

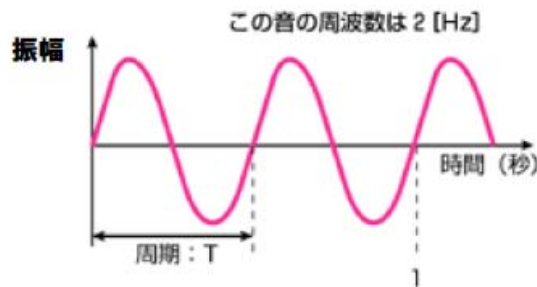
超音波の基礎

東北大学 水越克彰(mizukosi@imr.tohoku.ac.jp)

超音波とは

超音波についてお話しする前にまずそもそも音とはなんでしょうか。物理学的には物体中を縦波として伝わる力学的なエネルギーを音と称します。縦波は粗密波ともいいますが、波の進行方向が振幅と同じ向きの波で、ちょうどバネを弾くと、その伸縮(粗密)が伝わっていく様子がまさに縦波です。ちなみに横波は進行方向と振幅が垂直です。例えば洋上の波などが横波です。スピーカー等から発せられた力学的エネルギーは、縦波として媒体である空気を伝播し、我々の耳の鼓膜を振動させ、その結果音として認知できるわけです。

音は周波数、強度、波形で表すことができます。これを音の3要素と呼ぶ場合があります。周波数を下の図で説明します。横軸は時間で単位は秒です。縦軸は波の振幅を表しています。音は前述の通り縦波ですが、波形を見やすくするためにしばしば下図のように横波風に示されます。



よくみると波形は同じ形の繰り返しになっています。この繰り返し1つを“1周期”と呼びます。この図の場合、1秒間に2周期の波を含みますので、周波数は2ヘルツ(Hz)となります。つまり1秒当たりの周期数が周波数であり、単位Hzは1/sと書くことも出来ます。次に強度ですが、これは表記の仕方が複数あります。いくつか例を挙げますと。

- 1) 振幅：上図の縦軸。原点からの変位。
- 2) 音圧：1周期間の圧力変化の二乗平均平方根で単位はパスカル(Pa)。
- 3) 音圧レベル：音圧の基準値との比の常用対数で、単位はデシベル(dB)。余談ですが、dは小学校で習うデシリットルのデシで1/10を表し、ベルは電話を発明したベルの名に由来しています。
- 4) エネルギー密度：単位面積を通過する音のエネルギーで、単位は $W m^{-2}$ など。

最後の要素である波形については、ここでは触れません。これら音の3要素で超音波に関わるのは最初に述べた周波数です。人間の耳に聴こえない高い周波数の音が一般に超音波と呼ばれ、明確な定義があるわけではありませんが、概ね 20 kHz 以上の音を超音波とすることが多いようです。しかし人間の耳の周波数特性も一様ではありません。例えば一時期「モスキート音」が話題になりましたが、これは 17 kHz 以上の周波数の音であり、若年者には不快音として聴こえ年長者には聞こえにくいといわれています。モスキート音は夜間にコンビニや公園にたむろする若者を駆逐する目的で考案されましたが、その効果のほどは定かではありません。

超音波は人間の聴覚を基準に規定されたわけですが、動物にとっては普通に聞き取ることの出来る音です。例えば犬笛(下左図)は犬や猫の訓練に用いられ、16-22 kHz の音を出すことができます。犬笛は呼気を超音波に変換する最も簡単な超音波発生装置です。余談ですが、ビートルズがかの名作”Sgt. Peppers Lonely Hearts Club Band(下右図)”を製作中に P. マッカートニーが「動物用のレコードを作っていない！」と発言し、アルバムの最後の曲”A Day in the Life”のラストに 20 kHz の超音波を録音したというのはファンの間ではよく知られた話です。動物からの支持が影響したかどうかは分かりませんが、Rolling Stone 誌が選ぶオールタイムベストアルバム 500 の 1 位に同作は選出されています。ちなみに 2 位はビーチボーイズの”*Pet Sounds*”であったことは出来すぎた偶然です。



