数理解析研究所講究録 1430 巻 2005 年 160-177

超音波エレクトロニクス　－非線形音響学の応用－

同志社大学・工学部　渡辺　好章（Yoshiaki　Watanabe）
Faculty of Engineering,
Doshisha University

1.　はじめに

超音波エレクトロニクスの発展の歴史を振り返ると，超音波技術は科学技術の各分野においてその発展を決定づけるブレークスルーを与えるキーテクノロジーの一つとしての役割を担いながら進化してきている．Fig. 1 に示すように，現代においても超音波エレクトロニクスはさまざまな技術と融合しながら進歩を続けており，現在さまざまな分野でも展開されている多くの研究の中にも未来技術として将来大きく花開く種子が多数包含されていると考えられる．

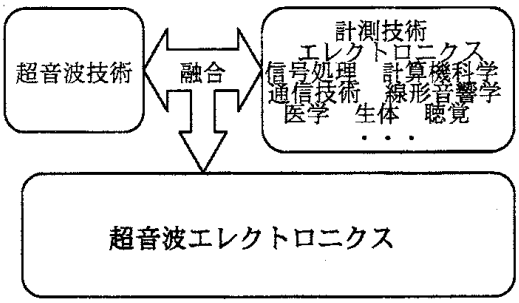


Fig. 1　超音波技術とさまざまな技術の融合から生まれた超音波エレクトロニクス

さて，近年の超音波技術の大きな特徴として，非線形音響技術が超音波応用において特に大きな役割を果たすようになったことがあげられる．非線形音響技術の発展経緯や詳細については参考文献 [1] [2] に詳しいが，音波の非線形現象は周波数が高いほど，また音圧が大きいほど顕著に現れるため，超音波を用いる場合にはこのような非線形効果の影響を大きく受けることになり，その影響を無視することは出来ない．また，扱う周波数のさらなる高周波化が今後も見込まれることから，ますます非線形音響の重要性が増すものと考えられる．このような物理的には 2 次的な現象である非線形音響現象が各種技術分野に適用可能になった背景には，従来線形近似による解析解を基本としていた科学技術の考え方が，計算機能力の飛躍的向上によって数値解析を中心とした解析手法へと軸足を移してきたことがその大きな要因であると考えられる．すなわち，解析的には解を得ることが難しい非線形微分方程式も数値解析では容易に解を求めることができる．さらに計測技術の高精度化への発展は，物理的には 2 次的現象ではあっても，総合的な情報という観点においては大きな役割を演じる非線形効果による情報抽出を容易にしている．

次世代の超音波エレクトロニクス技術においても，このような非線形音響技術等の関連技術の導入が積極的に行われると同時に，特に生体や海洋等の光技術では対応が難しい環境での応用が焦点となると考えられる．超音波利用技術は大きくわけて，エネルギー的利用と信号的利用に分けられる．未来技術としての超音波エレクトロニクスを考えるとき，その利用対象は，Fig. 2 に示すようにやはり超音波の特長が大きく現れるこの 2 つの範疇に分けられることになる．

ここでは，両分野に共通して重要となるマイクロバブル利用技術，信号的応用の代表的な例として人工ソナーの代替を目指す生物ソナーア

ルゴリズム，骨導超音波利用技術，エネルギー的利用技術の例として熱音響を利用した音響冷却システムについて紹介する．これらは全て次世代の超音波エレクトロニクス技術のブレークスルー因子になり得ると同時に，新しい研究・産業領域への展開が期待されている．

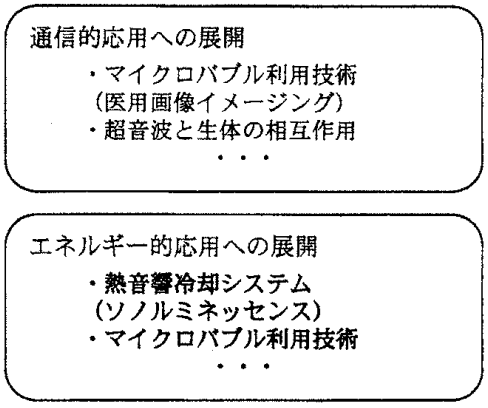


Fig. 2　未来技術としての超音波エレクトロニクスの技術展開の可能性

2.　マイクロバブル利用技術

2.1　マイクロバブルのさまざまな挙動

一般に，波長に対してその半径が十分に小さな水中の微小気泡に音波が入射すると，気体の体積弾性率は液体に比べて極端に小さいため，気泡はその入射音波によって励振され膨張・収縮運動を行う．この場合入射音波の振幅に応じて気泡応答はいくつかに分けて考えることができ，それらを模式的に示すとFig. 3 となる．

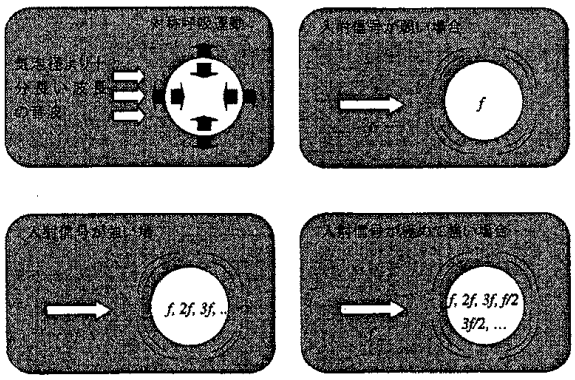


Fig. 3　超音波駆動に対する気泡の応答

入射信号が極めて弱い場合には，振動変化も微小であるため気泡振動の新たな音源としての作用は小さく，このような状態では気泡からの反射波は気泡による散乱波してとらえることもできる．この場合，気泡と周囲媒質の間には音響インピーダンスの大きな違いがあるため入射音波の散乱強度は強く，反射波の S/N はよくなるため高コントラストの造影効果が期待できる．

一方，入射音波の振幅が増大すると，気泡の膨張・収縮の振動変位も大きくなる．この場合には，気泡振動の持つ意味は微小振幅の場合とは異なってくる．すなわち，振動変位の大きな気泡振動は強い非線形性を含むため，気泡から放射される音波には，駆動入射波の周波数以外にも高調波等の 2 次波周波数成分が多く含まれるようになる．このように気泡が大振幅駆動されている状態にある場合には，気泡はその振動によって生成した新たな音波（2 次波）の波源としても機能するため，これらと入射音波で構成される音場は気泡の振動形態によって種々の状態を取り得るようになる．駆動音圧が大きくなると高調波の発生に加えて，分調波の発生も観測されるようになる．この現象を積極的に応用展開した手法が現在超音波診断装置の標準的機能となっているハーモニックイメージング技術となる．

2.2　医用技術への応用

微小気泡の代わりとなるマイクロカプセルを血流を通じて患部に送ると，超音波のエコー強度を強くすることによって高コントラスト像を実現できる．また気泡の高調波振動生成に伴う高次情報を利用して，より高解像度の診断画像を得ることができる．この技術は，電子機器部や画像のデジタル化と組み合わされ，現行の超音波診断装置のほとんどに装備されており，今後ともこの手法が超音波診断装置の標準となると考えられる．なお，バブルの非線形振動ではなく，生体そのものの音響的な非線形作用によって生じる高調波を利用して超音波画像を作成する手法も実現されており，この手法もハーモ

ニックイメージングの一つではあり，ティッシュハーモニックイメージング（THI）と呼ばれている．THI 手法は，基本波送波ビーム内に 2 次波として生成される高調波が基本波よりもさらに鋭いビームが生成することを利用しており，高い空間分解能が得られる特長がある．Fig. 4 に通常方式と THI を利用した場合の超音波画像例を示す．空間分解能の向上によって画像の S/N も向上する事が確認できる．

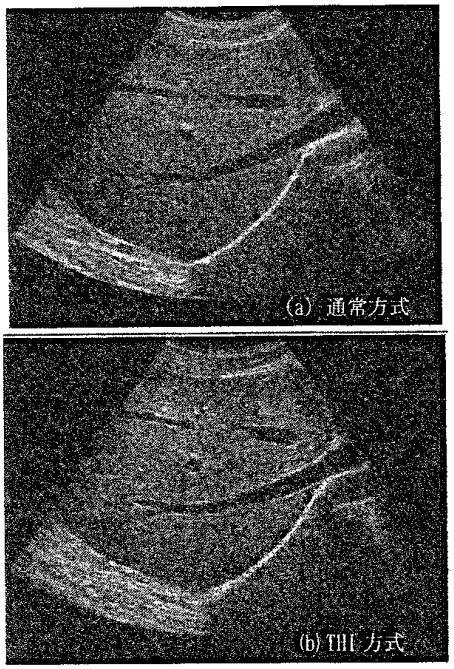


Fig. 4　超音波画像における通常方式とティッシュハーモニックイメージングの違い

2.3　物理現象としての興味

1990 年，Gaitan [3] が単一気泡を強力超音波で駆動させると気泡圧壊時に，ピコ秒オーダーという極めて高速のパルス光が規則的に繰り返して放射されることを報告し大きな反響を呼んだ．この現象は単泡性ソノルミネッセンス（SBSL）と呼ばれており，音から光へエネルギー変換を行うおそらく唯一の現象である．このため，世界中の関連分野研究者の関心を呼び，最近では常温核融合の可能性 [4] までもが報告されたことも相まって，高温超伝導の場合ほどではないにしろ現在でも精力的な研究が続けられている．

