音響エネルギーの研究動向について*

日本機械学会論文集(C編)
67巻657号(2001-5)

上 羽 貞 行^{*1}

Research Trend of Acoustic Energy Applications

Sadayuki UEHA^{*2}

^{*2} Tokyo Institute of Technology, Precision and Intelligence Laboratory,
4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 226-8503 Japan

Key Words: Cavitation, Sound Field Control, Acoustics, Actuator, Medical Equipmen

1. ま え が き

超音波技術便覧の“聞くことを目的としないで利用される音波のことを超音波”というとの定義に則ると、音波のエネルギー応用は強力超音波あるいは動力的超音波応用となる。ここではこの名称を用い、最近の研究動向を基礎と応用に分けて紹介する。

2. 基礎研究の展開

強力超音波の基礎としては、強力超音波の高周波電源、超音波を発生する振動子、パワー合成、トルク合成、振動エネルギーの伝送体、および放射体などの振動系の開発、と強力超音波に関係する現象の解明などがあげられる。

2・1 強力超音波発生用振動子および高周波電源

強力超音波発生用振動子としては、代表的なものとして縦振動子、厚み縦振動子、ねじり振動子、たわみ振動子がある。縦振動子およびねじり振動子の場合、周波数が100 kHz以上の場合には圧電セラミック単体が用いられ、これより低い周波数では、圧電セラミックを金属ブロックで挟み込んだ構造のボルト締めランジュバン形振動子が用いられる⁽¹⁾。一部で磁わいを利用したフェライト、ニッケル振動子が用いられているが、いずれにしてもこれらの縦振動子に関してはすでに設計法は確立している。一方たわみ振動子については、これまでバイモルフ振動子による励振、あるいは縦振動子にモード変換を併用して励振することが多か

ったが、最近では圧電縦効果を利用した強力超音波用ランジュバン形たわみ振動子が開発され、たわみ振動を直接簡便に励振できるようになってきた⁽²⁾⁽³⁾。これら縦、たわみ、ねじり振動などの単一の振動を励振する振動子のほかに、縦とねじり、縦とたわみ等2種類以上の振動を一つの振動子で励振する研究も行われている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。電気機械変換材料としてはPZTを越える圧電材料は出ていない。また超磁わい材料を用いた振動子の研究が日本でも行われたが高価であるため、水中用振動子、アクチュエータなどの特殊な用途を除いて使用されていない。

振動源の駆動用の電力増幅器は、現在通常の半導体増幅器では単体で10 kW程度が限度であるが、静電誘導形トランジスタ、静電誘導形サイリスタを用いた単体で50 kW、100 kW(実効連続出力200 kW以上)の電力増幅器が使用可能になってきている⁽⁶⁾。

2・2 パワー・トルク合成 振動子単体で扱えるパワーあるいはトルクが限られるため、より強力な超音波振動を発生させるためにはパワーの合成あるいはトルクの合成が必要である。縦振動のパワー合成法については、振動の節の結合振動を利用したL-L変換体、L-L-L変換体、R-L変換体を用いる縦振動のパワー合成法はすでに確立しているが⁽⁷⁾、節円を持つ円柱のねじり振動モードを利用したトルク合成器、円柱のねじり共振棒のループループ結合を用いたトルク合成器など、ねじり振動のトルク合成法が提案され⁽⁸⁾、超音波モータへの応用が検討されている⁽⁹⁾。

2・3 ソノルミネッセンス 数十kHzから数MHzの強力な超音波を液体や溶液に照射すると、キャビテーションにより気泡が成長し、ある大きさになると断熱的に圧縮される。この過程で気泡の内部は

* 原稿受付 2000年11月16日。

^{*1} 東京工業大学精密工学研究所(☎226-8503 横浜市緑区長津田4259)。

E-mail: sueha@pi.titech.ac.jp

5 000 °C以上、千数百気圧にも達し、ソノルミネッセンスと呼ばれる発光が観測されることがある。その発光スペクトルから、圧壊に伴う高温によって水分子が壊れてOHラジカルなどが生成すること($\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H} + \text{OH}$)ことは以前からわかっていたが、発光機構については現象論的理解にとどまっていた。しかしながら、1990年頃にGaitanとCrumによって1個の気泡のみが音場中に存在する状況が実現され、この気泡が発光すること、すなわちシングルバブルソノルミネッセンス(SBSL)が観測された⁽¹⁰⁾。その現象に着目したBarberとPuttermanは1個のキャビテーション気泡について光学測定を行って、発光が音響場に同期したパルス発光であること⁽¹¹⁾、そしてパルス幅は50 ps程度であること、そのスペクトルが連続スペクトルであり、黒体輻射との類似性から発光源の温度が数万度と推定されることも判明した(ホットスポット説)⁽¹²⁾。

このようにSBSLの発生の機構の解明が物理の分野を中心に進められているが、これらの知見を発展させ、従来の多泡性気泡からのソノルミネッセンス(MBSL)の現象解明と化学反応への応用の展開を図ることが今後の課題と思われる。

