

ソノルミネセンス-音から光を生み出す-

メタデータ	言語: jpn 出版者: 電子情報通信学会 公開日: 2016-01-29 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 崔, 博坤 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10291/17785

解説

ソノルミネセンス ——音から光を生み出す——

Sonoluminescence : Generation of Light from Sound

崔 博坤

Abstract

強力超音波を水中に放射したときに生じる音響キャビテーション現象は古くから知られている。気泡の膨張収縮運動を通して超音波エネルギーが1 μm 以下の微小領域に集中される結果、数千度・数百気圧の極限場が形成され発光を起こす。これをソノルミネセンスという。このミクロな反応場から生成する活性酸素や圧力波を利用して、細胞への遺伝子導入、新規物質や微粒子の創製、殺菌作用など、医学、化学、環境科学の領域まで応用することができる。ソノルミネセンスの原理やキャビテーション応用について紹介する。

キーワード：ソノルミネセンス、キャビテーション、超音波洗浄、OH ラジカル

1. 光から音，音から光へ

我々人間にとって、音と光は周囲の情報を得るために欠かせない手段である。音は耳で聞き、光は目で見る。両者の情報は独立であり、混同することはない。例えば大きな音がしたときに、同時に何か明るく見えるということはない。音と光は波動としての性質を共通して持っているが、音は空気や水など伝搬媒質の振動であり、光は電磁波であるという全く異なる本質を持っている。そのため両者の検出機構は全く異なっており、それらを混同することはないのであろう。

しかし、物理的には音と光は相互作用することが可能である。例えば光を使って音波を作り出すことはよく知られている。電話の父であるグラハム・ベルは、断続した光を物体に照射すると、その断続周波数の音が聞こえることを発見した。これは光音響効果として知られている。数百 Hz で断続された光がある物質に吸収されると、吸収された場所の温度が上がって膨張し、その繰り返される膨張収縮を音波としてとらえることができる。この原理は光が透過しないような物質の光学吸収係数を測定する方法として用いられてきたが、最近では赤外光を利

用して生体内のがんを診断する装置も作られている。また非破壊検査分野では、強いパルスレーザー光を固体に照射して超音波パルスを生じさせ、その超音波を使った航空機機体の探傷もなされている。

逆に、音波を使って光を作り出すことができるだろうか。これは単純に考えると簡単なことではない。光子（フォトン）は、原子レベルの領域から量子的な機構で放射され電子ボルトのエネルギーを持っている。一方、音波のエネルギーは数 cm というマクロな領域で1 W 程度であるから、同サイズの領域で比べるとエネルギー的には光子の方が何けたも大きい。したがって音波を使って光を生じさせるためには、何らかのエネルギー増幅機構が必要である。といっても、何も大がかりな装置が必要なわけではなく、実は身近なところに存在しているのである。それは気泡である。家庭でも用いられている超音波洗浄器を思い出して頂きたい。眼鏡などの洗浄物を水中に入れ、超音波を照射するとシャーツという不快な音がして、あっという間に汚れが落ちる。洗浄中の様子を見ると多くの小さい気泡が出ていることが分かる。この気泡が本稿の主役である。超音波によって生じる気泡は、圧力の増減に従って膨張収縮を繰り返す。これを音響（超音波）キャビテーションと呼んでいる。気泡が最も小さくなったときに内部は数千度、数百気圧にも達する状態になり、そこから発光現象や衝撃波放出などが起こるのである。本稿では、ソノルミネセンスと呼ばれる発光現象を中心に解説し、音響キャビテ

崔 博坤 正員：シニア会員 明治大学理工学部物理学科
E-mail pkchoi@isc.meiji.ac.jp
Pak-Kon CHOI, Senior Member (School of Science and Technology, Meiji University, Kawasaki-shi, 214-8571 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.93 No.6 pp.468-472 2010年6月
©電子情報通信学会 2010

