超音波印加される下向き伝熱面上のキャビテーションの強さと 熱伝達に関する研究*

野村 信 福^{*1}, 中 川 勝 文^{*2}

Cavitation Intensity and Heat Transfer on Bottom Surface by Applying Ultrasonic Vibration

Shinfuku NOMURA and Masafumi NAKAGAWA

The cavitation intensity and the heat transfer coefficient on the bottom surface of the object, by applying ultrasonic vibration, were measured experimentally. The object faced the ultrasonic generator adhered to the bottom of the water tank. The dimensions of the object were greater than the ultrasonic wavelength. Ultrasonic power of 600 W with a frequency of 40 kHz was used. The cavitation intensity was defined by the erosion loss of aluminum foil, whose thickness was 15 μm , when aluminum foil stuck on the bottom of the object was immersed into water in the ultrasonic field. The result was that the larger the cavitation intensity became, the more the heat transfer coefficient increased. With varying densities of objects, the greater the density was the larger the cavitation intensity.

Key Words: Heat Transfer Enhancement, Natural Convection, Ultrasonic, Cavitation Erosion, Sound, Acoustic Impedance, Acoustic Streaming

1. 緒 論

超音波を液体中の発熱体に印加すると、この発熱体の熱伝達率は増加する。超音波波動は圧電、磁わい効果を利用して電気的な方法で得られるので容易に細かく熱伝達率を制御でき、この伝熱促進法が種々の伝熱面へ応用できると考えられる。Larson ら⁽¹⁾は周波数の異なる超音波振動子を用いて液中の球からの対流伝熱について研究し、超音波の周波数が数十 kHz のオーダーでは伝熱促進の主因はキャビテーションで、数百 kHz 以上の周波数になると quartz wind と呼ばれる音響流の効果であることを示した。星野・油川ら⁽²⁾⁽³⁾はキャビテーションの影響を取り除いた脱気水を用いた実験でも超音波を照射すれば熱伝達率は増加するが、大きな伝熱促進を得るにはキャビテーションの発生しやすい非脱気水を用いたほうがよいことを、また、促進の効果は超音波照射方向により変化し、伝熱面は垂直平板よりも下向き傾斜平板のほうが促進率は大きくなることを報告している。超音波による促進機構は、

木本ら⁽⁴⁾⁽⁵⁾は音響流による流動効果によって、Wong ら⁽⁶⁾⁽⁷⁾と Bergles ら⁽⁸⁾は液体中で発生するキャビテーションの発生・崩壊によるかくはん効果のためであると報告している。油川ら⁽³⁾や中山ら⁽⁹⁾の研究に示されるように、特にキャビテーションが発生する場合超音波による伝熱促進の効果は顕著に現れる。したがって超音波による伝熱促進の効果を調べるためには物体面上でのキャビテーションの強さを知る必要がある。しかし伝熱面上でキャビテーションの強さを定量的に調べた研究はほとんどないので、熱伝達率の増加量とキャビテーションの強さの関係が明らかにされていない。さらに、種々の伝熱面に応用するには超音波の波長が小さいので波長よりかなり大きな物体表面での超音波による伝熱特性を知る必要がある。キャビテーションの強さは超音波強度を一定にしても物体の大きさや材質によっても大きく影響を受けるので超音波による伝熱促進の効果を最大限に生かすためには、いかにして強いキャビテーションを物体面上に発生させるかが重要な問題となってくる。

そこで、本研究ではまずキャビテーションの効果が顕著に現れる下向き伝熱面上のキャビテーションの強さを測定し、これと伝熱実験から得られた熱伝達率との関係を求めた。次に、物体面上で強いキャビテーシ

* 原稿受付 平成4年8月6日。

^{*1} 正員、豊橋技術科学大学大学院 (〒441 豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘 1-1)。

^{*2} 正員、豊橋技術科学大学工学部。

オンを発生させるにはどうすればよいのかを実験的に調べ、超音波による伝熱促進の効果を最大にする方法を提案する。

2. キャビテーションの強さの測定

安藤ら⁽¹⁰⁾はアルミニウムはくを水槽に入れ超音波を印加すると、キャビテーションによる作用を受けてアルミニウムはくがせん孔されるので、この方法によって超音波洗浄槽中のキャビテーション分布が可視化できることを示した。

そこで本研究ではアルミニウムはくを物体底面にはってそのせん孔作用を利用してキャビテーションの強さを定量化する方法を試みた。この方法はアルミニウムはくを伝熱面にはり付けるだけでよいので容易に複雑な形状の伝熱面でも測定できる。