Fig. 5 は，単泡性ソノルミネッセンス（SBSL）現象の，駆動音響信号，気泡径，気泡からの発光出力のそれぞれの時間波形の同時観測の例を示す [5]．

この図からも分かるように，SBSL においては駆動超音波の周期に明確に同期してパルス光が放射されることが分かる．このパルス光はパルス幅が 60-250n 秒と極めてめて高速であり [6]，またその発光スペクトルは紫外域が強い連続スペクトルである [7]．SBSL の発光メカニズムは衝撃波説とホットスポット説が提唱されているが，現在のところホットスポット説が有力である．これは，気泡全体が準断熱圧縮によってほぼ一様に加熱され熱輻射によって発光するというものである．しかしこれらについてもまだ間接的な説明となっており，上述した常温核融合の可能性とも相まって今後の発展が期待されている．さらに気泡振動に伴う気泡内部のガスの組成変化についても，いろいろと検討課題が多い．現在では，発光時にはアルゴンで充填されているとするアルゴン精留説が有力視されており，この説を支える理論的，[8] 実験的 [9] [10] な報告がなされている．

これらの気泡振動現象は全て共通のレイリープリセット方程式と呼ばれる方程式で記述でき [11]，この方程式を数値的に解くことによって超音波音場におけるマイクロバブルの挙動は相当な精度で把握できる事が知られている．

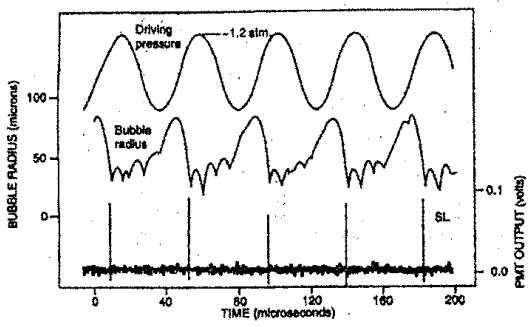


Fig. 5　SBSL の観測例（文献 5）
駆動温厚新語に同期して気泡径の膨張収縮ならびに高速パルス光が観測される

2.4 マイクロバブル挙動の光学的観察

2.4.1 ソノルミネッセンス気泡の観測

マイクロバブルの振動挙動を明確に観察するには，光学的手法を用いた直接観測が最も適している．Fig. 6 は SBSL 気泡の挙動の光学観測系を示す．

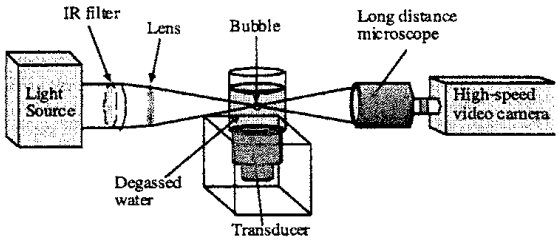


Fig. 6 SBSL 気泡振動の光学観測系

使用した高速度ビデオカメラ（Photron FASTCAM）の最高撮影レートは 40500frames/sec である．気泡の駆動音源には直径 45mm のボルト締めランジュバン型振動子を用いている．観測コンテナとして，直径および高さが 60mm のアクリル製円筒の一部を切り取り，幅 10mm の透明石英板を観測窓として平衡に張り合わせたものを用いた．振動子と容器の中心軸を合わせ，十分脱気した水をコンテナ内で駆動周波数 27kHz で定在波が生成される条件である約 42mm の高さまで満たした．気泡は水面から注射器により導入し，定在波音場の腹に捕捉させた．光源にはキセノンランプの連続光源を用い，これをレンズで気泡位置に収束させ，同一光軸上に長距離顕微鏡を取り付けた高速度ビデオカメラを配置した．このような配置によって気泡はシャドウグラフとして撮影される．なお，撮影画像は，安定した周期現象である気泡駆動周波数とカメラのシャッタータイミングをずらしながら観測位相を変化させるサンプリング撮影方式を用いて多周期観測からの像再生によって得ている．

撮影された観測結果の一例を Fig. 7 に [12] また，この結果から観測された気泡半径と音響信号の時間波形を Fig. 8 に示す．

気泡運動は駆動音圧の時間変化によって支配され，駆動音圧が負である領域においては，時間の経過と共に気泡半径は膨張し，駆動音圧が

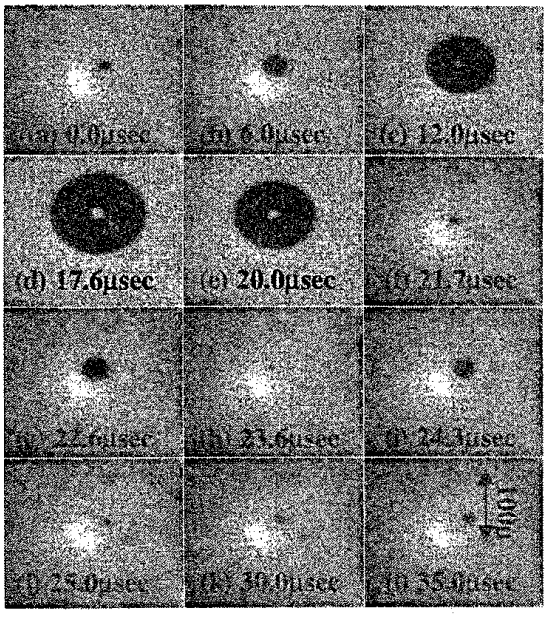


Fig. 7 SBSL 気泡の振動

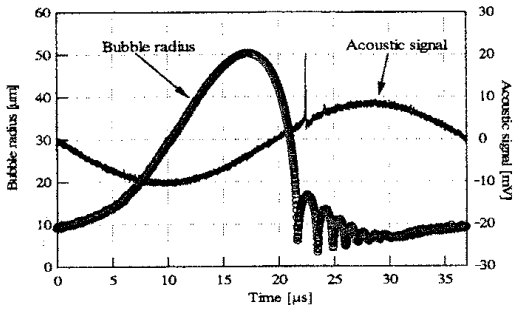


Fig. 8 SBSL 気泡半径と音響信号の観測結果

正に転じると収縮する．従って，駆動音圧が小さな領域において気泡は駆動音圧に応じて正弦的な圧縮膨張振動を繰り返す．しかしながら，駆動音圧を増大させると気泡振動は非対称となり，やがて Fig. 8 に示すように気泡は圧壊しその瞬間発光する．また，圧壊と同時に観測音圧信号からも明確に分かるように気泡からは衝撃波が発生する．

圧壊後，気泡はリバウンドしてまた半径の増加傾向を示すが，圧壊時における駆動音圧は正であるため，気泡半径は大きくは成長せず，数回のリバウンドを経て平衡半径へと収斂する．気泡の圧壊近傍の気泡半径の変化を Fig. 9 に示す．

Fig. 8 や Fig. 9 に示されるように，これらの気泡振動は，レイリープリセット方程式に基づ

く数値計算結果と比較的良い一致を示していることが分かる．SBSL におけるバブル圧壊時に生じる，超高温，超高速，超高速というような「超」が複数つくような現象は一般的にはその現象記述を方程式化する事は非常に難しく，また記述できたとしても実測結果との適合性はあまり高くない．しかしながら，この現象は方程式を用いて高い精度で記述できる事もこの現象に関心が集まる一つの要因になっている．

気泡圧壊時における衝撃波の発生の様子はシュリーレン法を用いた動画による波面観測までもが可能となってきており［13］このような気泡挙動の光学的な観測手法の確立は，マイクロバブル利用技術の進展に重要な観測技術となってきている．

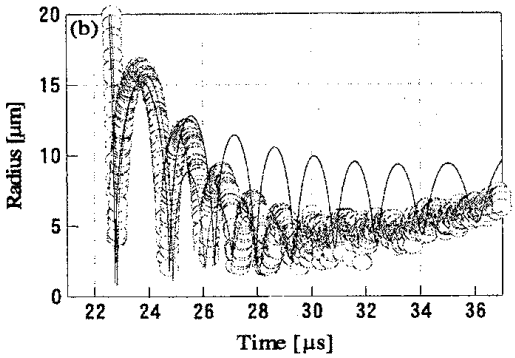


Fig. 9　圧壊近傍の気泡半径の変化

2.4.2　マイクロカプセルの崩壊観測

ソノルミネッセンス観測においては，超音波の駆動対象は自由気泡となるが，気泡挙動の実際的な応用を考える場合には，自由気泡よりもマイクロカプセルの利用が多くなると考えられる．