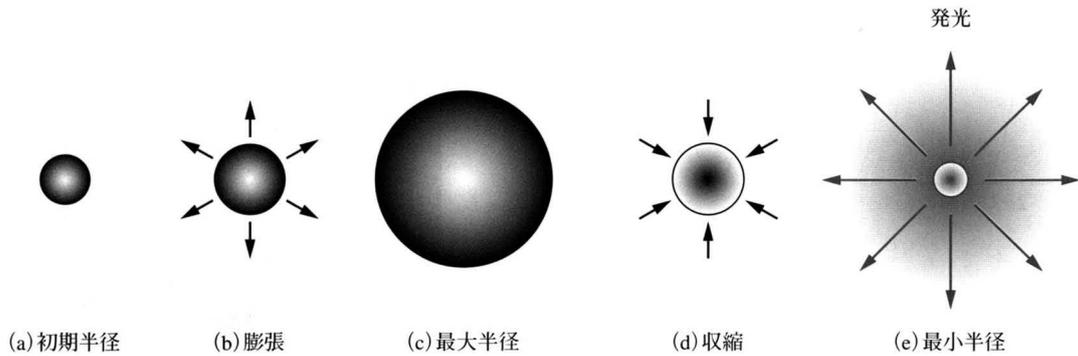


図1 キャビテーション気泡とソノルミネセンス 初期気泡(a)が超音波圧力のマイナス位相で膨張する(b). ゆっくり最大径に達した後(c), 超音波圧力のプラス位相では急激に収縮する(d). 断熱過程を経て気泡が最小径になったとき, 気泡内は約1万度, 数百気圧の高温高压状態になり, 発光する(e). この発光をソノルミネセンスという.

ションの応用である超音波洗浄などについても触れる.

2. 音響キャビテーションによる気泡生成

水中に微小な気泡核が存在していたとしよう。(現実の水中では気泡核はごみなどに必ず吸着している。)水中に強い音波を放射すると, 音波によって大気圧を中心に周期的な圧力変動が起こる. 気泡は表面張力が働く結果小さくなろうとするが, 圧力が減少したときにその表面張力に打ち勝って気泡は膨張する(図1). 圧力が増加したときには逆に気泡は収縮する. 気泡膨張時は気泡内圧力が低いので水に溶け込んでいた空気(溶存空気)が気泡内へ入ってくる. 気泡収縮時には逆に空気が水中に逃げるが, 気泡膨張時の方が出入りする表面積が大きいので差し引きして気泡に空気が入る方が多く, 膨張収縮を繰り返しながら徐々に大きくなる. あらかじめ水を脱気して溶存空気量を調節してやると, 適当なサイズで膨張収縮を長時間繰り返し起こすこともできる. エネルギーの収支を考えてみよう. 音波のエネルギーは, 気泡周囲の液体を振動させる運動エネルギーとして存在する. そのエネルギーは, 気泡壁にかかる圧力と気泡の体積変化の積である仕事に変換される. 気泡は最終的に $1\mu\text{m}$ 以下の大きさにまで収縮されるので, ミクロな領域に音波エネルギーが集中されることになり, そのとき内部は高温高压状態となる. これがエネルギーの増幅機構である. 気泡径が圧力変化に伴ってどのように時間変化するかは既に求められている⁽¹⁾. 図2に, 超音波による4周期分の音圧変化(図2(a))と気泡半径の時間変化(図2(b))の計算例を示す. 気泡の表面張力や液体の粘性・圧縮率なども考慮し, 超音波周波数は 30kHz , 最大音圧は 1.5 気圧, 気泡初期半径は $R_0=5\mu\text{m}$ とした. 音圧波形と同じ周期で気泡径が増減するが, 膨張時は液体を押しつける方向なので比較的ゆっくり最大 $50\mu\text{m}$ まで膨らみ, 収縮時は気体を圧縮する方向なので急激に最小 $0.6\mu\text{m}$ 程度まで小さくなる. そして最小径を過ぎた

後, 何回かリバウンドが見られる. このリバウンドは気泡が共振周波数で振動するためである.