3. 応用研究の展開

超音波洗浄と超音波接合が従来の強力超音波応用の大きな分野であったが、超LSIの集積度の増大、環境への負荷の低減、福祉の増大に伴い、従来の技術の向上のほか、搬送、物質創成、手術法、機能素子等において、いくつかの新しい応用が展開されつつある。

3・1 生産技術応用

超音波洗浄・乾燥と機械加工・塑性加工 超音波洗浄は、現在の半導体産業等での脱フロン洗浄の基盤技術である。被洗浄材の大形化、洗浄の精密化により、多周波数を利用することによる音場を均一化する手法、洗浄液の減少と再汚染の防止、精密洗浄のための手法としてメガヘルツ帯の高周波超音波が伝搬する洗浄液シャワーを利用する手法などが開発され、実用されつつある。また強力な空中超音波を用いたリードフレームの音波乾燥法も開発されつつある⁽¹³⁾。

一方超音波振動の衝撃力を用いる砥粒加工、精密切削、研削などの超音波加工、および残留応力が低減できることから精密な管の引抜き、曲げ加工等の可能な塑性加工等は、各種小形電子部品や、集積回路の製造等の広い分野で応用されており、その対象は被加工物の大形化を含め拡大するとともに、工作に要求される仕様は高精度化・微細化している。しかし装置の研究報告は少ない。

超音波波接合 各種の材料を直接接合する超音波溶接は、電解コンデンサの極板の接合⁽¹⁴⁾を含む、さまざまな電子部品等の生産に応用され、半導体産業等の基盤技術となっている。最近では、常温での集積回路の超音波ワイヤボンディング、半導体チップの基板等への直接接合、各種デバイス等の直接封止等が可能になる見通しが得られており、特に鉛フリーが要求され超小形化してきているマイクロエレクトロニクス分野でますます不可欠な技術になって来ている。

またセラミック、テフロン等の各種新素材の接合が可能になり、各種の小形の製品の製造工程のほか、自動車産業では大形プラスチック部品の接合が実用されているが、さらに金属およびプラスチック等の複合材料、軽金属ボディの接合等が期待されている。

このような接合の超音波振動源としては、現状では振動変換体を用いた多数の超音波振動子のパワー合成、または上下駆動式超音波溶接装置のように複数の振動源を同時に用いて強力な超音波を得ている。また平面内で複合振動を用いることにより振動軌跡をだ円にする方法が、各種の接合において接合強度が向上することが報告されている⁽¹⁵⁾。使用される周波数としては、振動子の容量の都合で15 kHzから40 kHz程度が用いられているが、超音波ワイヤボンディングでは110 kHzの装置が主流になってきており、さらに高周波数化が期待されている。

超音波搬送 サブミクロン、ナノメータの精度を要求する超LSIのマスクの制作、電子線描画装置、ステッパなどには精密搬送が必須であり、また被加工物の搬送にも製品にダメージを与えない搬送が必要とされている。1980年頃から提案・開発されている、圧電振動子の高いエネルギー密度を応用した各種の超音波モータ、アクチュエータは、カメラの自動合焦レンズ駆動、時計など一部実用化されており⁽¹⁶⁾、これらの延長線上に精密・高速搬送ステージの開発があり、ますますの将来の発展が期待される。また音波の放射圧を利用して平面状物体を浮揚・搬送する近距離場超音波浮揚は、シリコン基盤、液晶ディスプレイ用ガラス基盤等の難接触搬送技術の一つとして研究開発が進められている⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。

3・2 化学工業応用 化学工業への強力超音波応用は、もともと、電気メッキの速度と仕上がりの向上、水と油の乳化、顔料の混合、など超音波の物理作用に基づく応用が主であった。しかし近年2・4節で述べたようなキャビテーションに基づく化学反応促進作用、新しい反応などを利用した応用が展開されようとしている。超音波キャビテーションに由来する化学作用に

関するこのような研究分野はソノケミストリーと呼ばれており、かつてソノケミストリーの研究の多くは、研究者により異なった結果が報告されるなど実験結果の再現性の問題が指摘され、これが化学工業への応用を阻害する大きな要因の一つであった。しかしながら、反応容器内の平均的な超音波強度の定量法として Wissler 反応で生成するヨウ素の定量法や発熱量測定だけでなく、有機化合物などの分解反応を利用したより簡便な化学的定量法が用いられるようになり、実験結果の信頼性が飛躍的に増加したことがソノケミストリー研究の進展に大きく貢献している⁽¹⁾。そしてこのことが化学工業への強力超音波応用を展開するきっかけを与えるものと思われる。

周知のように化学工業は、有機化学、触媒化学などに基づく物質創成、化学反応プロセスの制御が基本となっている。その中の一つである有機合成化学の分野では、単に反応時間の短縮、反応の収率向上に超音波を利用するだけでなく、反応の選択性を変え合成の新ルート開発へと利用されている。また触媒化学においても、触媒の活性化のみならず、超音波照射下での単分散貴金属微粒子の簡単な合成法を生み出した。また環境化学の分野では、ダイオキシンなどの有機汚染化合物の分解の有力な手段となりつつある⁽¹⁶⁾。