2.1 実験装置 キャビテーションの強さを測定するための実験装置の概略図を図1に示す。実験装置は底部に超音波発振器が取付けられた水槽と、水中に沈められた直方形の物体からなる。水槽は内枠が横370 mm×奥行340 mm×高さ380 mmのく形の亚克力製の二重水槽であるので、外部から観察でき、水温を一定に保つことができる。水面上には超音波印加による波立ちを防ぐため厚さ10 mmの亚克力板の落としぶたを設けた。水面の高さは超音波によって生ずる定在波を安定させるために148 mm(約4波長)に固定した。使用した発振器は、電気出力が300~600 Wに可変できる市販の投げ込み式超音波洗浄用発振器ユニットである。超音波発振器はボルト締めランジュバンPZT振動子で共振周波数は40 kHzである。この発振器ユニットは13本の発振子で構成され振動面積が200 mm×330 mmであるので水槽内のほぼ全域に強力な超音波を印加できる。キャビテーションの強さの測定および後の伝熱実験のすべての実験に対して超音波出力は600 Wで行った。水没させる物体は外形寸法が、横105 mm×奥行105 mm×高さ190 mmの直方体であり、超音波の波長(約37 mm)より大きい次元をもっている。ここではキャビテーションの強さのみを測定するために直方体の物体には真ちゅうのブロックを用いた。後の伝熱実験で使用する伝熱面は真ちゅうと密度がほぼ等しい銅のブロックでできている。

本研究ではこの技術の実用性およびこれまでの研究との比較を考え超音波を印加する流体として水道水を用いた。広瀬ら⁽¹¹⁾⁽¹²⁾はキャビテーションエロージョンに対する液体中のガス溶解量に注目し、液中のガス溶解量の増加によって、発生するキャビテーション作用が弱くなることを、またKellerら⁽¹³⁾は水道水中の

気泡核が減少するとキャビテーションが発生しにくくなることを報告している。キャビテーションの発生に対して、水中の気泡核やガス含有量は重要な要素であり実験データにかなり影響を及ぼす。そこで、液中の気泡核やガス含有量を超音波印加に対して安定にするために水道水が実験水槽に注ぎ込まれた後、1 minの超音波印加が20回繰返された。この前処理を施すことによってデータのばらつきをかなり抑えられた。溶存酸素量は溶存酸素計の測定から89~93%であり、電気伝導度は伝導度計の測定から68~72 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の範囲であったのですべての実験に対してこの処理は行われた。また水温は $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の範囲に設定した。

2.2 キャビテーション強度 遠藤ら⁽¹⁵⁾と岩井ら⁽¹⁶⁾は機械材料の耐キャビテーションエロージョン特性をキャビテーションの作用によって削り取られる質量を測定し評価している。水没した物体の底面にはり付けられたアルミニウムはくは超音波の印加によってせん孔させられるので、キャビテーションの強さの尺度としてアルミニウムはくのせん孔量を用いることができる。キャビテーションの強さの測定には厚さ15 μm のアルミニウムはくを物体の底面積と同じ105 mm×105 mmに切り取り物体底面にはり付けた。アルミニウムはくのせん孔実験から本実験で使用した水槽内ではキャビテーションの作用は水槽中央部からやや離れた場所で強かったので、図1に示すように物体の中心軸が水槽中央から90 mm離れた位置にくるよ

図1 実験装置

うにした。図2(a)は25 s、図2(b)は50 s 超音波印加されせん孔したアルミニウムはくの図である。図2はアルミニウムはくを下向き面からはがされた後、画像処理されたものである。白い部分がアルミニウムはくで黒い穴がせん孔された場所である。中央の正方形の黒い部分は音圧測定のためにあらかじめ切り取られた部分である。超音波印加時間が長い図2(b)のせん孔面積は、短い図2(a)に比べると大きくなっている。したがって削り取られる質量は大きくなる。これを見るため横軸に超音波の印加時間を取り、縦軸に単位面積当たりのアルミニウムはくの質量の減少量をとって図3に示す。アルミニウムはくの質量減少量は、画像処理から得られたアルミニウムはくのせん孔面積にアルミニウムはくの厚さと密度を乗じて求めた。質量減少量は50 s以上の印加時間では飽和するが、時間とともに直線的に増加する。また図2には小さな孔が無数に現れており、気泡の崩壊する位置がランダムであることを示している。気泡崩壊の衝撃力がアルミニウムはくの同一点に繰返し作用する確率は小さい⁽¹⁵⁾ので、せん孔面積は超音波の印加時間とともに増加す