超音波の性質

超音波は周波数によって規定されることはすでに述べました。一般に超音波は周波数が高いほどまっすぐ進みやすい、つまり指向性が高くなります。一方、周波数が低いと指向性は低下しますが強度が減衰しにくく、より遠くまで伝播することができます。イルカが超音波を用いて仲間とコミュニケーションをとることは有名ですが、このときには比較的周波数の低い超音波を用いるため遠くの仲間と連絡を取り合うことができます。一方、イルカは夜間や濁った海中でも障害物を避け、魚を見つけて捕食することができます。このときイルカはより高い周波数の超音波を用い、その高指向性を活用しているわけです。



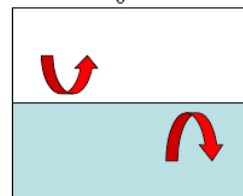
超音波は物質の境界面で反射する性質があります。下の表は種々の媒体の密度 ρ 、それを伝播する音の速度 C 、および固有音響インピーダンス Z_0 を示しています。この Z_0 は $\rho \times C$ で得られる値です。固体は ρ 、 C ともに大きいので Z_0 も大きく、逆に気体は Z_0 が小さくなります。

媒体	密度 ρ (kg / m ³)	速度 C (m / s)	固有音響インピーダンス Z_0 (10 ⁶ kg / m ² s)
空気(1atm, 0°C)	1.3	330	0.00043
水(1atm, 0°C)	1000	1500	1.5
鋼	7700	5850	45.0
ゴム	950	1500	1.5

“音響パブルとそのケミストリー”(コロナ社) P18

Z_0 が大きく異なる物質の界面では超音波は反射し、隣の相に入ることにはできません。例えば右の図ですと、超音波は水から空気へ、あるいは逆に空気から水へ進入することはできず反射されます。この性質は様々なリモートセンシングに活用されています。例えば医療分野でのイメージングに超音波が多用されていることはよく知られています。体内をイメージングするときに、プローブの先にジェルを塗布しますが、これは Z_0 の小さい空気が人体とプローブの間に入らないようにすることで、 Z_0 の大きさの違いによる超音波の反射を防止しているわけです。また魚群探知機も超音波の応用例としては有名ですが、機種によっては2種類の周波数を使い分け、低周波数で広い範囲の情報を大まかに把握し、高い周波数で選択した範囲の詳しい情報を得ています。

