

# 層状構造物から水への超音波透過実験

加 藤 初 儀\*

Transmission of ultrasonic sound from a layered medium into water

Hatsuyoshi KATO  
(Received 20 November 2000)

## 概 要

約 2 MHz の超音波を層状構造物に入射させ、さらに水中に透過させる実験を行った。層状構造物は、厚さ0.5mmの銅板と銀板を交互に4層を重ね、共晶点以下の温度で加熱・圧着したものである。全体で8層、厚さ8.0mmとなる。この層状構造物では、2.08MHzの超音波が水に共鳴透過することが理論的に知られている。層状構造物に入射した超音波のスペクトルが広く、共鳴振動数を大きく覆うため、共鳴透過現象を独立に観測することはできなかった。しかし、厚さ8.0mmの銅板を用いて行った同様の透過実験と比較することにより、超音波の水中への透過率をもつピークが共鳴振動数の近くに集まる傾向が存在することが明らかとなった。また、銅板の場合にはピークの振動数が等間隔で列ぶが、層状構造物の場合にはピークの振動数間隔に乱れが生じた。

## Abstract

Experiment has made for ultrasonic sound with frequencies about 2 MHz to transmit from a layered medium into water. The layered medium has eight bilayers of Cu and Ag plates, whose thicknesses are both 0.5 mm. Therefore, the total thickness becomes 8.0 mm. According to previous studies, the layered medium has a resonant transmission frequency 2.08 MHz, at which ultrasonic sound resonantly transmits into water. Power spectrum of the ultrasonic sound has wide frequency range, so that it wholly covers the resonant frequency. The resonant transmission was not observed independently. However, the power spectrum of the sound in water had many peaks which had a tendency to shift near the resonant frequency if we compared them with the spectrum peaks for isotropic Cu plate. For the Cu plate, the peaks of the spectrum had a unique frequency interval. On the contrary, the spectrum peaks for the layered medium had rather random frequency intervals.

## 1. 超音波共鳴透過の理論的基礎

近年、単原子層を積層したメゾスコピックな超格子(層状構造物)での音響フォノンに関する研究が理論的及び実験的に行われている。<sup>1-10</sup>これらの研究で考察されている音響フォノンの振動数は数十GHzから1THz程度である。これを数MHz程度にすると、音響フォノンの代わりに超音波を対応付け、超格子の代わりに数mmの層状構造物を対応付けて、音響フォノンと超格子の研究結果を考察することが可能である。本研究の一部は、超格子中の音響フォノンが液体中に共鳴透過する

現象を、超音波を用いて検証しようとするものである。

図1に本実験の基礎となる理論を考察した物理系を示す。層状構造物の自由端を液体に浸してある。層状構造物は2種類の固体層ABを交互に積層したものである。簡単のため、層状構造物の層Bと超音波発振器(トランスデューサ)の音響インピーダンスは同じものとする。超音波発振器から超音波を層の界面に垂直に入射に入射する。層状構造物を伝搬する超音波は、層状構造物の他端から一部が液体に透過し、一部は反射して超音波発振器側に戻る。液体に透過した超音波を測定するために、音圧の測定装置(ハイドロフォン)を設置してある。

\* 助教授 一般教科

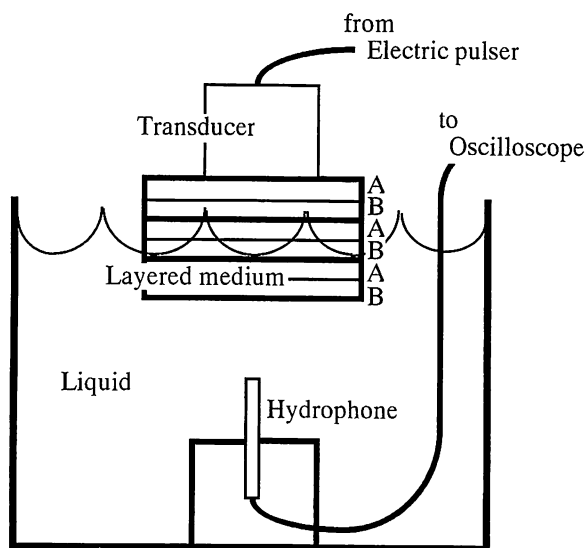


図1：実験装置の概念図

図2(a)に、層状構造物のA層として厚さ0.5mmのCu, B層として厚さ0.5mmのAgを用い、液体は水とした場合の超音波の透過率を示した。積層した二重層ABの個数は8である。各構成要素の音響インピーダンスは、単位を $10^6 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ として、Cuで44.7, Agで38.3, 液体として水を考え1.48としている。