超音波を用いた次世代医療技術として精力的な検討が進められているドラッグデリバリーシステム（DDS）においては，マイクロカプセルが重要な役割を果たすことになる．これは，マイクロカプセル内部に薬液を封入し，血管内に注入後，患部に達したカプセルに超音波を照射し，一気に崩壊させることにより薬液を放出させる手法である．いわゆる“コントロールド・リリース”を目的とする本手法は，局所的薬剤投与に伴う副作用の抑制，薬剤量が制御可能であることからコストパフォーマンスの面でも期待できる．

DDS は，カプセルを血流に注入・患部で捕捉・破壊の 3 ステップで構成される．このうちの捕捉と破壊が超音波技術が利用される対象となる．Fig. 10 に崩壊する瞬間のカプセルの観測画像例を示す．

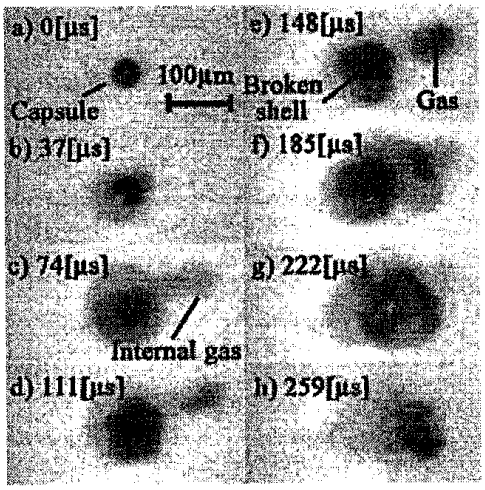


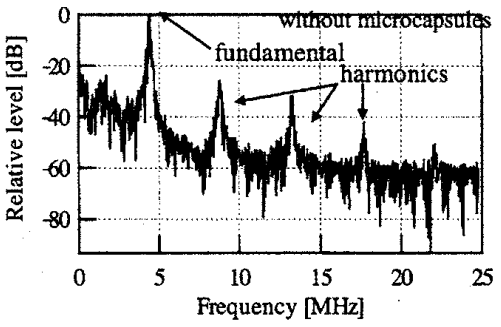
Fig. 10　マイクロカプセルの崩壊現象

画像 a では球形であったカプセルが画像 b において変形し，c においては，内包物が放出されているのが確認できる．カプセルは，その共振周波数で最も捕捉・破壊されやすく，この条件下では操作が比較的低音圧で行えることから，音波による生体への影響の低減が期待できる．気泡やマイクロカプセルの圧壊や崩壊現象が生体に与える影響については不明の部分が多．従って，このような圧壊現象さらにはこれに付随する衝撃波の影響は，将来の超音波医療におけるマイクロバブル利用技術の進展にとって重要な検討課題となってきている．

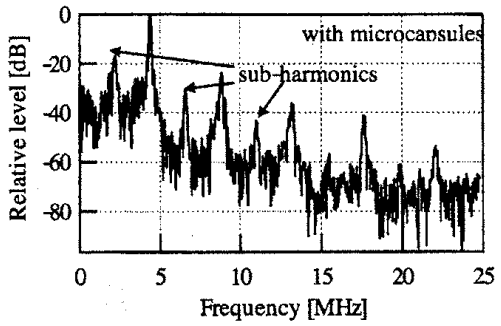
2.4.3　サブハーモニックイメージング

上述したように超音波診断画像においてはハーモニックイメージング技術を用いるのが現在では一般的となってきている．しかし，ハーモ

ニックイメージングに用いられる高調波は，気泡やマイクロカプセルから放射されると同時に生体そのものからも生成される．従って画像の分解能向上には，これらの高調波の区別が必要となる．マイクロカプセル振動の特長として，駆動条件によっては高調波に加えて分調波の生成があげられる．この性質を用いて分調波（サブハーモニック）信号を用いて画像のイメージングを行うと，マイクロカプセルの存在空間(患部等の血管）を特定できる．通常のパルスエコー法の観測システムにおいて，マイクロカプセルを混入した試料と，混入していない試料からの反射波の周波数スペクトルをFig. 11 に示す．



(a) マイクロカプセルが無い場合



(b) マイクロカプセルが存在する場合

Fig. 11 マイクロカプセルによる分調波の発生

これらのスペクトルを比較すると，マイクロカプセルの有無に関わらず，高調波成分はそれぞれ大きさは違うが，どちらの反射波にも含まれていることがわかる．

マイクロカプセルが存在しない場合，これらの高調波成分の生成は，媒質の音響的非線形効果に起因している．一方，マイクロカプセルが存在する場合には，高調波成分に加えて分調波成分が存在することが確認できる．この分調波成分はマイクロカプセルの非線形振動によって生成される．従って，分調波成分に着目してイメージングを行うことで，マイクロカプセルが存在する組織（対象患部等）とその他の組織との区別が高調波成分よりもさらに明確につけられる可能性がある．ここではマイクロカプセルが存在する部分の円柱のイメージングを目的として，試料円柱の水平方向に 0.2mm 刻みで掃引し，その都度の試料からの反射波を得た．さらに，その掃引ラインを円柱の垂直方向に 0.5mm ずらして 3 回行い，その結果の平均をその水平位置における試料の反射エコーの強さとした．[14]Fig. 12 に掃引に沿って得られた反射波に含まれる基本波成分，二次高調波成分，1/2 分調波成分，3/2 分調波成分の相対振幅を示す．網掛け部分はマイクロカプセル入り円柱の存在する位置である．同図より，基本波成分，二次高調波成分を用いたイメージングではマイクロカプセルが存在する部分としない部分との相対振幅の差はそれぞれ約 20dB, 15dB と見積もられる．

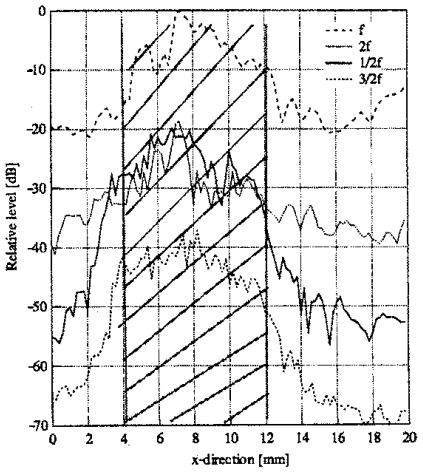


Fig. 12 高調波と分調波の分解能の比較

一方，1/2 分調波成分，3/2 分調波成分は両者共に約 30dB である．このことから分調波成分を用いたサブハーモニックイメージングは基本波，

二次高調波成分を用いたイメージングよりもコントラストが改善されていることが分かる.

次に Fig. 12 の各周波数成分のそれぞれの最大値を 0dB に設定してイメージング図として表したものを Fig. 13 に示す.

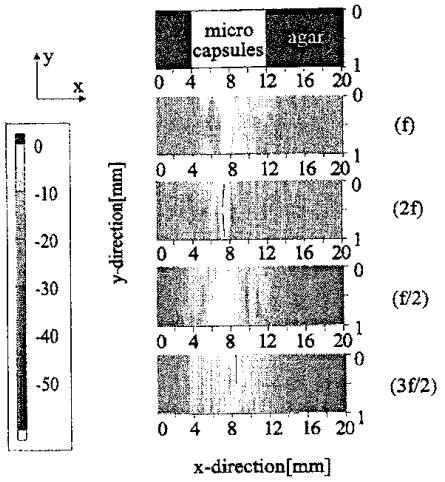


Fig. 13 高調波と分調波のイメージング

この図はそれぞれ 0～-50dB を濃淡で表している. なお, Fig. 12 では掃引ラインを 0.5mm ずらして 3 回測定したものの平均をとったが, Fig. 13 ではその掃引した 3 ライン(0.5mm ずつ, 計 1mm 幅)を別々に横軸に表した. 横軸は Fig. 12 に対応しており, ターゲットの存在位置を表している. 同図より, 基本波, 二次高調波を用いたものは円筒の像が不鮮明であるのに対し, 1/2, 3/2 分調波を用いたものは, 直径 8mm の円筒部分がほぼ大きさ通り造影されコントラストが鮮明な画像が得られることが確認できる.

2.5 マイクロカプセル利用技術の将来

超音波エレクトロニクスの医療応用においてマイクロバブル利用技術は極めて重要なキーテクノロジーであり, これからもさらに詳細な検討が必要となる. ここではふれなかったが, DDS への利用における移送や分粒, 的確に崩壊させるためのマイクロカプセルの形状・組成に応じた制御技術, さらには崩壊時に生じるマイクロジェットの利用技術等に対する検討が急がれる.