これらの研究は現在のところ、実験室規模であり、化学工学的な観点から見ると未熟で、現実的規模において超音波を利用した化学反応プロセス(ソノプロセス)の実現が今後の課題である。

3.3 医用応用 強力超音波は、衝撃波の大きな加加速度、キャビテーションの破壊作用、音波による発熱作用、化学反応促進作用等を利用して、疾患の治療に用いられている。結石破碎は、衝撃波によって腎臓や尿路に存在する結石を体外から衝撃波を用いて破碎、治療する方法である。この方法によれば患者は入院の必要はなく、皮膚を切開せずに治療できるため、術後の傷跡や感染症の心配がない。また加熱治療は、超音波によって42度まで生体組織を急激に加温し、癌細胞を壊死させる方法であり、超音波ハイパーサミアとも呼ばれている。最近ではこのような集束超音波による組織の加熱凝固作用と血流測定とを併用して、手術中の出血をおさえる音響止血法が実用されつつある⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。音響化学治療は、超音波照射によって化学物質が活性化して腫瘍を壊死させるものであり、臨床応用が実施されつつある。このほか、白濁した水晶体を破碎乳化して体外に排出する老人性白内障眼科手術、歯石を振動力で破碎して除去する超音波スクレー等々に用いられている。

3.4 機能素子応用

圧電トランス 弾性振動を介して高電圧を発生させる圧電トランスでは、電磁式と比較して小形・薄形、高効率、低ノイズ、難燃性などの特長があり、当初はテレビのフライバックトランスなどへの応用が試みられたが本格的な実用化には至らなかった。しかし最近になって圧電セラミック材料、セラミック製造プロセス、デバイス設計、制御駆動回路などの面における技術的改善が進み、LCD バックライト用インバータとして実用化されるようになった。

インバータ用はローゼン形を基本としており⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾、圧電横効果で励振された縦振動が圧電縦効果を介して高電圧に変換される。性能的には負荷抵抗が数十〜数百kΩで、出力電圧500V以上、出力容量1〜5W程度、効率約90%が達成されている。

AC-DC コンバータ用では数十Wもの電力容量が要求され、積層構造の方形輪郭振動子や角柱長き縦振動子などが検討されている。輪郭振動では、負荷抵抗63Ωでパワー密度25W/cc、効率97%程度のものが得られている。ローゼン形を基本としたデバイス面ではアイデアが出尽くした感があり、材料および積層体振動子の低損失化が残された技術的課題といえる。

超音波モータ・アクチュエータ 振動する力を、摩擦を介して一方向の推力に変えるには、なんらかの“クラッチ作用”が必要である。当初はいわゆる“突っつき形”あるいは“振動片形”と呼ばれる、振動の必要な瞬間だけ可動部であるロータあるいはスライダが、ステータ振動子に接触する方式が研究された⁽²¹⁾。しかしながら、この方式では摩擦損失が大きいためから“進行波形”と呼ばれる方式が指田によって提案された⁽²²⁾。この方式にあつてはステータとロータは常時波頭で接触しながら、逆の推力を与える波の谷では両者は接触していない状況が実現できる。この方式が提案されてから、特に日本において急速に超音波モータの研究が展開された。進行波方式では、ステータがロータに接触する面にだ円運動を実現すれば超音波モータが構成できることから、二つの振動を適切に組合わせたさまざまな方式が提案、研究され⁽¹⁴⁾、現在ではほぼ出尽くした感がある。この他のクラッチ作用を実現するものとして、ステータの振動と同期した電界あるいは応力により摩擦係数自体を変化させる方式の研究が進みつつある⁽²³⁾。すでにカメラの自動焦点合わせ用モータ、時計用モータ、カードリーダー、自動車搭載用モータとして実用化が進んでいる。全体として軽い負荷に対しては実用化が進んでいるが重い負荷に対するモータの実用化は進んでいない。実用化を進める

ためにはロータリ形, リニア形を含め, 摩擦材の開発, 高効率化, および高周波電源, 圧電セラミックスの低価格化が必要であり, これらが達成されれば, ロボットおよびマイクロメカニズムのアクチュエータとしてさらに広く実用される可能性は高い。

4. あ と が き

この10年間のスパンで音響エネルギー応用の分野を眺めると, アクチュエータ, 圧電トランス, などの機能素子の登場, シングルバブルの現象解明と音波と化学反応の定量化に伴うソノケミストリーの発展が最

も目立つ存在である。本報はこのあたりに中心を置くとともに全体も見えるように配慮したつもりである。意図が届かないおそれもあるが, すこしでも今後この分野で仕事をしようとする人のお役に立てば幸いである。

文 献

- (1) 香田忍・上羽貞行, 日本音響学会誌, 57-1(2001), 52, 107.
- (2) Mori, E., Watanabe, Y., Tsuda, Y., Ohya, K., Yamamori, H., Mishiro, S. and Hamada, H., New Bolt Clamped Flexural Mode Ultrasonic High Power Transducer with One Dimensional Construction, *Proc. Ultrasonics International* 89, (1989), 256-261.