超音波が連続波で、その振動数を変化させた際、CuまたはAgと水のインピーダンスの比が10倍以上あるにもかかわらず透過率が大きくなり、反射がほぼ消える振動数( $\nu_R=2.08\text{MHz}$ )が存在する。この振動数 $\nu_R$ は、無限周期の層状構造物で現れるストップバンドの振動数に対応している。一方、ここで扱っている有限な層状構造物では、自由端表面で振動振幅が基盤の振幅より大きくなって局在する状況<sup>7</sup>となっている。このため、有限な層状構造物中の超音波が効率よく水に透過する<sup>11</sup>。また、共鳴透過では図2(b)に示すように非共鳴時より長い時間を要して層状構造物から水に超音波が透過する。

## 2. 音響インピーダンス整合器

超音波発振器から水などの物体に超音波を透過させる際、媒質間の整合を取る従来の方法では、超音波発振器と水の間に均一な物質でできた4分1波長板を置いたり、超音波に対する集束レンズを用いて、超音波発振器から水などに超音波を入射する。

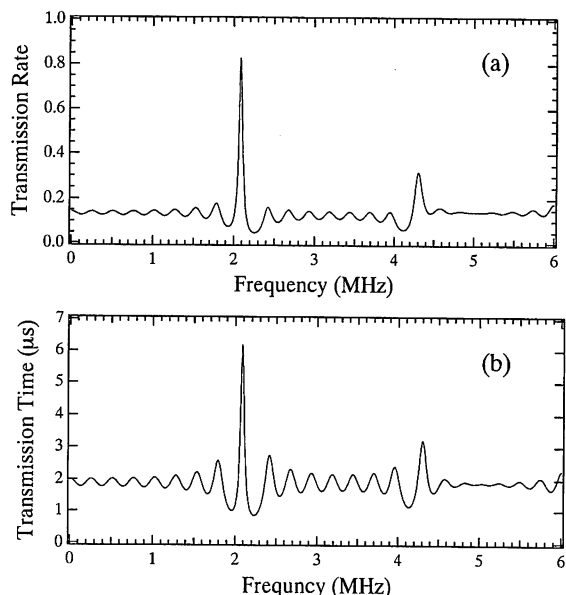


図2：Cu/Ag層状構造物での(a)透過率と(b)透過時間

この節では、層状構造物を利用して、超音波発振器から水などの被入射物質への超音波透過率を向上させる音響インピーダンス整合器を考察する。なお、超音波は単一振動数の連続波と仮定する。

層状構造物を成す二種の物質をABとし、その音響インピーダンスをそれぞれ $Z_A, Z_B$ , およびその層の厚さをそれぞれ $D_A, D_B$ , その物質中の超音波を速度を $V_A, V_B$ , とする。物質A,Bを音響的に連続に接合したものを二重層と呼ぶ。さらに、二重層ABを音響的に接合し、その二重層の個数を $N$ とする層状構造物を作成する。層状構造物中を伝搬する超音波に対する分散関係は、各層の界面に垂直に超音波を入射させると、次式で与えられる。

$$\cos qD = \cos a \cos \beta - \frac{1}{2} (Z_A/Z_B + Z_B/Z_A) \sin a \sin \beta \quad (1)$$

ここで、 $a = \omega D_A/V_A$ ,  $\beta = \omega D_B/V_B$ ,  $D = D_A + D_B$  で、 $q$  は正規モードの波数である。

上記の分散関係に於いて、ひとつの共鳴条件として、 $\sin \beta \cong \sin a$  と同時に  $\cos \beta \cong -\cos a$  となる角振動数 $\omega$ が存在する条件があり、この角振動数を $\omega_R$ とする。