空気 $Z_0 = 0.00043$

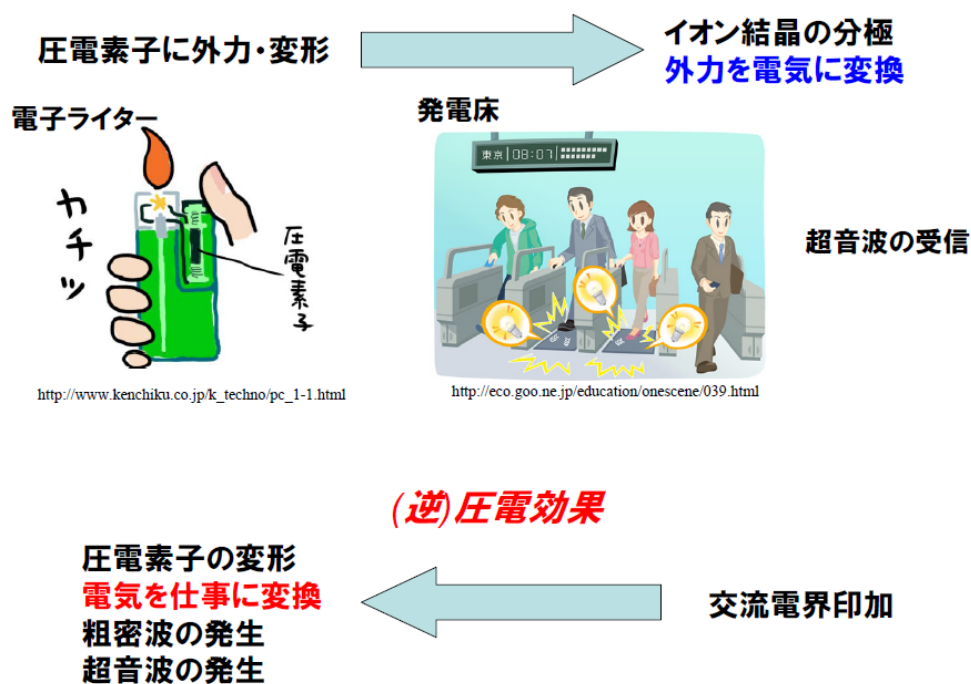


水 $Z_0 = 1.5$

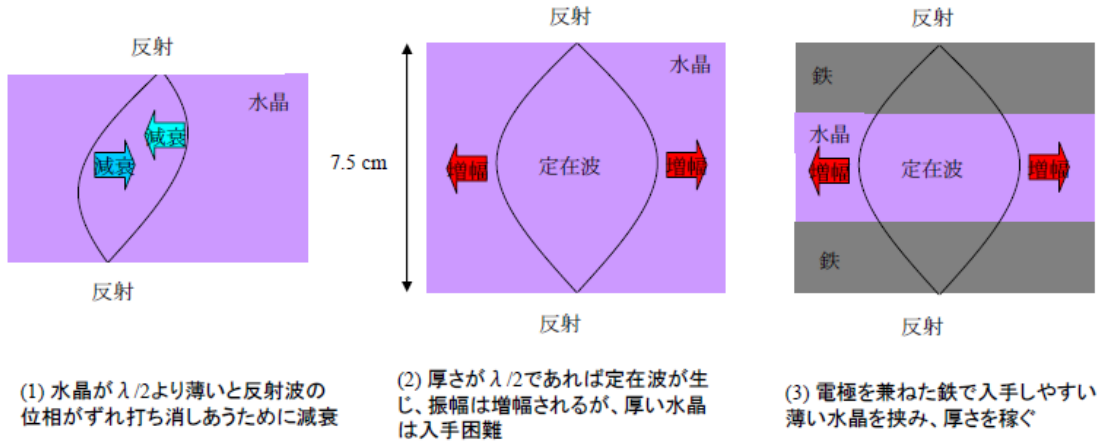
超音波の歴史とランジュバン型振動子の発明

超音波の研究は海洋航海技術と密接に関連しています。開発の端緒としてよく言われているのはタイタニック号の沈没事故です。ご承知のとおりタイタニック号は処女航海において、北大西洋上で冰山と接触しあえなく沈没しました。これを契機に「水中を見る」ことに対する切実な要求が生じたわけです。しかし、電波や光の利用は技術的に難しく、新しい技術の開発が待たれました。もうひとつの契機となったのは戦争です。第一次世界大戦の勃発に伴い、連合側側の通商船が敵対するドイツ軍の U ボートにことごとく撃沈されました。ここでもやはり要求されたのは「水中を見る」技術の開発です。このとき国家から潜水艦探知技術の開発を依頼されたのはフランスの物理学者ポール・ランジュバン（1872-1946）です。ランジュバンは師でありまたノーベル賞受賞で著名なピエール・キュリーらによって発見されたばかりの「圧電効果」に着目しました。

材料に外圧や変形を加えると、それによってイオン結晶が分極する、つまり外力が電気に変換されることを圧電効果といい、このような性質を備えた材料を圧電材料あるいは圧電素子といいます。身近なところでは、電子ライターに圧電素子が組み込まれており、ボタンを押すと火花がでるのは圧電効果に由来します。逆に圧電素子に電圧を加えると変形し、電気を仕事に変換することもできます。上述の圧電効果に対して、これを逆圧電効果と呼ぶ場合もあります。圧電素子に高周波数の交流電圧を印加することで超音波の縦波を発生させることができます。同じく圧電素子は超音波の検出にも用いられます。すなわち、超音波発生装置と超音波検出装置は同じ圧電効果を利用していることになります。



水晶 $c = 5968 \text{ m s}^{-1}$
 鉄 $c = 5950 \text{ m s}^{-1}$
 $f = 40 \text{ kHz}$ としたら、 $\lambda/2 = 7.5 \text{ cm}$
 鉄と水晶の音響インピーダンスの差は大きくない



