
- (41) W.V. Roberts and L.L. Burns: "Mechanical filters for radio frequencies", RCA Rev., **10**, 3, p. 348 (Sept. 1949).
- (42) K. Shibayama and Y. Kikuchi: "Studies on vibration of shortcolumn", Sci. Rep. Res. Inst., Tohoku Univ., (Part I), **8**, (3), p. 133 (1956), (Part II), **9**, (2), p. 113, (1957), (Part III), **11**, (3-4), p. 203 (1960).
- (43 a) 文献 (3), p. 123.
- (43 b) W.P. Mason: "Electromechanical transducers and wave filters", D. Van Nostrand Co., Princeton, 2nd ed. (1948).
- (44) 抜山, 福島: "差動磁歪汙波器", 特許 No. 142574 (昭 16-03-16).
- (45 a) 福島, 藤野: "フェライトを使用した中間周波磁歪汙波器", 東北大学電通談話会記録, **24**, 1, p. 7 (昭 30-07).
- (45 b) 柴山, 菊池, 佐藤: "磁歪汙波器用共振子に関する実験的検討", 音響学会論文集, 1-1-9 (昭 40-05).
- (46) R. Bechmann: Proc. IRE, **49**, 2, p. 523 (Feb. 1961), W. Schockley, et al.: Proc. 17th Freq. Control Symposium p. 88 (1963), D.R. Curran, et al.: IEEE WESCON 18, 2 (1964), および, 尾上, 十文字: 信学会超音波研資 (昭 40-02).
- (47) D.R. Curran, et al.: IEEE WESCON, 18, 2 (1964).
- (48) 尾上, 十文字: 信学会超音波研資 (昭 40-02).
- (49) 中沢: Proc. 16th Freq. Control Symposium, p. 373 (1962), および エレクトロニクス, **8**, p. 1407 (1963).
- (50) C.F. Brockelsby, et al.: "Ultrasonic delay lines", p. 123 London Iliffe Books Ltd. (1963).
- (51) D.L. Arenberg: "Ultrasonic delay lines", IRE Conv. Record, Pt. 6, p. 63 (1954).
- (52) J.D. Ross, S.S. Kapuschenski and K.B. Daniels: "Variable delay line using ultrasonic surface waves", Inst. Radio Engrs, Nat. Conv. Record, 2, p. 118 (1958).
- (53) R.W. Wood and A.L. Loomis: "The physical and biological effects of high-frequency sound-waves of great intensity", Philosophical Magazine, S. 7, **4**, **22**, p. 417 (Sept. 1927).
- (54) L. Balamuth: U.S. Patent No. 2,580,716 (1952-01), Ultrasonic Session No. 2, I.R.E. (March 23, 1955).