このとき、上記の式(1)は、

$$\cos qD \cong -1 - \frac{1}{2} \left( \sqrt{Z_A/Z_B} - \sqrt{Z_B/Z_A} \right)^2 \sin^2 a \quad (2)$$

となる。これは、 $\cos qD < -1$ を意味し、 $q$ は複素数となる。この条件を満たす角振動数 $\omega_R$ を含む角振動数幅 $\Delta\omega_R$ で、層状構造物が超音波の被入射物質に接する面における振動振幅は共鳴的に大きくなる。

上記の共鳴条件が成立するとき、層状物質に対して、実効的な音響インピーダンス $Z_e$ を以下の様に定義できる。まず、超音波の被入射物質との接合面にある層状構造物中の層 $B$ 内での振幅反射係数 $\kappa$ が、次の2次方程式

$$\kappa^2 - \frac{|c|^2 + 1}{\text{Re}[c]} \kappa + 1 = 0 \quad (3)$$

を満足することを要求する。ここで、

$$c = r_{AB} \frac{\cos NqD - i f(qD) \cot \alpha}{f(qD) (1 + i \cot \alpha)} \quad (4)$$

$$f(qD) = (1 + \cos qD) \frac{\sin NqD}{\sin qD} \quad (5)$$

である。また、 $r_{AB} = (1 - Z_B/Z_A)/(1 + Z_B/Z_A)$ は超音波が物質 $A$ から $B$ へ入射する際の振幅反射係数である。ただし、 $\sin \alpha \simeq 1$ のときには上記の $c$ 近似は十分でなくなる。)の上記の $\kappa$ に対する2次方程式である式(3)が、実数 $\kappa_e$ で

$$1 \geq \kappa_e > -1 \quad (6)$$

を満たす解をもつとき

$$Z_e = Z_B \frac{1 - \kappa_e}{1 + \kappa_e} \quad (7)$$

で層状構造物に対して実効的な音響インピーダンス $Z_e$ を定義できる。超音波に対する被入射物質の音響インピーダンス $Z_D$ が上記の $Z_e$ と等しく、超音波の角振動数が $\omega_R$ と一致しているとき、層状構造物から被入射物質への透過率をほぼ1に近い極大値とすることができる。

また、超音波発振器の音響インピーダンス $Z_0$ と物質 $B$ の音響インピーダンス $Z_B$ が等しくなる様に物質 $B$ を決定して音響的に連続に両者を接合すれば、超音波発振器と音響インピーダンス整合器となる層状構造物間で反射が発生しない。さらに、物質 $A$ の音響インピーダンス $Z_A$ を上記の $Z_e$ が与えられる条件を満足する様に決定すると、 $Z_B < Z_A$ のときは $Z_e$ が $Z_B$ の10分の1倍程度、 $Z_B > Z_A$ のときは $Z_e$ が $Z_B$ の10倍程度の範囲内で、

実効的に音響インピーダンスを整合させることが可能である。

なお、層状構造物内の二重層の個数 $N$ は、超音波の透過率の大きさを決める因子となっているため、適切な値を選ぶ必要がある。二重層内にある二つの層がもつ音響インピーダンスの比が1:1.2程度の金属を用いる際には、 $N$ として6から10が適切である。特に、 $D_A = D_B$ の場合、 $N \simeq |(V_A + V_B)/(V_A - V_B)|$ で与えられる。

### 3. 超音波パルスによる透過実験結果

前節では超音波を連続波と考えたが、実用的にはパルス波を用いることが多い。次に、このパルス波を用いて実験的に考察する。図1に示した層状構造物の系で、超音波パルスを層状構造物に入射した場合、ハイドロフォンの出力電圧から得られる水中の超音波の圧力を図3(a)、そのパワースペクトルから得られる水中の超音波のエネルギー流束を図3(b)に示す。比較の為に、層状構造物を厚さ8.0mmで均一なCu板に置き換えた場合での水中圧力を図4(a)、そのエネルギー流束を図4(b)に示してある。