気泡内気体の熱が液体側に逃げないとする断熱変化を仮定すると, 気泡が最も小さくなったとき(半径 R_{\min})の最終到達温度は次式で与えられる.

$$T_{\max} = T_0 \left(\frac{R_0}{R_{\min}} \right)^{3(\gamma-1)} \quad (1)$$

ここで, 初期の気泡径・気泡温度を $R_0=5\mu\text{m}$, $T_0=300\text{K}$ とし, 気体の比熱比 γ をアルゴンのような単原子分子を仮定して $\gamma=5/3$ とおく. これらを使って式(1)を計算すると T_{\max} は約2万度という大きな値になる. 実際には水蒸気の出入りなどがありもっと低い温度になる. 図2(c)は気泡内温度の時間変化を示したもので, 高温になるのは気泡が最も小さくなったほんの一瞬だけであることが分かる. このような高温状態から発光することが分かっており(図1), その発光をソノルミネセンス(Sonoluminescence)と呼んでいる. また, 式(1)のような断熱変化を仮定して気泡内が一様な温度であるとするホットスポット説に対して, 収縮する気泡内で衝撃波が発生するという説もある. その説によると最高100万度という高温になるという⁽²⁾. 衝撃波説に基づいて気泡内で核融合が起こったという実験が2002年に報告されているが, 他の研究者による確認はまだされていない.

3. ソノルミネセンス

強い超音波を水に照射すると発光するという事実は, 1930年代から知られていた. 当時, 写真現像液に超音波を加えて現像を増強する目的で実験したらしいが, 光を当てないのに感光することが発見され, その後の研究で気泡から発光していることが分かった. 放射線がウラン鉱石から発見されたきっかけも印画紙の予期せぬ感光からであったことを思い起こすと, 何やら興味深い. ソ

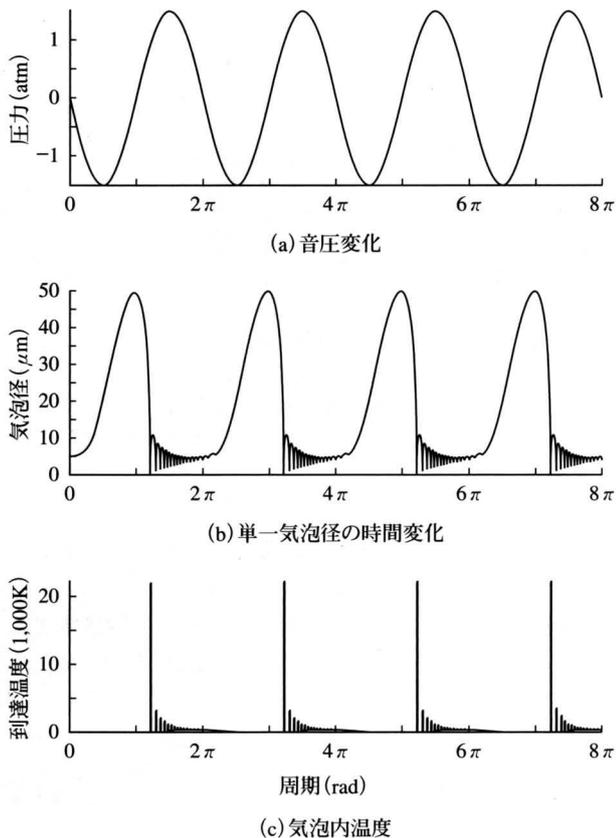


図2 周波数 30kHz, 最大音圧 1.5 気圧の超音波を水中に加えたときの音圧変化 4 周期分と、それに伴う単一気泡径の時間変化と気泡内温度の計算値。気泡初期径は $5\mu\text{m}$ とした。式(1)の単純な計算では最大到達温度は約 2 万度にもなる。(注)音圧がマイナス 1 気圧を超える状態では、真空になるのではなく液体に引張力が働く。