3. 熱音響音響冷却システム

3.1 熱音響とは

音響現象は流体の圧縮膨張による一連の過程を基本としていることから熱現象とは深い関わり合いを持つ. 一般の自由空間内を伝搬する音波においては, 圧縮および膨張は非常に短い時間内に行われ, また近傍に熱の散逸要因がないため, 流体は断熱的な変化を受けると考えられる. しかし, 狭い空間を伝搬する音波は断熱的な変化を受けず, 空間境界の壁と流体において熱交換が行われる.

この現象が熱音響現象と呼ばれ, 熱と音波の関わりによる仕事や熱の輸送というエネルギー輸送の側面と, 仕事から熱, また熱から仕事へのエネルギー変換としての側面を持つ. つまり, 熱音響現象を利用することにより, 音エネルギーを熱エネルギーに, 熱エネルギーを音エネルギーに変換することが可能となる[15].

具体的な熱音響現象として, 一端を閉じ他端を開いた共鳴管の中に薄板や細管などを束ねたスタックを設置し, スタックの両端に温度差を与えると音波が発生する現象や, 逆に, 開口端側からスピーカーなどで音波を加えると, スタックの両端に温度差を生じさせる現象が知られている.

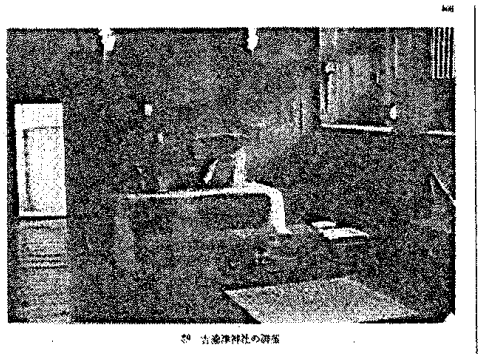


Fig. 14 吉備津の釜

最も古くから知られていた熱音響現象としては, 1776 年に出版された上田秋成の『雨月物語』に「吉備津の釜」として登場する釜鳴り現象がある[16]. 吉備津の釜は, 岡山市の吉備津神社で現在でも神事に使われている(Fig. 14).

西欧ではパイプオルガンをバーナーで修理しているときに音がしたという報告がある．19 世紀に入ると 1850 年に Sondhauss（ソンドハウス）が Sondhauss 管を，1859 年に Rijke（レイケ）が Rijke 管について，熱から音へのエネルギー変換が起こる現象を報告している．これら二つについては 19 世紀の末に発行されたレイリーの名著に詳しく紹介されている [17]．

さて，近年，家電・ノートパソコン・通信機器・ゲーム機・自動車・事務機器用等の小型化・高性能化により発熱密度が急増し，放熱対策の必要性が急速に高まってきている．このため小型軽量，高性能，高信頼，長寿命の新しい冷却システムの基盤技術を早急に確立しておくことが今後，わが国の産業の発展には必要不可欠となる．

一般的な冷却システムの冷媒として用いられているフロンは，1970 年代後半より地球温暖化および，オゾン層破壊の原因物質のひとつとして挙げられ，二酸化炭素の 1300 倍～10000 倍もの温暖化効果があると指摘されている [18] また，オゾン層破壊については，紫外線照射量の増加による人体，生態系への影響が危惧されており，現時点にて，フロンの全廃を行ったとしてもオゾン層の回復には約 50 年が必要と言われている [19]．このため代替フロンの開発など地球環境に配慮した新しい冷却システムについて様々な検討が加えられている．ここで述べる熱音響現象利用した冷却システムは，小型軽量，高性能，高信頼，長寿命また，有害な冷媒を用いない等の利点が考えられるため，次世代の冷却システム実現の可能性がある．

3.2 ループ管冷却システム [20, 21]

ここでは，熱音響変換システムとしてループ管について説明する．ループ管の概略図ならびに測定系を Fig. 15 に，スタック及び熱交換器部の概略図を Fig. 16 に示す．ループ管は金属製のパイプを 90 度エルボにて接続し，全長約 3.2m のループとしたものである．管内に熱交換器に挟まれたハニカム構造でセラミックス製のスタックが 2 つ設置されている．スタック 1 は熱から音への変換を，またスタック 2 は音から熱への変換の役割を担っている．今回のシステムにおいてはスタック 1 の下方に熱源として電気ヒーターを用い，またスタック 2 の下方には基準温度設定媒体として水道水を循環させた．

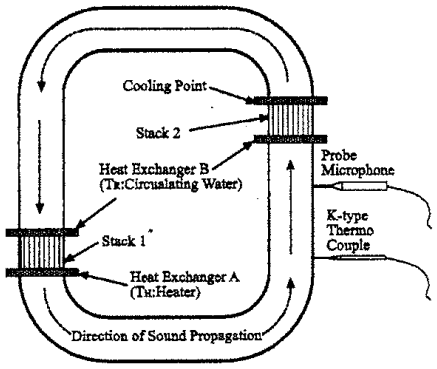


Fig. 15 音圧ならびに温度についての測定系

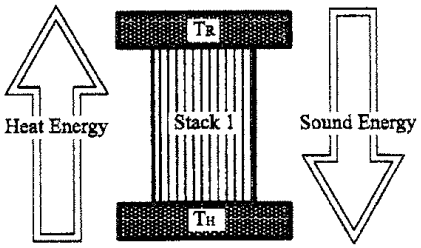


Fig. 16 スタック内における熱エネルギーと音エネルギーの向きに関するイメージ図

3.3 原理

音と熱のエネルギー変換においては音波共鳴現象が大きな役割を担っている．一番単純な装置としては上述した Rijke 管がよく知られている．今回のシステムの動作原理についても共鳴現象が大きく関与していると考えられるが，音波発生から定常状態に至るまでの過程の詳細については実は不明な部分も未だに多い．ここでは，まず熱音響現象において最も重要と考えられるスタック内での作業流体（管を満たしている気体）とスタック壁との熱交換について考える [22]．

定常状態のスタック内の作業流体を小さな小包の集まりと考え，その中の 1 つの小包につい

て注目した．Fig. 17 にスタック中の小包を示す．音波は T_R から T_H へ進行していると考え，変位については T_R から T_H の方向を正とした．Fig. 18 にスタック中の小包の振る舞いについて示す．小包はスタック壁と熱交換を行いながら，変位，圧縮並びに膨張を繰り返す．①から②の過程では圧力を保ったまま変位する．スタック壁には温度勾配が存在するため，変位に伴い，小包は近傍のスタック壁より高温になり，スタック壁に熱量 Q1 を放熱する．次に②から③の過程では小包は変位せずに圧縮される．圧縮された小包は近傍のスタック壁と比較して高温となり，スタック壁に熱量 Q2 をさらに放熱する．③から④の過程では小包は圧力を保ちながら変位するため，小包は①から②の過程とは逆にスタック壁より低温となるため，スタック壁から熱量 Q3 を吸熱する．さらに④から①の過程では小包は変位せず，膨張し②から③の過程とは逆に近傍のスタック壁と比較して低温となるため，スタック壁より熱量 Q4 を吸熱する．スタック内の小包は音波による駆動に伴い，変位間隔において①から④の過程を繰り返す．つまり，温度勾配場を実現するスタック中で小包は熱交換をしながら変位し，膨張，収縮を繰り返し，これが熱から音のエネルギー変換の原理と考えられる．さらに音から熱のエネルギー変換についても，上述の熱から音のエネルギー変換の逆過程によって行われていると考えられる．

また，エネルギー移動の観点からは次のようにも説明できる[9]．すなわち，Fig. 16 に示すようにヒーターと水道水の循環による上下熱交換器によってスタック 1 には温度勾配が形成され，熱エネルギーが T_H から T_R の方向に流れる．このときエネルギー保存の原理から熱エネルギーの移動と逆方向に音エネルギーの流れが発生する．つまり，熱から音へのエネルギー変換が行われ，音波が発生し，音波は反時計回り方向に進行する．この音波により，スタック 2 ではスタック 1 とは逆に，音から熱へのエネルギー変換が行われ，温度勾配が形成されることになる．

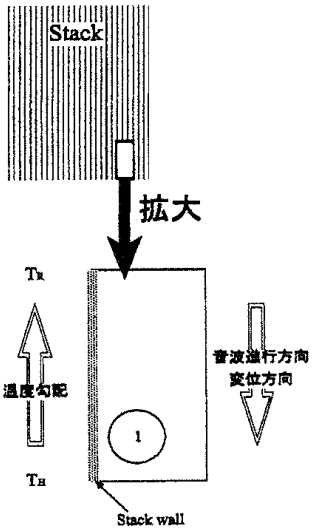


Fig. 17　スタック内における微小作業流体（小包）のイメージ図

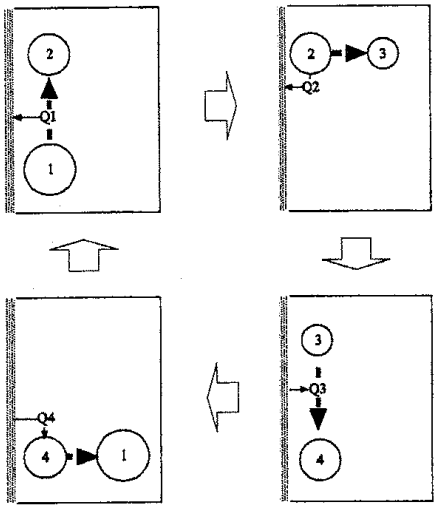


Fig. 18　スタック内における微小作業流体（小包）の振る舞いについてのイメージ図

3.4　管内音圧ならびに温度変化

ループ管内の音圧波形，音圧分布並びに温度変化の測定を管の断面方向の中心部において行った．音圧波形，音圧分布の測定にはプローブマイクロホン（B&K 社　4182）を，管内温度の測定には K 型熱電対を用いた．

Fig. 19 に作業流体を空気とヘリウムの混合ガスとしたときのスタック 2 上端の温度変化を示す．ヒーター印加後，約 50 秒後に管内に音波が発生すると同時に温度が急激に低下し始め，この例では 10 数度の急激な温度低下が観測された．その後緩やかな温度低下が見られ，ヒー

ター停止までに約 16 度の温度低下が確認された.