る。図3はキャビテーションのかなり強い発振器からの距離 h が45 mmの底面で測定したものであるが、キャビテーション強度のかなり弱い h が123 mmで同様の測定をした結果を図4に示す。図3と同じように直線部が存在し、そしてキャビテーション強度が弱いためその傾きは小さくなっている。したがって、せん孔量が飽和する時間以内であれば質量減少量を時間で割った質量減少率で超音波による物体底面のキャビテーション強度 $C.I.[g/(m^2 \cdot s)]$ を定量化することができる。

3. 超音波が印加される 下向き伝熱面の熱伝達

物体底面でのキャビテーション強度を定量的に知ることができるようになったので、下向き伝熱面での超音波印加による伝熱特性とキャビテーション強度との関係を調べた。

3・1 伝熱実験 伝熱面には図5に示すように絶縁用のエポキシ樹脂で固められた20 mm×8 mmの銅ブロックの一面を使用した。加熱には銅ブロックを

(a) 超音波 25 s 印加

(b) 超音波 50 s 印加

図2 物体底面のアルミニウムはくのせん孔画像

図3 超音波印加時間と質量減少量
発振器からの高さ 45 mm

図4 超音波印加時間と質量減少量
発振器からの高さ 123 mm

テフロンシートで絶縁したヒータを巻付け、ジュール加熱により水中に露出している伝熱面に熱流束を与えた。この伝熱面は断熱材として用いた外形寸法が $105\text{ mm} \times 105\text{ mm} \times 190\text{ mm}$ である発泡スチロールの底面に埋込まれて支持されている。ブロック中央に埋込まれた3本の熱電対の温度こう配から加熱熱流束を、またこれらの指示温度の表面への外挿値から伝熱面温度を求めた。伝熱面温度と周囲流体温度との差から熱伝達率が求められ、超音波を印加したときとそうでないときの熱伝達率を測定した。伝熱面のキャビテーション強度は銅ブロックの伝熱面にあたる $20\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ の部分のアルミニウムはくのせん孔面積を画像処理して、2章で述べた質量減少率として計算された。

3.2 伝熱面上のキャビテーション強度と熱伝達率

物体底面でのキャビテーション強度は発振器からの距離によって周期的に変化する。伝熱面温度が 40°C のときの下向き面での熱伝達率 α を発振器からの距離 h に対して示したものが図6である。図6中の▲印は超音波を印加した場合の熱伝達率で印加しないときの下向き面の熱伝達率 $630\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ に比べ大きいところで8倍、小さいところでも2倍程度大きい。また図6中には前に定義したキャビテーション強度 $C.I$ も○印で発振器からの距離 h に対して示している。キャビテーション強度は水槽内に生ずる定在波のために周期的に変化し、また発振器から遠ざかるにつれ小さくなる。このキャビテーション強度の強いところでは熱伝達率が大きく、弱いところで小さい。この相関を示したものが図7である。図7中の破線は最小二乗近似で求めた直線である。キャビテーション強度を大きくすればするほど熱伝達率が増加することがわかる。キ

図5 伝熱面

ャビテーション強度が大きい部分ではこの増加量は大きく、キャビテーション強度が $0.1 \sim 0.7\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 程度の場合熱伝達率は2～8倍程度増加している。また、キャビテーション強度を小さくしても熱伝達率は超音波を印加しない下向き面の熱伝達率よりも大きい。キャビテーション強度が零でも超音波を印加したときに生ずる音響流のために熱伝達率が増加したと考えられる。キャビテーション強度が零に近い場合は音響流によって、それ以外はキャビテーションのせん孔作用によって増加したと言える。したがって、より大きな熱伝達率を得るためにはより強いキャビテーション強度の伝熱面を得る必要がある。

4. 伝熱面上で強いキャビテーションを得る方法

3章で熱伝達率を増加させるためには伝熱面上に強いキャビテーションを発生させなければならないことがわかったので、実際の応用を考えるとより強いキャビテーション強度を得るためにどのような物性をもった伝熱面を用いればよいかを知る必要がある。ここでは伝熱実験をせず、キャビテーション強度のみを実験的に調べ、より効果のある伝熱面の構成を考えた。

4.1 伝熱面を構成している物体の密度がキャビテーション強度に与える効果 超音波を伝える水中には定在波が存在していて、伝熱面で波が反射してい

図6 下向き伝熱面の実験結果(伝熱面温度 40°C 一定)