- (55 a) 森, 井上, 戸田: “線引加工に対する超音波振動利用の試み”, 音響学会論文集 2-1-20 (昭 40-05).
- (55 b) J.R. Frederik: “Ultrasonic engineering”, p. 165 (1965), John Wiley & Sons, Inc. (1965).
- (56) J.B. Jones and J.J. Powers, Jr.: “Ultrasonic welding”, *Welding Journal*, **35**, p. 761 (Aug. 1956).
- (57) 奥島, 佐久間: “超音波洗浄における電解気泡によるキャビテーション制御”, 音響学会論文集 (昭 41-05).
- (58) 菊池, 奥山, 斎藤: “キャビテーションによる音響放射抵抗の変化—音響放射面に人工キャビテーション核を生成させた場合—”, 音響学会論文集 (昭 43-04).
- (59) Y. Kikuchi, H. Shimizu and D. Okuyama: “Some aspects of ultrasonic cavitation”, *Sci. Rep. Res. Inst. Tohoku Univ.*, **B-17**, 3-4, p. 65, (1965).
- (60) 日本超音波医学会編: “超音波医学”, p. 392 (岡) および p. 400 (有賀), 医学書院, 東京 (昭 41).
- (61) J. Gruetzmacher: “Piezoelektrischer krystall mit ultraschallkonvergenz”, *Ztschr. f. Physik*, **91**, p. 345 (1935).
- (62) 吉岡, 平野, 河島, 岡: “組織の傷害を目的の集束超音波発生装置について”, 音響学会論文集 2-1-15 (昭 32-11).
- (63) W.J. Fry: “Physical factors involved in ultrasonically induced changes in living system (I), Identification of non-temperature effects”, *J. Acoust. Soc. Amer.*, **22**, 6, p. 867 (1950).
- (64) 岡, 吉岡, 奥村, 他: “集束超音波による中枢神経内選択的侵襲について”, 第 16 回日本脳神経外科学会 (昭 32).
- (65) 植木, 長谷川: “外科治療における超音波”, *総合医学*, **20**, p. 272 (昭 38).
- (66) 菊池: “電子音響学について”, 音響学会誌, **22**, 2, p. 52 (昭 41).
- (67) 菊池: “超高周波超音波”, 信学誌, **48**, 11, p. 1793 (昭 40-11).
- (68) 菊池: 東北大通研超高周波電子音響学シンポジウム論文集 (序文) (昭 40-02).
- (69) 1968 Sendai Symposium on Acoustoelectronics (1968-08).
- (70) H.E. Bömmel and K. Dransfeld: “Excitation of very-high-frequency sound in quartz”, *Phys. Rev. Letters*, **1**, p. 234 (1958).
- (71) M.J. Lea, D.R. Pech and E.R. Dobbs: “Ultrasonic attenuation in Zn and Cd in their normal and superconducting states”, *IEEE, Ultrasonics Symposium*, F-4, New York (Sept. 1968).
- (72) A. Ikushima, et al.: *J. Phys. Soc. Japan*, **19**, p. 2235 (1964).
- (73) 尾崎, 梶村, 石黒, 御子柴: “Vanadium における超音波吸収”, 第 13 回音波の物性と化学討論会講演論文集, No. 27 (1968-11).
- (74) R.W. Morse: “The fermi surface of the noble metals by ultrasonics”, *Fermi Surface* (Ed. by W.A. Harrison & M.B. Webb), p. 214, John Wiley & Sons, Inc. (1960).
- (75) G.N. Kamm and H.V. Bohm: “Magnetoacoustic measurements of the fermi surface of aluminum”, *Phys. Rev.*, **131**, 1 (July 1963).
- (76) H.E. Bömmel and K. Dransfeld: “Excitation of hypersonic waves by ferromagnetic resonance”, *Phys. Rev. Letters*, **3**, p. 83 (1959).
- (77) B. Abeles: “Microwave phonon-electron interaction in normal and superconducting metals”, *IEEE Ultrasonics Symposium*, F-3, New York (Sept. 1968).
- (78) J.H. Collins, et al.: “Shear wave generation at microwave frequencies utilizing epitaxial YIG films on YAG”, *Appl. Phys. Letters*, **13**, 3, p. 93 (Aug. 1968).
- (79) A.J. Giarola: “High isolation single crystal YIG delay line”, *IEEE, Ultrasonics Symposium*, L-9, New York (Sept. 1968).
- (80) 文献 (69) 参照.
- (81) A.R. Hutson, J.H. McFee and D.L. White: “Ultrasonic amplification in CdS”, *Phys. Rev. Letters*, **7**, p. 237 (Sept. 1961).
- (82) J.E. May, Jr.: “Electronic signal amplification in the UHF range with the ultrasonic travelling wave amplifier”, *IEEE 1964 Symposium on Sonics and Ultrasonics*, K 3, Santa Monica, Calif. (Oct. 1964).
- (83) D.L. White, et al.: “Ultrasonic amplification in sulfur doped CdS”, *Proc. IEEE* (Dec. 1965).
- (84) 菊池, 中鉢, 飯沼: “サルファ処理した CdS 結晶の超音波増幅”, 信学会超音波研資 (昭 42-04).
- (85 a) N.F. Foster: “Diffusion layer transducer”, *Appl. Phys.*, **34**, p. 990 (April 1963).
- (85 b) 中鉢, 関, 高橋, 和田: “拡散層トランスジューサの各部の導電率について”, 昭 39 連大, 1020.
- (86) N.F. Foster: “UHF CdS transducer”, *IEEE Trans.*, **SU-11**, p. 63 (Nov. 1964).
- (87) 文献 (85 a) 参照.
- (88) 文献 (86) 参照.
- (89) D.L. White: “The depletion layer transducer”, *IRE Trans.*, **UE-9**, p. 21 (June 1962).
- (90) 中鉢, 河西, 和田, 菊池: “拡散層トランスジューサを自蔵させた CdS 結晶の超音波増幅”, 昭 39 連大, 458; および “A new ultrasonic amplifier device of CdS crystal with integrated diffusion-layer transducer”, *Jap. Jour. Appl. Phys.*, **3**, p. 777 (昭 39-12).
- (91) J.E. May, Jr.: “Ultrasonic travelling wave devices for communications”, *IEEE Spectrum* (Oct. 1965).
- (92) Y. Kikuchi, N. Chubachi and H. Sasaki: “An ultrasonic amplifier device made of obliquely cut CdS crystal with integrated diffusion-layer transducers”, The 6th ICA, H-3-1, Tokyo, Japan (1968-08); または, 菊池, 中鉢, 佐々木: “CdS 結晶の斜軸使用による拡散層トランスジューサ自蔵型超音波進行波増幅素子の試作”, 音響学会論文集 1-1-4 (昭 43-04).
- (93) J.E. May, Jr.: “Electronic signal amplification in the UHF range with the ultrasonic travelling wave amplifier”, *Proc. IEEE*, **53**, **10**, p. 1465 (Oct. 1965).