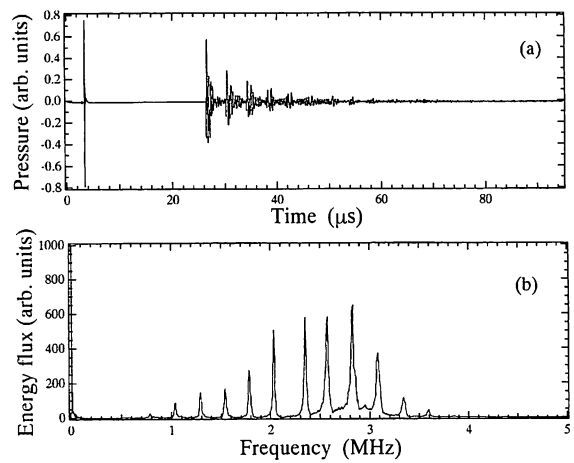


図3: 構造物から水中への(a)音圧と(b)エネルギー流束

均一なCu板の際、入射した超音波がこのCu板のふたつの表面間で反射を繰り返しながら水中に透過してゆく。図4(a)で、この様子を確認することが可能である。超音波が表面で反射するとき位相が反転せず、表面間を時間 $\tau$ で一往復すると仮定する。このとき水中の音圧がもつパワースペクトル(つまりエネルギー流束)は、Cu板に入

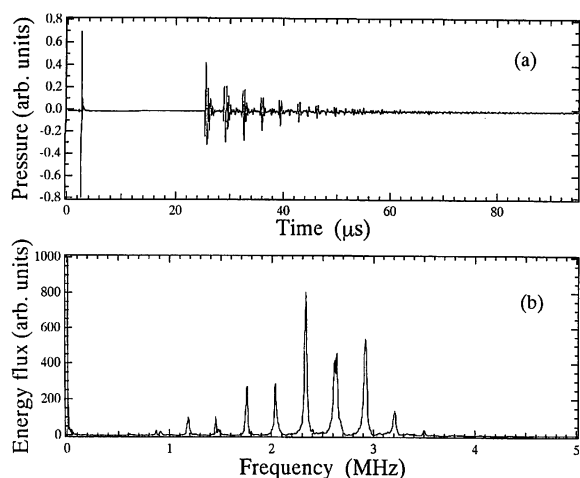


図4：Cu板から水中への(a)音圧と(b)エネルギー流束

射した超音波のスペクトルと次の関数  $|S(\nu)|^2$  の積で表現できる．

$$|S(\nu)|^2 = \frac{\frac{1}{4} e^{\gamma}}{\sinh^2(\gamma/2) + \sin^2 \pi \nu \tau} \quad (8)$$

ここで、 $\nu$  は振動数で、 $\gamma$  は図4(a)でのパルスの減衰係数である．今回の実験では、入射超音波のスペクトルが、 $|S(\nu)|^2$  のもつ各ピークの幅より広い．このため、水中の音圧のスペクトルは、入射超音波のスペクトルが包絡線となるピークが並び、そのピークの振動数は  $|S(\nu)|^2$  が持つピークの振動数と一致する．これより、エネルギー流束が示すピークの振動数は、均等に  $1/\tau$  の間隔をもつことがわかる．この特徴が図4(b)で現れており、 $\tau$  の値として  $3.4 \mu\text{s}$  となっている．

この値は、 $8.0\text{mm}$  の Cu 板を超音波が往復する理論的時間  $3.8 \mu\text{s}$  と一致していると見なせる．

一方、図3(b)に示す層状構造物の系でのエネルギー流束は、ピークの振動数間隔が均等でない．これは層状構造物内での超音波の反射が単純なものではなく、図2(b)に示す様に超音波の振動数で透過時間にばらつきがある為と考えられる．特に、図3(b)と図4(b)のどちらでも、エネルギー流束がピークを持つ共鳴振動数  $\nu_R$  付近にピークをもつ事は注目する点と思われる．均一な Cu 板を用いた図4(b)と比較すると、層状構造物に対する図3(b)では、共鳴振動数  $\nu_R$  に近い振動数  $2.05 \text{ MHz}$  のピークの近くに他のピークが集まる傾向がある．また、これらのピークの振動数間隔が等間隔になっていない．この様子を示したものが図5である．

