特 集 5

生研での研究を振り返って

Research in IIS as a Guest Fesearcher

大野正弘* Masahiro OHNO

生研の客員部門在籍期間に行った研究を紹介する。著者は、任意の波面を持つ超音波に対し、その時間反転波である位相共役波を発生させる研究を行った。非線形圧電性を持つ物質中で超音波と電場のパラメトリック相互作用を起こさせることにより、数10 MHz 帯の超音波の位相共役波を数%の効率で発生させることに成功した。また、シュリーレン法により超音波を可視化し、位相共役波の時間反転性を検証した。

1. 生研における研究成果

私は生研の多次元数値情報処理工学部門に1992年4月から1994年3月までの2年間客員助教授として在籍し、非線 形波動工学という専門分野で研究活動をさせていただいた。 本稿の前半でこの間の研究成果を簡単に紹介し、後半で生 研での研究活動を振り返った雑感を述べてみたい。

私の研究テーマは、「音響位相共役波」発生法の研究であった。「位相共役波」とは、入射波と同一の空間分布を持ち、その進行方向を逆転した波である。任意の波面形状を持つ入射波に対して、その位相共役波を実時間で発生する装置を、「位相共役鏡」と呼ぶ。これは、どのような方向から、どのような波面の波が入射しても、それとまったく同じ形の波を返す鏡である。このような「鏡」は、いわば「時間反転器」と同じであり、光、超音波等の波動を用いた計測に対して、従来にない機能を持たせることができる。たとえば、回折の補正、波面歪の自動的除去等が可能である。この「鏡」を、機械的方法、たとえば多数の小さな鏡を制御するというような方法によらず、もっと簡単に実現しようというのが、この分野のひとつの研究目標である。

超音波の位相共役波発生法,あるいは,位相共役波発生が内在するような物理過程は,10年ほど前からいくつか知られていた。しかし,それらはいずれも,発生する位相共役波の強度が非常に小さかったり,使用できる周波数が限られていたりして,実用に耐えられるものではなかった。私は,そのなかから,「非線形圧電体」を用いる方法に注

*オリンパス光学工業(株)基礎研究部在任期間:平成4~5年度

目し、この方法における位相共役波発生効率を高めること、および、適用周波数域を拡大することを、生研における2年間の研究の具体的なテーマとした.

圧電体とは、加える電圧に応じて変形する物体であり、 超音波診断装置等の超音波送信子として最も一般的に用い られている. いわば、超音波域のスピーカーと言えるだろ う. さて「非線形」圧電体とは何か. これは, 加える電圧 に応じて変形するが、それが電圧に比例しない物体、いわ ば歪むスピーカーのような物体である. 一般的に、非線形 応答系では入力交流信号のエネルギーが他の周波数へ移行 する.最も端的な例は,スピーカーに過大入力を与えると 倍音が発生し、音が歪む現象であろう. これは、周波数f の入力信号が自分自身と掛け算されて, 2f, 3f…の信号 が発生することと解釈できる. 位相共役波発生法は, これ を逆手にとる. 非線形圧電体に周波数fの超音波と, 周波 数2fの電場を加えると、周波数3fの超音波が発生する. と同時に、2f-f=fの超音波も発生するのである. これ は、2fの電場と、fの超音波の共役成分の掛け算によって 発生する成分である. 詳しい理論は文献1), 2)にゆずると して、このようにして発生した周波数fの超音波は、必ず 最初に入射させた周波数 f の超音波の位相共役波となるの である. そして, この過程で発生する位相共役超音波のエ ネルギーは、スピーカーの歪みから類推されるように、圧 電体の非線形性が大きいほど大きい. したがって, 私の目 標は、超音波周波数領域において、できるだけ非線形性の 大きい圧電体=できるだけ歪むスピーカーをつくること, であることがわかった.

しかし,これが予想外に難しい.ひとつの理由として, 今まで,圧電材料においては,できるだけ線形な材料を探 索、合成すべく研究されてきたという歴史的背景がある。この過程で、非線形性は悪しきものとして排除され、また何らかのデータが測定されても、それらが系統的にまとめられることはまれであった。この結果、私が研究を始めた時期には、位相共役波発生に関係する非線形圧電テンソル成分がすべて測定されていた物質は、ニオブ酸リチウム (LiNbO $_3$) のみであった。

私がとった具体的な材料探索方法は以下の通りである.