- (94) J.T. Hanlon: "Ultrasonic amplifier noise figure", Proc. IEEE, **56**, p. 237 (1968).
- (95) 早川, 石黒: "直流バイヤス下の超音波増幅", 信学会超音波研究(昭 44-03).
- (96) R.M. White and F.W. Voltmer: "Ultrasonic surface-wave amplification in cadmium sulfide", Appl. Phys. Letters, **8**, 2, p. 40 (Jan. 1966).
- (97) 柴山, 箕輪: "CdS 蒸着薄膜による弾性表面波の励振", 音響学会論文集 1-1-5 (昭 43-04); 信学会電子回路部品・材料研究, 京都(昭 43-10).
- (98) L. Brillouin: "Diffusion de la lumiere et des rayons X par un corps transparent homogène", Ann. Phys. (France), 9th ser., **17**, p. 88 (1922).
- (99) C.F. Quate, C.D.W. Wilkinson and D.K. Winslow: "Interaction of light and microwave sound", Proc. IEEE, **53**, 10, p. 1604 (Oct. 1965).
- (100) E.I. Gordon: "A review of acoustooptical deflection and modulation devices, Proc. IEEE, **54**, 10, p. 1391 (Oct. 1966).
- (101) M. Didomenico, Jr. and V. Cqarniewski (BTL): "Locking of He-Ne laser modes by intracavity acoustic modulation in coupled interferometers", Appl. Phys. Letters, **6**, p. 150 (April 1965).
- (102) M.J. Brienza and A.J. DeMaria: "Continuously variable ultrasonic-optical delay line", Appl. Phys. Letters, **9**, p. 312 (Oct. 1966).
- (103) A. Korpel, R. Adler, P. Desmares and W. Watson: "Television display using acoustic deflection and modulation of coherent light", Proc. IEEE, **54**, p. 1429 (Oct. 1966).
- (104 a) M. Arm, L. Lambart and I. Weissman: "Optical correlation technical for radar pulse compression", Proc. IEEE, **52**, p. 842 (1964).
- (104 b) J.S. Palfreeman: "An opto-acoustic cross-correlator in radar signal detection", Philips Technical Review, **28**, 5/6/7, p. 217 (1967).

採 録 論 文 (その 2)

下記の論文が昭和 44 年 8 月に採録となりました。[] 内の数字は寄稿年月日

論文誌 B

- 沢 新之輔, 熊谷信昭: レンズ状媒質からなる導波系の新しい解析法 [44.5.2]
- 生駒俊明, 鳥塚英樹, 柳井久義: ガン効果発振の共振姿態の解析的理論と実験 [44.5.8]
- 塚田俊久, 浜崎養二: ガン・ダイオードの微小信号アドミタンス [44.3.19]
- 大久保元晶: 半無限運動媒質の表面インピーダンス [44.5.16]
- 橋本 勉: 減衰器を付加したら線回路の伝搬定数の近似解法 [44.2.10]
- 堤 誠, 富谷隆雄, 青柳健次: 磁気誘電媒質における電磁界の解析 [44.3.14]
- 国分欽智: 誘電体板の周期的重ねで構成された層状媒質内の TM 電磁波の伝搬 [44.3.17]
- 山口政久, 武井敏夫: パラメトリック増幅器の広帯域化 [43.4.12]
- 伊藤紘二: 巡回変換群を用いた通信方式 [44.3.19]
- 杉山峰夫, 杉元重時: ミリ波帯広帯域受信周波数変換器に関する実験的考察 [44.5.6]
- 鈴木信雄, 島田禎晋: ミリ波 n 乗コサイン形カットオフフィルタ [44.6.24]
- 小倉久直: 球座標におけるベクトル波動関数について [44.5.23]
- 遠山秀樹, 野口 晃, 藤岡知夫: 電子ビーム速度分布に対する電位最小面の揺らぎの影響 [44.6.17]
- 石田則明: カットオフテーパー導波管を用いたミリメートル波通信用疑似線路 [44.7.28]
- 古川静二郎, 中神隆清: 直結型マイクロ波発振増倍器の一設計法 [44.4.14]
- 中筋 護, 森賀祥智, 川嶋良保: O型後進波管のスプリヤス発振とその除去方法 [43.3.27, 44.2.20]
- 浅利英吉: 降雪中のマイクロ波伝搬について [43.4.30, 44.1.17]
- 渡辺竜雄, 佐藤軍吉: エサキダイオードを VCO および位相検波器に用いた同期範囲拡大型 PLD [44.3.15]