ランジュバンは水晶に交流電圧を加え超音波の発生を試みましたが、発生した超音波の音圧は非常に小さく、依頼された水中の潜水艦の探知にそのまま用いることはできませんでした。次にランジュバンは発生する音波の強度を増幅する手段として、圧電素子の共振現象に着目しました。つまり水晶の厚さを水晶の伝播する音の波長の半分の整数倍で無い場合上図(1)のように位相のずれのために音波は打ち消しあい、圧電素子の大きな形状変化は望めません。(2)のように水晶の厚みを音波の半波長にすれば界面で反射し水晶中を往復する音の位相が一致し、その結果互いに強め合って振幅の大きな定在波が生じます。しかしそのために必要な水晶の厚さは例えば 40 kHz だと 7.5 cm と厚く、これを入手するのは容易ではありません。そこでランジュバンは、(3)のように鋼鉄板で水晶を挟み、全体の厚さを 7.5 cm とするアイデアを発想しました。水晶と鋼鉄板の音速はほぼ同じで、音響インピーダンスの違いも大きくないため、このサンドイッチ構造でも共振現象が起こり、大きな振幅の高い音圧の超音波を発生させることが可能です。この構造をランジュバン型振動子と呼び、現在では水晶よりも圧電効果の大きいチタン酸バリウムや PZT(チタン酸ジルコン酸鉛)を用いて利用されています。

なぜ周波数の高い音が必要か

超音波が眼鏡やアクセサリーの洗浄に用いられていることはよく知られています。工業的な洗浄プロセスでも超音波は広く使用され、その周波数は数十 kHz が一般的です。なぜ高い周波数の音がこれらに用いられるのでしょうか。

$$A = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\frac{2I}{Z_0}}$$

A : 振幅(m)
 f : 周波数(1/s)
 I : 強度(W / m²)
 Z_0 : 媒質の音響インピーダンス

上式は波の振幅、周波数、そして強度の関係を示しています。この式から周波数が高いと小さな振幅でも高い強度が得られることがわかります。水中で 1 気圧相当の音圧を得るために必要な振幅について計算します。1 気圧は $I = 0.35 \text{ W/cm}^2$ に相当し、水の音響インピーダンス $Z_0 = 1.6 \times 10^6 \text{ kg/(cm}^2 \text{ s)}$ です。 $f = 0.2 \text{ kHz}$ (200 Hz) では、この強度を得るためには媒質である水は基準の位置から $A = 56 \text{ } \mu\text{m}$ も移動しなくてはなりません。このときの加速度は次式より計算でき、9 G(つまり重力加速度の 9 倍)になります。

$$\text{最大粒子速度 } \alpha_{\max} = (2\pi f)^2 A$$

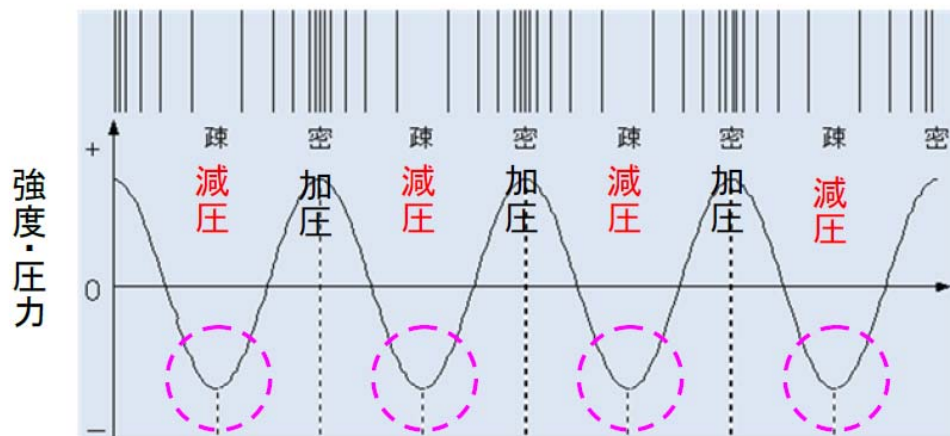
同様にしてより高い周波数についても計算しますと以下のようになり、高い周波数では媒体の振幅が小さくても高い強度が得られ、かつ非常に大きな加速度で溶媒が揺さぶられることが分かります。

水中で1気圧の音圧の発生に必要な振幅A、ならびにそのときの粒子加速度 α は

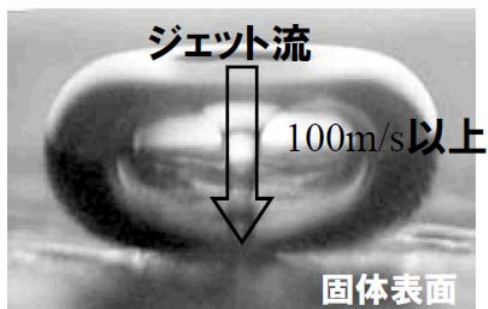
	振幅	加速度
0.2 kHzでは	56 μm	9 G
2 kHzでは	5.6 μm	90 G
20 kHzでは	0.56 μm	900 G
200 kHzでは	0.056 μm	9000 G