ソルミネセンスが注目を集めたのは、1990年に発見されたシングルバブルソルミネセンスと呼ばれる1個の気泡からの発光現象からであった。水を入れた球形フラスコの中心で長時間にわたってかすかに光る様子は幻想的で、“Star in a jar”と称され話題を呼んだ。図3に青白く発光するシングルバブルソルミネセンスの拡大写真を示す。超音波周波数は 32kHz で、気泡の最大径は数十 μm である。色が青白いということは、単色ではなく幅広い連続スペクトルを持つことを意味している⁽³⁾。

発光の機構はいまだに解明されているとはいえない。2.で述べたように気泡内が数千度の高温になることは確かである。そのような高温では気泡内の水分子は分解され、H や OH (ヒドロキシル) ラジカルが発生し、それらと酸素・窒素ガスが関与した種々の化学反応が起こる。生成された分子の励起状態から発光するという可能性もある。しかし、現在最も有力と考えられている説は、以下のようなものである。気泡には溶存空気が入り出すことを2.で述べたが、気泡内の酸素や窒素ガスは高温状態により分解反応して NO_x など水溶性の物質に変わってしまう。気泡内に残るのは、空気中に 1% 含まれているアルゴンガスである。高温状態に置かれたア



図3 単一気泡からの発光 (シングルバブルソルミネセンス) 写真 デジタルカメラを使い露光時間 10 秒で撮影。超音波周波数は 32kHz. 気泡の最大径は 0.1mm 以下である (林悠一撮影)。

ルゴン原子はわずかだが電離して、電子とイオンからなるプラズマ状態になる。その電子がイオンや原子に再結合する際、エネルギーを放出して(いわゆる制動放射)発光する。このような説で連続スペクトルを説明することが可能である。アルゴンが電離してイオン状態になり得ることは、硫酸中の実験でアルゴンイオンのスペクトルが検出されたことで証明された⁽⁴⁾。その結果から気泡内温度は約 1 万度と予想されたが、気泡の中心付近はもっと高い温度になっているはずと想像されている。太陽の表面は地球から観測すると約 6 千度だが、太陽内部は何千万度と予想されていることをイメージすればよいかもしれない。気泡中心部で何が起きているかはまだ謎である。

水に種々の物質を溶かすと、特有の色のソルミネセンスを起こすようになる。図4左は、ルミノールという物質を溶解した水からの発光写真である。ルミノールは血痕を見つけるのに使われている物質である。図3のシングルバブルとは異なり、数多くの気泡がビーカー中に横じま状にできた定在音波の腹にトラップされて、青く光っている。青く光る理由は、キャビテーション気泡から生成された OH ラジカルとルミノール分子が反応して化学発光(波長 460nm) するためである。図4中央と右は、それぞれ塩化ナトリウム (NaCl)、塩化リチウム (LiCl) を溶かした水からの発光写真である。前者はナトリウム原子のオレンジ色 (589nm)、後者はリチウム原子の赤紫色 (670nm) の発光を示している。つまりアルカリ金属原子の炎色反応が起こっていることになるので、いふならば水中花火である。それではなぜ炎色反応が水中で起こるのか、という疑問が生じる。水中のナトリウムはすべて Na^+ イオンとして存在しているはずなので、オレンジの発光を示すためにはどこかでナトリウム原子に還元されなければいけない。また、気泡内部のガス中で発光が起こっているとすると、どのような方法でナトリウムが水中から気泡内に入るのか、など数多くの興味深い問題が関与している。この問題の解明は発光機構にとって重要なだけでなく、超音波による種々の化学

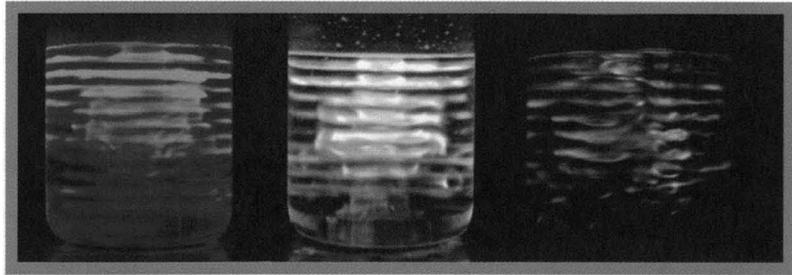


図4 ビーカー中で発光する種々の物質のソノルミネセンス写真 図左からルミノール水溶液, 塩化ナトリウム水溶液, 塩化リチウム水溶液. 超音波周波数は約130kHz. 多数の気泡が定在音波の腹にトラップされているので, 横じま状に光って見える (阿部将吾撮影).