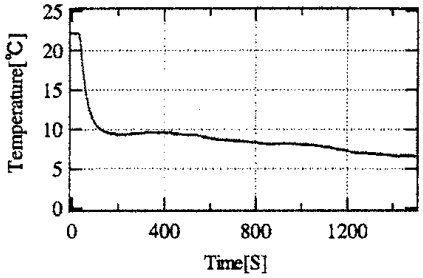


Fig. 19 作業流体を空気＋ヘリウムとしたときのスタック２上部の温度変化

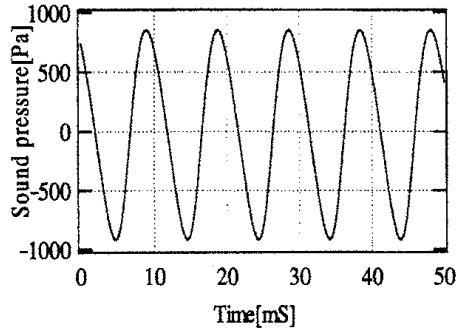


Fig. 20 ヒーターから 1480mm 離れた位置で観測された音圧波形（拡大図）

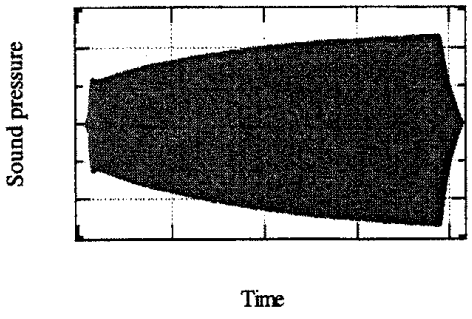


Fig. 21 ヒーターから 1480mm 離れた位置で観測された音圧波形

管内に発生した音波のヒーター位置から反時計回りに 1480mm の位置における音圧波形を Fig. 20 に，音波の発生開始から停止までの音圧波形を Fig. 21 に示す．Fig. 21 から，管内に発生した音波は発生開始付近では少しずつ大きくなっていき，閾値を超えると急激に増加した後，オーバーシュートを迎え，その後は緩やかに増加していることが確認できる．

システム稼動時のループ管内におけるヒーター印加後，270 秒後と 510 秒後の管内音圧分布測定結果を Fig. 22 に示す．時間と共に発生音圧は上昇するが，音圧の節，腹の位置は変わらず，管内には管全長を 1 波長とする定在波が形成されていることが確認できる．音圧最大点はスタック 2 付近に位置し，約 156dB と非常に高音圧であり，音響的非線形現象の現れである音響流が発生している可能性があると考えられており，このような音響流の影響が冷却システムの効率等に与える影響の解明が今後の重要な課題となっている．

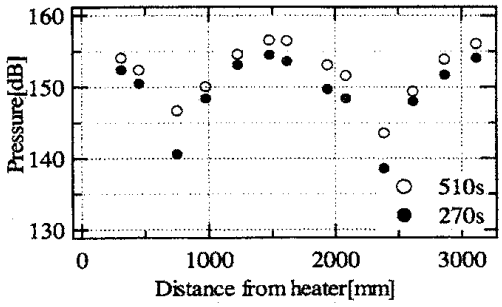


Fig. 22 作業流体を空気としたときのループ管内の音圧分布

3.5 まとめ

熱音響冷却システムを構成するループ管によって，熱エネルギーを音エネルギーに変換し，音として輸送し，音エネルギーを熱エネルギーに変換することが可能であることを示した．この技術もエネルギー問題や環境問題解決の一つのブレークスルー技術になる可能性があると期待されている．このようにエネルギー分野においても超音波エレクトロニクス技術は次世代を担う技術として注目されている．

4. 生物ソナーに学ぶ

4.1 コウモリの生物ソナーシステム

ヒトは周囲環境情報のほとんどを視覚から得ている．このことはわれわれ自身の日常の経験からもよく理解できる．突然の停電に右往左往したり暗闇に対して恐怖心を抱くのは主な情報収集手段が断たれた不安感の現れであろう．

このような視覚に相対して，他の感覚，特に聴覚に対してわれわれは鈍感になりつつあるように思う．騒音の大きい都会にあっても，目を閉じて耳を澄ますと人工，自然とさまざまな音がわれわれの周囲にあふれていることに改めて驚かされる．また，これらの音からさまざまな情景を思い浮かべることを意識したとき，聴覚情報には視覚情報とは異なった感覚情報があることに気づく．

潜水艦には船外情報収集中核機能として，ソナーを中心とした探査システムがある．これらの人工ソナーシステムに加えて，潜水艦にはソナーマンと呼ばれるスクリュー音のような到来音波のモニターから船外の環境情報を的確に把握する訓練を受けた専門家が乗船している．彼らは，聴覚情報を脳内処理によって聴覚情報そのままの形で信号処理して船外環境情報を得ており，この処理過程は視覚情報に変換されてないという点において，われわれが日常用いている視覚情報処理とは質が明らかに異なると考えられる．また，身近なところでは，医者の聴診器による診断も聴覚情報処理による代表的なものといえる．

一方，ヒト以外に目を転じると，生物の中には聴覚を周辺情報収集の手段として利用している種が多数存在する．その代表的なものが地上ではコウモリ，海中ではイルカであろう．コウモリやイルカが超音波を用いたエコーロケーション（反響定位）という効率的なソナーシステム（Fig. 23）を駆使することによって，極めて正確に獲物を捕獲し生活していることは広く知られている．洞窟や海中のような光が届きにくい空間における彼らの聴覚情報処理機能は，われわれの視覚情報処理機能と対極をなす非常に優れた機能を有すると推定される．

コウモリが暗闇の洞窟内をエコーロケーションによる“音”からの情報のみで生活する事実を見せつけられるとき，彼らのアクティブソナー能力は現存する人工ソナーの性能をはるかに超えており，多くの未知なるアルゴリズムやメカニズムを有していると推測される．次世代の超音波エレクトロニクスにおいてはこのような生物が駆使している聴覚情報処理のアルゴリズム獲得が大きなターゲットになると考えられる．そのためには，工学・生理学・生物学など幅広い見地から彼らから総合的なエコーロケーション機能を学ぶ必要がある．

ここでは，構内にて実際に飼育しているコウモリに対して継続して観測を行ってきた結果[23]～[27]の一部について述べる．

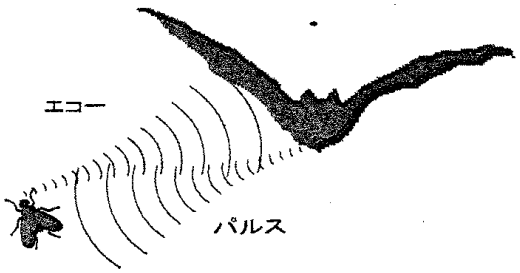


Fig. 23　コウモリのエコーロケーション

4.2　テラソカグラコウモリ

Fig. 24 に観測対象種であるテラソカグラコウモリ（*Hipposideros terasensis*，体長約 150mm，体重約 50g，生息地：台湾）の写真を示す．テラソカグラコウモリは鼻孔を通して超音波パルスを放射し，大きく発達した耳介はマイクロフォンとしての役割を持つ．また一般的にコウモリのエコーロケーション用パルスは，周波数が一定の CF 音（Constant Frequency）と，周波数が時間的に変化する FM 音（Frequency modulation）に大別される．FM 音のみを用いるコウモリを FM コウモリ，CF 及び FM 音の複合音を用いるコウモリを CF-FM コウモリと呼ぶ．テラソカグラコウモリは，その放射パルスから CF-FM コウモリに分類される（Fig. 25）．

放射パルスは 35KHz 付近を基本周波数とする倍音構造をしており（H1～H4），第 2 倍音（H2）が最も強い．基本波は極端に弱く，自身のエコーを識別するためのリファレンス信号として用いられている．CF 音は音のエネルギーが特定の周波数に集中しているため空気中の伝搬による