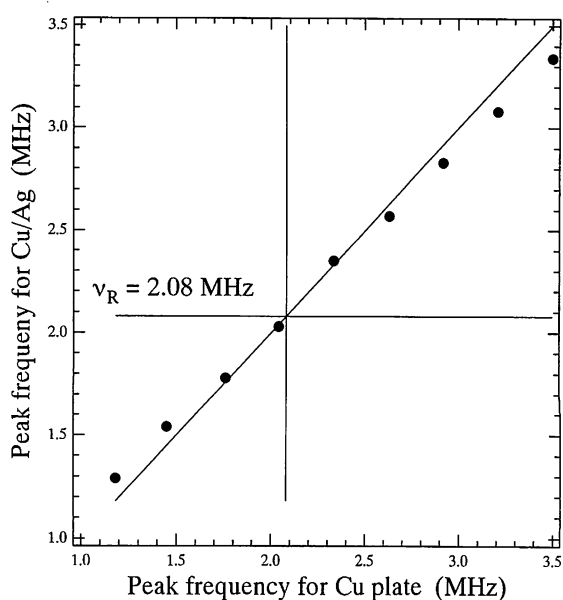


図5：Cu/Ag 層状構造物と Cu 板のエネルギー流束がもつピーク振動数の比較

#### 4. 結 論

約  $2\text{MHz}$  の超音波を層状構造物に入射させ、さらに水中に透過させる実験を行った．層状構造物は、厚さ  $0.5\text{mm}$  の銅板と銀板を交互に4層を、共晶点以下の温度で加熱・圧着したものである．全体で8層、厚さ  $8.0\text{mm}$  となる．層状構造物に入射した超音波のスペクトルが広く、共鳴振動数を大きく覆うため、共鳴透過現象を独立に観測することはできなかった．しかし、厚さ  $8.0\text{mm}$  銅板での同様の透過実験と比較することにより、共鳴振動数の周囲に現れる透過率のピークが共鳴振動数の近くに集まる傾向が存在することが明らかとなった．また、銅板の場合にはピークの振動数が等間隔で列ぶが、層状構造物の場合にはピークの振動数間隔に乱れが生じた．

今後、層状構造物に対するスペクトルがもつピークの振動数間隔が乱れる起因を考察することにより、共鳴透過の存在が明らかにできると考えられる．また、入射超音波のスペクトルを狭くすることで、共鳴透過を直接的に観測したい．

本研究の一部は、科学研究費補助金（基盤研究(c)[課題番号 11650062]）を用いて行った．

# 参考文献

- <sup>1</sup> T. J. Delph, G. Herrmann, R. K. Kaul, J. Appl. Phys. **45**, 343 (1978).
- <sup>2</sup> R. E. Camley, B. Djafari-Rouhani, L. Dobrzynski, A. A. Maradudin, Phys. Rev. **B 27**, 7318 (1983).
- <sup>3</sup> C. Colvard, T. A. Gant, M. V. Klein, R. Merlin, R. Fischer, H. Morkoc, A. C. Gossard, Phys. Rev. B **31**, 2080 (1985).
- <sup>4</sup> S. Tamura, Phys. Rev. B **43**, 12646 (1991).
- <sup>5</sup> S. Mizuno, S. Tamura, Phys. Rev. B **45**, 734 (1992).
- <sup>6</sup> S. Mizuno, S. Tamura, Phys. Rev. B **45**, 13423 (1992); Jpn. J. Appl. Phys. **32**, 2206 (1993).
- <sup>7</sup> S. Mizuno, S. Tamura, Phys. Rev. B **53**, 4549 (1996).
- <sup>8</sup> H. Kato, H. J. Maris, S. Tamura, Phys. Rev. B **53**, 7884 (1996); Physica B **219 & 220**, 696 (1996).
- <sup>9</sup> H. Kato, J. Acoust. Soc. Am., **101**(3), 1380 (1997).
- <sup>10</sup> H. Kato, S. Tamura, J. Phys. C, **9**, 6791 (1997).
- <sup>11</sup> H. Kato, Phys. Rev. B **59**, 11136 (1999).

(平成12年11月20日受理)