反応利用に役立つ.

4. 音響キャビテーションの応用

超音波洗浄は, 音響キャビテーションの応用として最も代表的なものであり, 半導体 IC や種々の精密部品の洗浄に不可欠の存在となっている. 気泡による洗浄作用はどのように起こるのだろうか. 原因の一つはキャビテーション気泡から生成される OH ラジカルによるものである. 活性酸素として知られる OH ラジカルは気泡の外側つまり水中に透過し, 気泡周囲にある有機分子などの汚れを強い酸化力で分解する作用がある. もう一つは, 膨張収縮する気泡から発生する圧力波や壁面近傍で発生するマイクロジェットである. 気泡壁が高速に動くとき周囲に球面波状の圧力波 (場合によっては衝撃波) が生じ, その大きさは気泡近傍では 200 気圧以上にもなる. 図5に示すように, 固体壁近くで気泡が振動すると対称性が崩れる結果, 気泡中心から壁面に向かって液体の流れが生じるようになる. このマイクロジェットも 1,000 気圧以上の圧力を発生するといわれている⁽⁵⁾. 一方で, 圧力

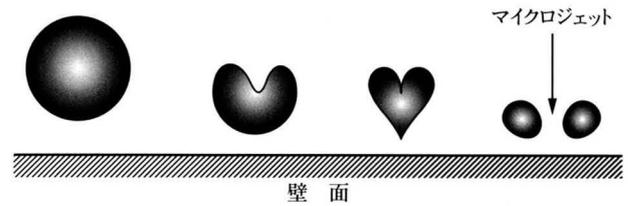


図5 超音波洗浄中に起こるマイクロジェットの生成 壁面近くで気泡が膨張収縮すると, 振動の対称性が崩れて固体壁面と反対側の気泡境界がへこむ (図左から2番目). 気泡中心で壁面に向かって高速の液体流れが生じるようになる. このため 1,000 気圧以上の圧力が壁に加わる.

波やマイクロジェットは洗浄対象にダメージを与えてしまう可能性がある. 特に IC のようなナノスケールサイズの場合ダメージを受けやすいので, それを避けていかに効率的に洗浄するかが解決されるべき課題として残っている. 超音波洗浄は溶剤を使用しないクリーンな方法なので, その重要性は今後ますます増してくるであろう.

ところで, 超音波洗浄器からのうるさい可聴騒音について疑問に思われたことはないだろうか. 超音波なのになぜ聞こえるのだろうか. 実はこの可聴騒音と気泡振動は密接に関係しているのである. 気泡の膨張収縮振動