減

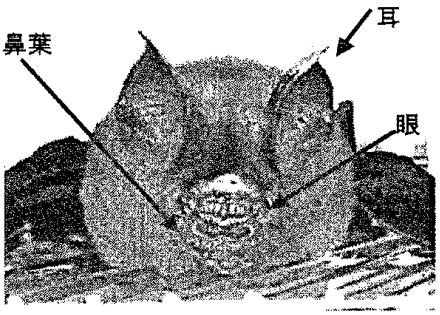


Fig. 24　テラソカグラコウモリの顔面

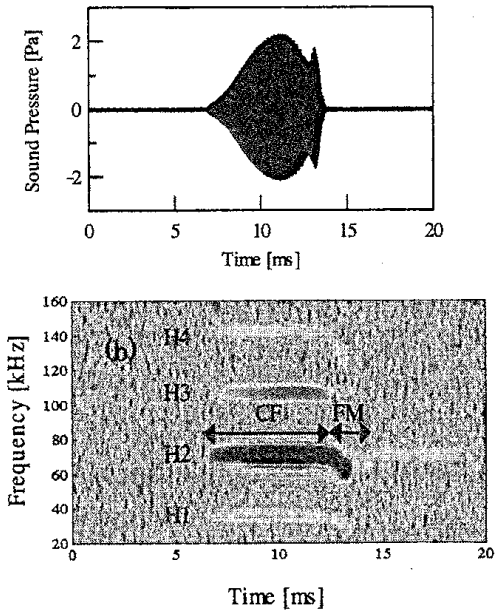


Fig. 25　テラソカグラコウモリのエコーロケーションパルス (a) 音圧波形　(b) スペクトログラム

衰に強く，標的の検出や速度測定に適している．また FM 音は音のエネルギーが広帯域の周波数に時間的変化を伴い分布しており，標的の方位や距離測定，さらに標的の詳細な形状を認識するのに適していると考えられている．CF-FM コウモリの聴覚情報処理機構においては，それぞれ倍音構造を成すパルスとエコーの複雑な複合音から，CF 音・FM 音を個別に分析し，速度や距離等の情報を得ていることが生理学的に解明されている [28] [29]．

4.3　ドップラーシフト補償

飛行中，標的からのエコーはドップラー効果により周波数が変化する．コウモリはこのドップラー効果を巧みに利用し，標的との相対速度を知覚している．Fig. 26 にドップラーシフト補償と呼ばれる速度知覚のためのエコーロケーション行動の例を示す．

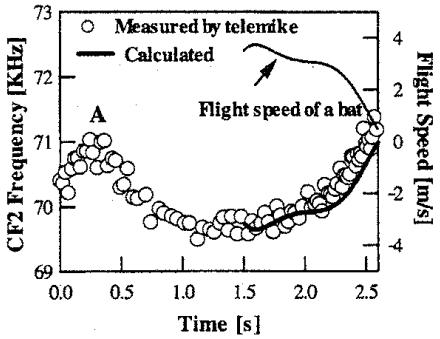


Fig. 26　飛行時における放射パルスの周波数の変化

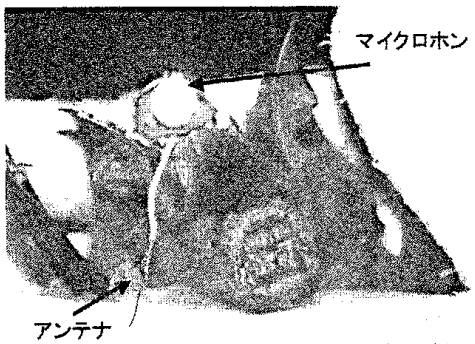


Fig. 27　テレメータマイクロホンを頭部に搭載したテラソカグラコウモリ

コウモリの頭部にテレメータマイクロホンを搭載し (Fig. 27)，飛行中の放射パルスに含まれる第 2 倍音の CF 周波数 (以下 CF2) を測定した (Fig. 26, ○)．観測室の一方の壁際で U ターンしたコウモリが (Fig. 26, 記号 A) 周波数を降下させながら飛行し，8m離れた他方の壁に着地するまでを示している．一方，観測室内に設置した高速度ビデオカメラ 2 台を用いて計測したコウモリの飛行速度から，ドップラーシフト量を計算により求めた．すると，着地地点である壁からのエコーは本来ならコウモリの飛行速度に応じてドップラー効果により上昇するが，コウモリはこのドップラーシフト量を打ち消すように自らの放射パルスの周波数を降下させていることがわかる．すなわち，標的からのエコー周波

数が常に一定（参照周波数）よう，放射パルスの周波数を調整させていることになる．これを“ドップラーシフト補償”と呼び，CF-FM コウモリにおける重要なエコーロケーション行動の1つである．コウモリの一次聴覚野には参照周波数付近を中心とするCF2周波数の微細な変化を弁別する機能があり，これにより自らの飛行速度や標的に対する相対速度を検知しているのである．またテレメータマイク及び高速度ビデオカメラを用いた動態観測により，従来では得られなかった飛行中のエコーロケーション行動に関する多くの情報を得ることができる．

4.4 空間内における標的の知覚

次に静止しているコウモリに対し，約2m離れた地点から直径8cmの振り子を接近させた．テレメータマイクにより観測したエコーロケーションパルスをFig. 28に示す．これよりコウモリは振り子の接近を知覚すると急激にパルス放射頻度を増加させ，さらに振り子が接近すると(Fig. 28, 記号(c))，放射パルスの音圧を小さくさせていることがわかる．これは振り子からのエコーを聴取感度の良い一定の音圧レベルに保つためEcho-intensity compensationと推測される．また各時点での第2倍音のソナグラムから，振り子の接近に伴いパルス幅を短くし，またFM音の周波数降下幅を大きく変化させている．FM音の周波数帯域幅は距離測定能力と密接な関係にあると考えられており，ここでは接近する振り子に対して距離測定精度を向上させていると思われる．次に放射パルス間隔の変化をFig. 29に示す．実線はコウモリと振り子間の往復距離から算出した音波伝搬時間，すなわちエコー遅延である．これより，振り子からのエコー遅延に極めて正確に対応した放射パルス間隔の変化が確認できる．また振り子接近時においては放射パルス毎におよそ300μsのエコー遅延時間差を知覚していることになり，これは直径8cmの振り子が約5cm接近する度にエコーロケーションを行っていることを意味する．以上のような観測結果は，いずれも標的に関する必要な情報を的確な精度で得るための巧妙かつ効率的な手法であり，人工ソナーに比べて遥かに優れたコウモリが持つエコーロケーションシステムの柔軟さが伺える．またFig. 30はコウモリの真横から振り子を近づけた際のパルス間隔の変化である．真横から接近は，正面からの接近に比べて振り子に対する反応が明らかに低下している．このような反応の違いは，コウモリが持つ標的の距離や速度，大きさや接近方向等に応じたエコーロケーション制御のアルゴリズムを理解する上で非常に重要と思われる．

4.5 マイクロチップからバイオチップへ

コウモリの超音波利用に関する研究が進むにつれて彼等の用いているエコーロケーションシステムは極めて効率的であることが次第に明らかになってきた．われわれが現有する最速のマイクロチップを用いたとしても，彼らの用いているエコーロケーションシステムの模擬にはほど遠い状態であることは認めざるを得ないであろう．特にエコー信号の脳内における信号処理システムは，まさに生物ソナーと呼ぶにふさわしい卓越した機能を有することが示されつつあり，これを模擬することができれば，われわれの用いているソナーシステムの飛躍的向上が期待できると考えられている．すなわち，豆粒ほどの小さい脳内において，光の速度に比べると止まっているに等しいような神経パルスの伝搬速度で，一連のエコーロケーション信号処理が展開されている事実はまさにバイオチップとして驚嘆に値する．

このようなエコーロケーション機能について，総合かつ多角的に生物ソナーの理解への取り組みが行われつつある．この流れの根底には，脳内信号処理に関して末梢である感覚器と中枢である脳内信号との関わりが，客観的なデータとして検出できるような周辺技術が整ってきたことがある．すなわち，脳の中の神経電流の流れを観測できる脳磁図（MEG）や，ポジトロン断層