※ $I = 0.35 \text{ W / cm}^2$

超音波を水中で照射すると高い圧力および高い加速度が得られることは分かりました。ただし音波は粗密波ですので、加圧が起これば同様に減圧も起こります(次ページ図、ピンクの丸印)。減圧状態では媒体である水に溶存している気体が溶けきれずに現れ気泡を形成します。このことは Henry の法則にしたがって起こり、日常的には炭酸飲料のふたを開けて(加圧から常圧に減圧される)、泡があふれる現象で体験しています。同じことが超音波を照射した水中でも起こっており、音響キャビテーションという現象名で知られます。

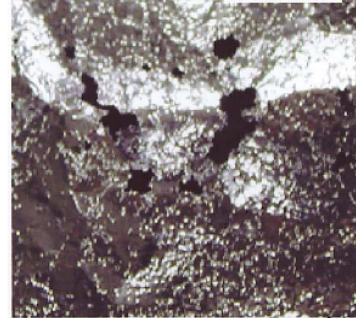


発生した気泡は、音波の照射場で伸縮・振動し、ついには消滅します。この気泡の消滅が超音波の様々な作用の起源になっています。例えば気泡の崩壊時には衝撃波が発生することがあります。また固体の表面での崩壊では、高速のジェット流が発生します(下左図)。条件によっては下右図のようにアルミホイルに穴が開きます。これらによって物質の表面の汚染物が除去され、超音波による洗浄が可能となります。



<http://www.fb-chemie.uni-rostock.de/ess/image-sono/surfacecavitation.anim.gif>

超音波照射したアルミホイル



28kHz×2分照射

一方、上記の気泡は溶液中では中心に向かって萎むように消失し、この過程は圧壊（あつかい）とも呼ばれます。圧壊は極めて短時間に起こり、エネルギーは1点に集約されるので、局所的・微視的・瞬間的に非常に高エネルギーなスポットが超音波照射系に形成されることが知られています。

このような高エネルギー反応場の形成は、

- ・水分子 H_2O を熱分解による水素ガス H_2 や過酸化水素 H_2O_2 の発生
- ・大気中での照射時の照射溶液の pH の低下（溶存窒素 N_2 からの硝酸や亜硝酸の発生に由来）
- ・ソノルミネッセンスと呼ばれる発光現象（高エネルギー反応場で生じた励起種に由来）

などによって間接的に確認することができます。

ではこの気泡圧壊時の温度はどの程度になるのでしょうか。この温度の測定は以前より様々な手法で試みられています。アプローチとしては

- 1) 化学反応速度の温度依存性から求める
- 2) ソノルミネッセンスの発光スペクトルから推定する
- 3) モデルを構築し、計算で求める

が一般的です。1)は測定に用いる化学反応の選択が重要です。不均一に溶液中に形成される気泡のどこで反応がおこるかによって、得られた結果の評価が大きく異なります。また温度を算出する際にはいわゆるアレニウス式を用いますが、これまでに知られているパラメータが超音波反応場のような高温にも適用できるかは判断が難しいです。2)についても発生する励起種の同定において難がありますが、1)よりも広く用いられているようです。これらの方法で実験的に求められた圧壊時のキャビテーションの温度はまちまちですが、5000 K前後の結果が多いように思います。これらの結果は多くの気泡が同時多発的に発生するマルチバブル(MB)系の結果ですが、近年はより解析の容易なシングルバブル(SB)の系も研究されています。SB系では制御した超音波照射場にバブルを一つだけをつくり、その動向を評価します。比較は容易ではありませんが、SBの方がMBよりもより高温の結果が報告されています。

3)の計算ですが、気泡内の衝撃波の有無、気泡内の溶媒の量・分布・濃縮率など、実験的に観測も難しい種々のパラメータの設定によって、得られる計算結果には大きな幅があります。

以上、本稿では音の性質に始まり、超音波で得られる高エネルギー反応場までを簡単に解説しました。次稿ではこの反応場を用いた化学反応についてご紹介します。

2014.02.12