- (1) 圧電体の非線形性の大きさを,直流電圧を印加した時の音速変化から見積もる. (非線形圧電性と音速変化が関係していることは文献1)参照)
- (2) 実際に超音波位相共役波を発生させ,位相共役波の発生効率を測定する.

私は、この方法によって材料探索を行った結果、ある種類の PZT セラミックスにおいて、LiNbO3を上回る効率で超音波の位相共役波が発生することを発見した。その材料特性を表 1 にまとめる。従来材料の LiNbO3では入射超音波の0.001% 程度の位相共役波を発生させるのが精一杯であったが、PZT セラミックスを用いれば数%を位相共役波のエネルギーとして取り出すことができ、通常の反射鏡のレベルに近づけることができる。しかし、高周波域(数10 MHz 以上)においては、PZT セラミックスは超音波吸収が急激に増大し、使用不可能となる。このような、非線形性と超音波透過性の両立は、物理的に奥深い問題であり、今後のさらなる研究が待たれる。

図1は、PZT セラミックスに入射する超音波と、発生した位相共役波の伝搬の様子を示す写真である.これは、シュリーレン法によって超音波の振幅分布を光学像に変換し、撮影したもので、位相共役波の時間反転性がよくわかる.

2. 二足のわらじを履いた雑感

さて私の研究テーマ「音響位相共役波」は、私が生研での客員助教授に着任することが決まってから選んだものではない。このテーマは、私がオリンパス光学工業(株)で超音波顕微鏡の研究開発を行う過程で着手したものであり、

同装置の発展に寄与する可能性ありという理由で、生研で 本格的に研究することになったものである. したがって, 私の場合には、次の設問が成り立つ、このテーマを、その まま企業で行ったとしたら、生研で行った研究と同じに なったか?答えは NO. 私が企業でこのテーマを研究した ならば、おそらく時間のほとんどを装置の開発に費やした であろう. 材料探索や、それに関連した物性研究のような、 いわば悠長な研究テーマは、現在の日本の企業においては 行いにくくなってきている. それは、企業というものが、 自社の力で開発可能なものを研究するのではなく、自社の 力で開発し、かつ利益をあげることが可能なものを研究す る集団であるからである. その中においては、ゴールが遠 くにあるテーマや、ゴールが一見近くにあっても行き方が よくわからないテーマは、中止あるいは「待ち」の判断を 下されることが多い、私の場合は、超音波の分野において、 装置開発を企業で行い、それに関連した基礎的な研究を大 学で行う機会を非常にタイミングよく与えていただいた. 世間には、私と同じような立場にあり、かつ私よりはるか に能力のある研究者が沢山いることと思われる. 大学の客 員研究部門がより充実し、このような研究者に多くの活躍 の機会が与えられることを切望する.

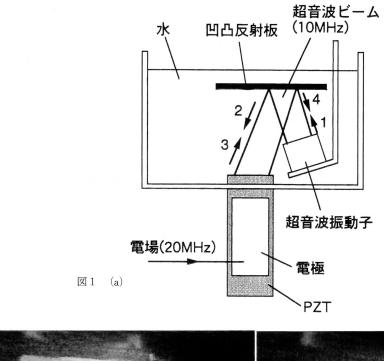
私が生研で研究を行った過程で強く感じたことは、その情報集積・発信地点としての優位性である。これは、研究所の規模の大きさと研究範囲の広さ、地理的要因等のほかに、客員研究部門や受託研究員制度によって産業界との交流を継続して行ってきたことが評価されているのだと思う。このことは毎年の生研公開の盛況ぶりによく表れている。私も自分の研究分野の研究会を、電子情報通信学会の第二種研究会として生研で開催させていただいたが、第1回目にも関わらず50名を越す参加者があり、成功裡に終わらせることができた。また、この分野の世界的な研究者であるロシア MIREEA 研究所の V. L. Preobrazhensky 教授を外国人研究者として生研に招聘し、3カ月間共同研究を行ったことも大変有益であった。今後もこのような制度を継続・強化し、生研が外部に開かれた研究所であり続けて欲しいと感じる次第である。