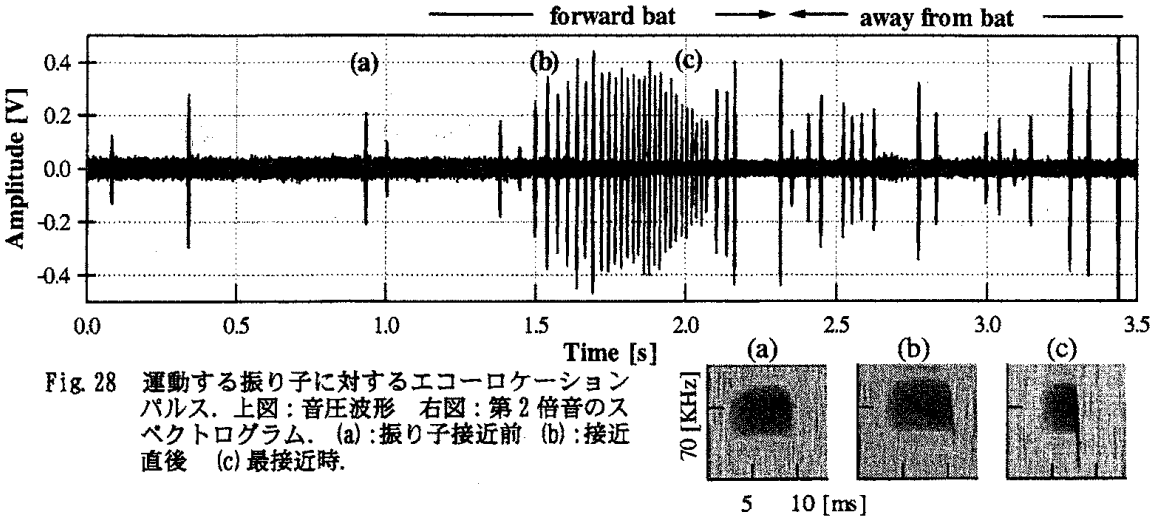


Fig. 28 運動する振り子に対するエコーロケーションパルス．上図：音圧波形 右図：第2倍音のスペクトログラム．(a)：振り子接近前 (b)：接近直後 (c) 最接近時．

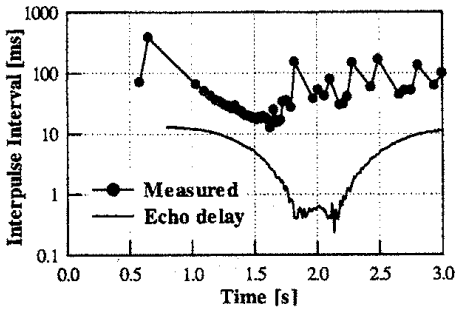


Fig. 29 正面から接近する振り子に対するエコーロケーションパルスの放射間隔の変化．

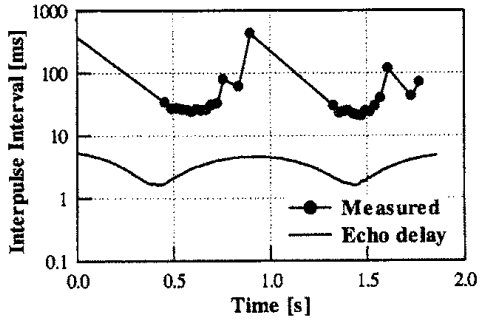


Fig. 30 真横から接近する振り子に対するエコーロケーションパルスの放射間隔の変化．

法（PET）などの観測装置の出現は，非侵襲で脳内の活性化部位の観測を容易とし，今までは未知の領域であった脳のメカニズムを知るための有力な観測機器となってきている．また，微小電位測定技術の向上による，動物実験における脳内電位の探触針による直接観測の結果は，より精密な信号処理機能の脳内マップを与えるようになってきている．

この他にも，イルカやフクロウ等の種も生態も違う生物達の音の利用方法に対する研究成果を縦断的に並べて考えると，いままでの漠然とした感覚を一歩越えて，さまざまな研究分野の取り組み手法の根底に脳の関与が色濃く見え始めていることに気づく．これは当然といえば当然のことかもしれない．４ビットマイコンから始まって，気づかないうちに全ての分野がコンピュータサイエンスに包囲されてきた前世紀のように，このような生物ソナーの分野でもまさにわれわれは「脳の世紀」を歩み始めようとしている．

4.6 まとめ

聴覚情報処理の代表格である生物ソナーは，われわれが実現している人工ソナーに比べて，その大きさ，処理能力，柔軟度等その総合能力は格段に高いと認めざるを得ない．生物ソナーも人工ソナーと同様にそのシステムは大きく分けて，音波の送受波装置部と制御装置部ならびに信号処理装置部に分けられるが，これらの全ての装置において彼らのシステムに学ぶ必要があると言える．特に脳内におけるエコーの信号処理はわれわれが通常行っている視覚情報処理手法と比べて，時間情報をうまく利用しているという点で学ぶべき事項が多い．

われわれは，われわれ自身が生来持ってしまっている視覚優先の思考アルゴリズムを一度離れて聴覚信号を中心とした脳内信号処理手法に

もっと着目する必要があるかもしれない．スイカを手でたたいて中身の熟れ具合や味を推定する程度の「音で物を見る」信号処理能力はわれわれにも備わっているが，イルカやコウモリはこれより数段高度な情報を音波の信号処理から得ているという事実の重みは大きい．次世代超音波エレクトロニクスのブレークスルー技術はこのような生物システムからも学ぶべきであろう．

5. 骨導超音波とその応用

5.1 「聞こえる」骨導超音波 [30]

「骨導超音波」とは少し耳慣れない言葉である．この用語は，「骨導」と「超音波」の２つの単語の合成であるが，それぞれの用語は音響用語として多用され，それらの意味も一般的には十分に理解されていると考えられる．しかし，その認知度ならびに理解度は極めて低いと思われる．ここでは，「骨導超音波」とはその文字が表すとおりに，気導ではなく「骨導」によって提示された超音波を意味するとしよう．

「骨導超音波」は実は「聞こえる」超音波である．超音波とは，人間には「聞こえない」周波数帯域の音波と一般的には定義され，その周波数下限は通常 20kHz とされている．従って，「聞こえる」ということと「超音波」とは相反するように思える，しかし，現実にこの骨導超音波は，健聴者が知覚できる．これだけでも従来の超音波という概念からは離れてしまうことになるが，さらに大事なのは骨導超音波は一部の重度難聴者にも知覚されるという事実である．このため，健聴者と難聴者の両対象に共に「聞こえる」という点で，骨導超音波は従来の聴覚研究の領域にはなかった異色の刺激であると考えられる．

このような背景から，骨導超音波の「聞こえ」のメカニズムについては既にいくつかの検討が加えられ，最近の研究によって健聴者と難聴者のそれぞれにおける「聞こえ」についての差異や特徴が明確になりつつある．さらに，その特性を活かして，健聴者に対してはヘッドホン[31, 32]として，難聴者に対しては補聴器として[33, 34] の応用を目指した研究が展開されている．

聴覚という，超音波からは異質で距離のあるとされていた分野において，このような発見・展開がなされるところに超音波エレクトロニクスが本質的に持つさまざまな分野との親和性の一端が現れている．

5.2 頭蓋内の超音波音場 [35, 36]

超音波エレクトロニクスにおける骨導超音波の利用を考えるには，超音波が提示された場合の頭蓋内の音場の推定が重要な要素となる．ここでは，時間領域差分法（ＦＤＴＤ）を利用した，計算結果を紹介しておく．Fig. 31 に数値計算に用いた頭蓋部分のモデルを示す．

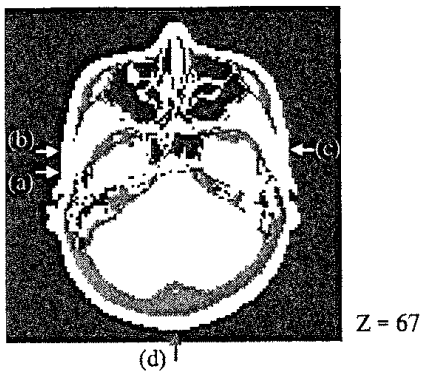


Fig. 31 刺激呈示位置.

このモデルは被験者の頭蓋部分のＸ線トモグラフィーから数値化して得たものである．このモデルの左側の蝸牛位置に，可聴域から超音波域までさまざまな周波数の刺激を提示した場合における蝸牛位置断面の各空間位置の最大音圧の空間分布を Fig. 32 に示す．この図から分かるように，可聴域周波数では音源提示側である左側に最大音圧位置が現れているが，周波数が増加するにつれて頭蓋内全体に大きな音圧値が分布する様子が確認できる．この結果は実際に骨導超音波を提示した場合の観測例ともその傾向はよく一致している．

このように，生体内の音圧分布の把握はこの

ような超音波知覚に限らず，超音波診断等においても重要であり，これらの技術はさらに拡張して数値人体モデル等への応用が期待できる．

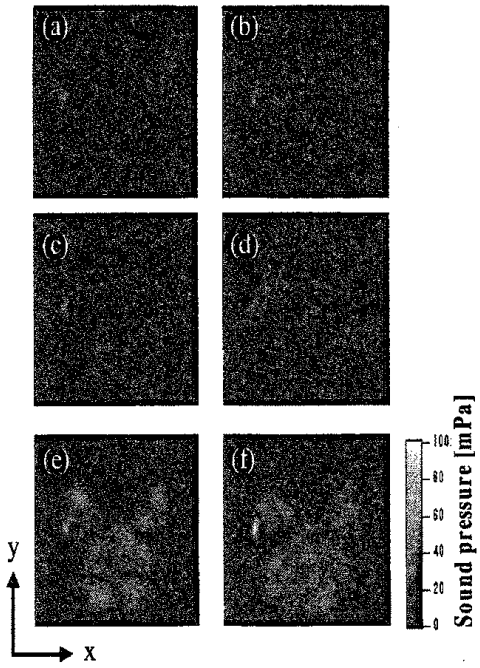


Fig. 32　蝸牛位置断面各位置における最大音圧分布. (a) 5kHz, (b) 10kHz, (c) 15kHz, (d) 20kHz, (e) 30kHz, (f) 40kHz.