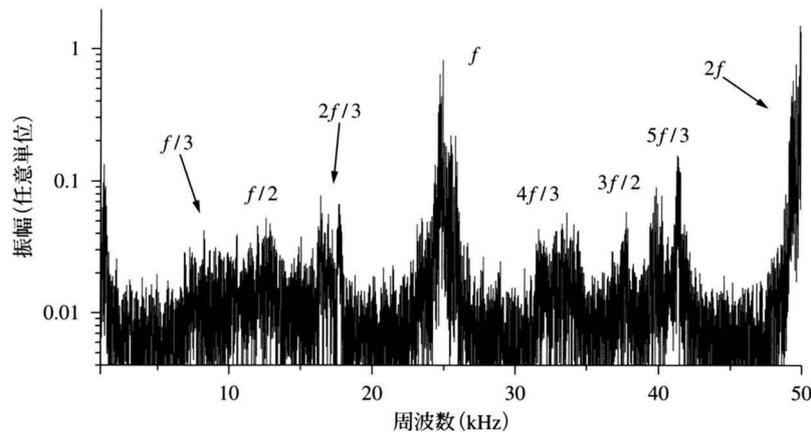


図6 市販超音波洗浄器からのキャビテーション雑音のスペクトル 気泡の膨張収縮は強い非線形振動なので, 決定論的カオス運動することが知られている. 基本周波数 $f=24\text{kHz}$ 以外に $f/3, f/2, 2f/3, 4f/3, 3f/2, 5f/3, 2f$ など多くの分調波, 高調波成分が発生する. $f/3 = 8\text{kHz}, f/2 = 12\text{kHz}$ の成分は不快なシャーッという音の原因である.

は強い非線形振動なので、周期分岐してカオス振動することが知られている⁽⁶⁾。図6に、市販の超音波洗浄器中に水中マイクを入れて測定した音圧スペクトルを示す。超音波の基本周波数である $f = 24\text{kHz}$ の成分やその高調波である $2f$ 成分のほか、 $f/3$, $f/2$, $2f/3$, $4f/3$, $3f/2$, $5f/3$ などの分調波成分が観測されている。 $f/3$ 成分は 8kHz , $f/2$ 成分は 12kHz に相当するから、これはかなり不快な音として聞こえるはずである。超音波パワーを大きくすると白色雑音も出現するようになる。非線形振動する気泡から生成される圧力波・マイクロジェットと洗浄効果とが関連している以上、不快な音はある程度我慢せざるを得ないということになる。

これまで説明した音響キャビテーションによってもたらされる種々の効果、すなわち強力な酸化剤であるOHラジカルの発生、高温高压のミクロな極限反応場の存在、マイクロジェット発生などを、医学・化学・環境科学の分野に応用する試みが広がりつつある⁽⁷⁾。医療分野の胆石破壊などは既によく知られているが、HIFU (High Intensity Focused Ultrasound, 高密度集束超音波によるがん療法) や細胞への遺伝子導入などはかなり研究が進んでいる。種々の高分子の分解や合成、バイオディーゼル燃料製造、金・鉄・白金などのアモルファス金属ナノ粒子の合成、薬物微結晶の形態制御、トリハロメタンなど有害物質の分解処理など多くの分野で音響キャビテーションの新しい可能性が開かれようとしている。なお、

これらの応用については本会和文論文誌(A)に特集⁽⁸⁾があるのでそちらも御参照願いたい。

文 献

- (1) F.R. Young, *Sonoluminescence*, CRC Press, Boca Raton, 2005.
- (2) 安井久一, 小塚見透, 飯田康夫, “ソノルミネセンスと気泡ダイナミクス,” 信学論 (A), vol.J89-A, no.9, pp.686-694, Sept. 2006.
- (3) M.P. Brenner, S. Hilgenfeldt, and D. Lohse, “Single bubble sonoluminescence,” *Rev. Mod. Phys.*, vol.74, no.2, pp.425-484, 2002.
- (4) D.J. Flannigan and K.S. Suslick, “Plasma formation and temperature measurement during single bubble cavitation,” *Nature*, vol.434, pp.52-55, 2005.
- (5) R.F. Young, *Cavitation*, Imperial Collage Press, London, 1999.
- (6) W. Lauterborn and E. Suchla, “Bifurcation superstructure in a model of acoustic turbulence,” *Phys. Rev. Lett.*, vol.53, no.24, pp.2304-2307, 1984.
- (7) 飯田康夫, ソノプロセスのはなし, 日刊工業新聞社, 2006.
- (8) “超音波キャビテーションの科学と応用論文特集,” 信学論 (A), vol.J89-A, no.9, pp.685-760, Sept. 2006.

(平成 22 年 1 月 14 日受付 平成 22 年 2 月 9 日最終受付)



崔 博坤 (正員: シニア会員)

昭 49 東大・工・物理卒, 昭 54 同大学院博士課程了, 工博。現在, 明大・理工・物理・教授。物理音響学, 超音波物理学の研究に従事。編著「超音波用語事典」など。