図7 熱伝達率とキャビテーション強度の関係

る。伝熱面を構成している物質の波を反射する性質が伝熱面上でのキャビテーション強度に大きな影響を与えと考えられる。そこで水に比べて大きな密度をもつ金属の真ちゅうと、水に近いアクリル、および極端に小さい発泡スチロールの3種類の物体の下向き面でのキャビテーション強度を測定した。各材料の密度 ρ 、音速 c 、音響インピーダンス ρc は表1に示している。

これらの物体を水槽に入れ発振器からの距離を順次変化させて、キャビテーション強度を測定する実験を行った。物体の大きさは2章と同じ105 mm×105 mm×190 mmである。図8は横軸に発振器から物体底面までの距離 h をとり物体底面のキャビテーション強度の実験結果を示したものである。図8中の●印で示される真ちゅう底面のキャビテーション強度は発振器からの距離 h とともに変化し、水槽内に存在する定在波のため約20 mm周期をもつ。また、発振器に近いほどその値は大きい。□印のアクリル底面でのキャビテーション強度は真ちゅうの場合と同じように高さとともに変化するが、真ちゅうに比べかなり小さい。真ちゅうのキャビテーション強度の低い部分でさえもアクリルの高い部分よりも大きい。

発泡スチロールの物体についてもキャビテーション強度の測定を試みたが、発泡スチロール底面ではいかなる高さにおいてもアルミニウムはくはせん孔されなかった。これらの実験から、物体底面上のキャビテーション強度は音響インピーダンスの大きい物体のほうが大きくなるということが出来る。これは物体の音響インピーダンスの大きいものほど底面近くの音圧が高く、キャビテーション強度も高くなるためだと考えられる。

4・2 伝熱面の表面密度がキャビテーション強度に与える効果 超音波は伝熱面の表面で反射しているので、表面の密度が重要となる。しかし、超音波は物体中も通過してゆくの表面の物性だけで決まるのでは

図8 真ちゅうとアクリルのキャビテーション強度

なく、波を反射させるためにはある程度の厚さが必要であると考えられる。4・1節で用いた発泡スチロールの底面にアクリル板をはり(すべての材料は物体底面の四隅でM3のビスで固定し接合している)、このアクリル板の板厚 t を0.5, 1.5, 5, 10 mmと換えてアクリル表面でのキャビテーション強度を測定した結果を図9に示す。板厚が0.5 mmと薄いとキャビテーション強度は小さい。これは発泡スチロール底面ではアルミニウムはくがせん孔されなかったことから推測できる。板厚を厚くすると、キャビテーション強度は板厚5 mmで最大値をとる。板厚が10 mmになると、キャビテーション強度は少し小さくなるが、さらに板厚が厚くなると図8に示されるアクリルだけの場合と一致するものと思われる。超音波を十分に反射させる

表1 音響インピーダンス

	ρ [$\frac{kg}{m^3}$]	c [$\frac{m}{s}$]	ρc [$\frac{kg}{m^2s}$]
water (20°C)	0.998×10^3	1480	1.48×10^6
acrylic	1.18×10^3	2720	3.20×10^6
brass	8.6×10^3	4700	4.06×10^7
aluminum	2.69×10^3	6420	1.73×10^7
SUS	7.91×10^3	5790	4.57×10^7

図9 発泡スチロールに取付けたアクリルの板厚を変えた場合

図10 発泡スチロールに取付けた厚さ0.5 mmの薄板

にはアクリルの場合 5 mm 程度の厚さが必要であると言える。

次に、この表面の材質を換えてキャビテーション強度の測定を行った。密度が大きく硬いと思われるステンレス、密度がステンレスの約 1/3 のアルミニウムの厚さ 0.5 mm の薄板を発泡スチロールの底面にはって薄板表面でのキャビテーション強度を測定した結果を図 10 に示す。図 10 中のアクリルの結果は図 9 の 0.5 mm のものであり、発振器に近いところを除いては、ほとんどの場所でキャビテーション強度は零である。ステンレスの薄板ではすべての点でキャビテーション強度が $0.1 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以上となり、大きな値を示している。ステンレスよりも密度が低いアルミニウムの薄板ではステンレスの薄板に比べかなり小さい。材質と厚さの二つの効果を調べるためにアルミニウムの板厚を変えて図 9 で示した実験と同様の実験を行った。その結果を図 11 に示す。アクリル板の場合と同様に厚くなるとキャビテーション強度は増すが、ある厚さで最大値をとる。この材質と厚さに関するすべてに実験結果をまとめるために、単位面積当たりの質量でキャビテーション強度がどのように変わるかを図 12 に示した。ここでキャビテーション強度は、それぞれの実験の平