6.　超音波エレクトロニクスの挑戦

ここでは，現在展開されている超音波エレクトロニクスの中で，今後の展開でそれぞれの分野でキーテクノロジーとなる可能性のある技術についてその一部を紹介した．これ以外にも多くの超音波技術のさまざまな分野での応用展開が試みられておりこれからのますますの発展が期待されている．

しかしながら超音波エレクトロニクスに限らずこれからのわが国におけるこのようなブレークスルー技術の応用展開にはいくつかの課題がある．ブレークスルーとなり得る技術も一般に最初は基礎研究的な要素を多分に含んでいる．従ってこのような技術を見る場合にもアプリケーションとしての視点を常に持っておく必要がある．研究者が産業界からのニーズを知り複眼的な視点で同じ現象を見るならば，その後の応用展開が異なってくる場合が可能性があるが大学等の研究者にそのような複眼を求めるのは現実的には困難であろう．だからこそ産学連携の必要性が叫ばれたのであろうが，産学連携が盛んな今日でもこのような事例は，まだまだ生じる素地がわが国にはまだ残っているように思える．超音波エレクトロニクスの各分野への展開励を参考として，産学連携の推進は，戦略的な視点を持って行われるべきであろう．

参考文献

[1] 鎌倉友男,“非線形音響学の基礎” 愛知出版 (1996)

[2] 超音波便覧編集委員会編,“超音波便覧”(5章　非線形音響), 丸善 (1999)

[3] D. F. Gaitan and L. A. Crum, “Sonoluminescence from single bubble,” J. Acoust. Soc. Am. Suppl1, vol87, p. S141, (1990)

[4] R. P. Taleyarkhan, C. D. West, J. S. Cho, R. T. Lahey Jr, R. I. Nigmatulin and R. C. Block, ” Evidemce of Nuclear Emissions During Acoustic Cavitation,” SCIENCE, vol. 295, pp. 1868-1875, Mar (2002)

[5] L. A. Crum. ” Sonoluminescence,” PhysicsToday, vol. 47, No. 9, pp. 22-29 (1994)

[6] G. Gompf, R. Gunther, G. Nick, R. Pecha and W. Eisenmenger, ” ResolvingSonoluminescence Pulse Width eith Time-Correlated Single Photon Counting,” Phys. Rev. lett, vol. 79, no7, pp. 1405-1408 (1997)

[7] R. Hiller, K. Weninger, S. J. Putterman and N. P. Barber, ” Effect of Noble Gas Doping in Single-Bubble Sonoluminescence. ” SCINCE, vol. 266, pp. 248-250 (1994)

[8] D. Lohse, M. P. Brenner, T. F. Dupont, S. Hilgenfeldtand B. Johnston, Phys. Rev. Lett. vol. 78, pp. 1359 (1997)

[9] T. Asai and Y. Watanabe, ” Existence of Hysteresis Based on Argon Rectification in Single Bubble Sonoluminwscemce, ” Jpn. J.

Appl. Phys. vol. 39. part 1 pp. 2969-2973 (2000)
[10] Y. Tabe and Y. Watanabe, " Dependence on the Pause time for the Hysteresisi Loop appearing in Single Bubble Sonoluminescence, " Jpn. J. Appl. Phys. vol. 41 part 1 pp. 3210-3712 (2002)
[11] 超音波便覧編集委員会編, "超音波便覧" (5章3節5 気泡振動の非線形性), 丸善 (1999)
[12] N. Kaji, N. Bergeal, T. Asase and Y. Watanabe, " Observation of Sonoluminescencing Bubble Motion at the Rebounding Phase, " Jpn. J. Appl. Phys. vol. 41 part 1 pp. 3250-3251 (2002)
[13] 浅瀬崇彰, 齋藤賢治, 渡辺好章, "単泡性ソノルミネッセンスの気泡圧壊時における気泡挙動と衝撃波発生, " 信学技報, US2002-110 EA2002-131, (2003)
[14] 小山大介, 酒井敦史, 渡辺好章, "ポアンカレマップによる分調波生成条件の検出とマイクロカプセルを用いたサブハーモニックイメージング, " 電子情報通信学会論文誌, vol. J84-A, no. 12, pp. 1500-1507 (. 2001)
[15] 富永昭, "さまざまな熱音響現象, " 熱音響工学の基礎, 第2章, 内田老鶴圃 (1998)
[16] 鵜月洋, "雨月物語解釈, " pp. 403-410, 角川書店 (1969)
[17] J. W. S. Rayleigh, "The Theory of Sound. " Macmillian and co., Limited., vol. 2, pp. 231-235 (1926)
[18] 安藤淳平, "環境とエネルギー, " p. 67, 東京化学同人 (1997)
[19] 環境省編, "平成 14 年度環境白書, " p. 101 (2002)
[20] 坂本眞一, 村上和宏, 渡辺好章, "熱音響効果を用いた音響冷却現象の実験的検討, "信学技報 US-2002-118 pp31-36 (2003)
[21] T. Yazaki, T. Biwa, and A. Tominaga, "A pistonless Starling cooler", Appl. Phys. Lett., Vol. 80, No. 1 (2002)
[22] 村上和宏, "熱音響自励振動現象の発生メカニズムに対する実験的検討, "同志社大学修士論文 (2003)
[23] 中村賢司, 力丸裕, 渡辺好章, 林良恭, 日本音響学会聴覚研究会資料, vol. 31, pp. 257-262 (2001)
[24] 中村賢司, 力丸裕, 渡辺好章, 林良恭, 日本音響学会聴覚研究会資料, vol. 31, pp. 611-616 (2001)
[25] 桂幸司, 寺田一樹, 力丸裕, 横川隆一, Liang-Kong Lin, 信学技報, US2002-117 (2003)
[26] 桂幸司, 飛龍志津子, 力丸裕, 渡辺好章, Liang-Kong Lin, 日本音響学会聴覚研究会資料, vol. 33, pp. 203-208 (2003)
[27] 飛龍志津子, 桂幸司, 力丸裕, 横川隆一, 渡辺好章, Liang-Kong Lin, 信学技報, US2003-42 (2003)
[28] Gaioni S. J., Riquimaroux H. &Suga N. " Biosonar behavior of mustached bats swung on a pendulum prior to cortical ablation, " J. Neurophysiol. vol. 64, pp. 1801-1817 (1990)
[29] 力丸裕, 動物心理学研究, vol. 53, no. 1, pp. 27-40 (2003)
[30] 渡辺好章, 日本音響学会誌, vol. 58, no. 8, pp. 461-463 (2003)
[31] M. Okamoto, M. Miyoshi and Y. Watanabe, " Acoustic Nonlinear Effect on Auricular Gartilage Vibrated with Amplitude-Modulated Ultrasound, " Jpn. J. Appl. Phys. vol. 42 part 1 pp. 2918-2922 (2003)
[32] 岡本学, 三好正人, 渡辺好章, "超音波骨導ヘッドホンより生成される可聴音の周波数特性と可聴音伝搬経路の検討, "電子情報通信学会論文誌, vol. J. 86-A, no. 8, pp. 817-823 (2003)
[33] S. Imaizumi, H. Hosoi, T. Sakaguchi, Y. Watanabe, N. Sadato, S. Nakamura, A. Waki and Y. Yonekura, " Ultrasound activates the auditory cortex of profoundly deaf subjects, " Neuroreport, vol. 12, no. 3, pp. 583-586 (2001)

[34] S. Nakagawa, M. Yamaguchi, M. Tonoike, Y. Watanabe, H. Hosoi and S. Imaizumi, " Development of Bone-conducted Ultrasonic Hearing Aid for the Profoundly Deaf," SICE, vol. 41, pp. 3202-3205 (2002)
[35] T. Sakaguchi, T. Hirano, Y. Watanabe, T. Nishimura, H. Hosoi, S. Imaizumi, S. Nakagawa and M. Tonoike," Inner Head Acoustic Field for Bone-Conducted Sound Calculated by Finite-Difference Time -Domain Method," Jpn. J. Appl. Phys. vol. 41 part 1 pp. 3604-3608 (2002)
[36] 谷利陽子, 高木健次, 渡辺好章, 阪口剛史, "時間領域差分方による頭部内の音波伝搬解析信学技報," 信学技報, US2003-3 (2003)