表1 非線形圧電体の種類と位相共役波発生効率

非線形圧電体	超音波周波数	位相共役波 反射率 R	超音波吸収係数 (nep m ⁻¹)
LiNbO ₃	50 MHz	10^{-5a}	$<10^{-2}$
PZT (低周波用)	10 MHz	4.0×10 ^{-4b)}	50
PZT (高周波振動子用)	10 MHz	1.3×10 ^{-2c)}	15
PZT (表面波デバイス用)	10 MHz	4.0×10 ^{-2c)}	6.0

位相共役波反射率 R =位相共役波エネルギー/入射波エネルギー. ポンプ電場振幅値はa)約 10^4 Vm $^{-1}$, b)5. 7×10^4 Vm $^{-1}$, c)3. 0×10^4 Vm $^{-1}$,

47巻6号(1995.6) 生産研究 303



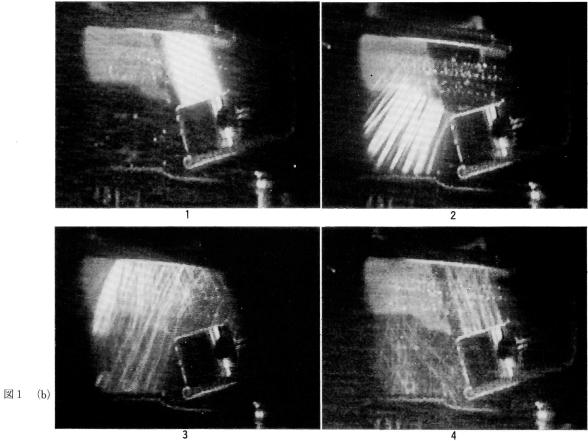


図1 超音波の位相共役波のシュリーレン法による観察
(a)実験配置:水中に超音波(10 MHz)を伝搬させ、凹凸板で反射させて非線形圧電体(PZT)に入射させる(1→2). 非線形圧電体に倍周波(20 MHz)の電場を印加すると、位相共役波が発生する.この位相共役波は、行きの経路を逆にたどるように伝搬する(3→4).このとき、1と4、2と3の音場が相似となるはずである.(b)各段階の超音波のシュリーレン像:水槽内の超音波の音場分布をシュリーレン法によって観察した結果.1と4、2と3の相似性が観察される.

以上良いことばかり書いてきたが、最後に生研(あるいは現在の日本の大学全体)が企業に比べて遅れをとっていると感じた点を二つ記したい。それは、設備の効率的運用と、安全管理である。前者に関しては、予算的な問題もあるにせよ、規則上の制限が強すぎるように思われる。研究所を、その対極にある施設=博物館にしないためにも、設備の導入、そして特に廃棄に対して、柔軟に対処すべきだと考えるがいかがなものであろうか。後者の安全管理に関しては、大学は企業を完全に見倣ってよいと断言できる。むしろこれを指摘することは、客員部門に在籍していた時期の自分の義務であったと反省している次第である。

最後に、研究の遂行にあたって多大な助力をいただいた 生研第1部の高木堅志郎教授および同研究室の方々、客員 部門在籍中にさまざまな点でお世話になった中桐 滋、岡 野達雄両前主任教授および、研究の機会を与えていただいた原島文雄所長に深く感謝したい。また、日常の事務処理において不慣れな私をフォローしていただいた第1部業務掛の方々にも感謝の意を表する次第である。

現在は私は古巣のオリンパス光学工業(株)にもどり,会社に着くとすぐに会議という日が多くなってきている. 毎朝陽光につつまれた生研の中庭を見ながら一日の研究を始めた日々をなつかしく思い出しているこの頃である.

(1995年3月14日受理)

参考文献

- 1) 大野正弘:日本音響学会誌 48(2), 112-118 (1992).
- 2) 大野正弘:「超音波における多波混合と位相共役波発生」 講演論文集 (平成 4 年11月, 東京大学生産技術研究所), p 8-15 (1992).