値をとった。音響工学で音波のエネルギーが薄板をどの程度通過するかを示すときに使われるこの単位面積当たりの質量⁽¹⁴⁾ですべての結果が表される。すなわち表面の質量 W を $4 \text{ kg}/\text{m}^2$ 以上大きくすればキャビテーション強度は強くなると言える。

水より密度の小さい発泡スチロールの表面に薄い板を取付けた場合について示してきたが、密度の高いアクリルと真ちゅうに厚さ 0.5 mm の薄板を取付けて同様の実験を行った。前に示した発泡スチロールの図 10 と同じように、アクリルに取付けた場合のキャビテーション強度を図 13、真ちゅうに取付けた場合を図 14 に示す。いずれの場合も薄板の厚さが薄いので密度の高いステンレス板のキャビテーション強度がいちばん大きい。しかし、薄板の後ろの物質は図 14, 13, 10 と真ちゅう、アクリル、発泡スチロールの順に密度が低いほど大きい。これから音響インピーダンスの小さいところにある音響インピーダンスの大きい物体の表面でキャビテーション強度が強くなると言える。このため、伝熱実験で用いた発泡スチロールは断熱材としてだけではなく、伝熱面上で強いキャビテーションを得るためにも有効な材質となる。

図 11 発泡スチロールに取付けたアルミニウムの板厚を変えた場合

図 12 薄板の質量とキャビテーション強度の関係

図 13 アクリルに取付けた厚さ 0.5 mm の薄板

図 14 真ちゅうに取付けた厚さ 0.5 mm の薄板

したがって、大きなキャビテーション強度を得るためには伝熱面の密度をある程度高くし、伝熱面背後の密度より小さくすればよいと言える。

5. 結 論

超音波定在音場中の水槽内に、波長より大きな物体を入れ、物体底面でのキャビテーションの強さを実験的に調べて超音波を印加したときの熱伝達率との関係性を求め以下の結果を得た。

(1) 物体底面にはり付けた厚さ $15\ \mu\text{m}$ のアルミニウムはくの単位面積あたりの質量減少量を印加時間で割った質量減少率でキャビテーション強度が定量化できた。

(2) 波長より大きな直方体の物体底面におけるキャビテーション強度は発振器からの高さとともに周期的に変化した。物体底面の超音波印加による熱伝達率の増加量も振動面からの高さによって変化する。定在波音場の音圧の腹のキャビテーション強度が大きい部分ではこの増加量は大きくキャビテーション強度が $0.1\sim 0.7\ \text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 程度の場合熱伝達率は $2\sim 8$ 倍程度増加する。

(3) 下向き伝熱面では超音波印加によってキャビテーション強度が零でも音響流の効果により熱伝達率は約2倍増加し、さらにキャビテーションのせん孔作用のため熱伝達率が増加し、本研究で定義したキャビテーション強度が $0.7\ \text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ のとき約8倍増加し

た。

次に、伝熱面を構成する物体の密度がキャビテーション強度に与える効果を調べた結果を得た。

(4) キャビテーション強度は密度の高い物体ほど大きくなる。一方、密度の極端に小さい発泡スチロールではアルミニウムはくはせん孔されなかった。

(5) 強いキャビテーション強度を得るためには物体の表面密度(単位面積あたりの質量)を $4\ \text{kg}/\text{m}^2$ 以上大きくとる必要がある。

文 献

- (1) Larson, M. B. and London, A. L., *Am. soc. Mech. Eng.*, 62-HT-44(1962).
- (2) Hoshino, T. and Yukawa, H., *J. Chem. Eng. Jpn.*, 12(1979), 347.
- (3) 油川・斉藤・星野, 化学工学論文集, 1-3(1975), 229.
- (4) 木本・吉井, 機論, 52-475, B(1986), 1434.
- (5) 木本, 日本音響学会誌, 45-1(1989), 76.
- (6) Wong, S. W. and Chon, W. Y., *Can. J. Chem. Eng.*, 45(1967), 384.
- (7) Wong, S. W. and Chon, W. Y., *AIChE J.*, 15(1969), 281.
- (8) Bergles, A. E. and Newell, Jr., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 18(1965), 1273.
- (9) 中山・鹿野, 機論, 56-524, B(1990), 185.
- (10) 安藤・加川, 電子情報通信学会誌, A, J71-A-5(1988), 1079.
- (11) 広瀬・木本, 日本音響学会誌, 27-8(1971), 387.
- (12) 広瀬・木本, 日本音響学会誌, 28-11(1972), 587.
- (13) Keller, A., *Trans. ASME, J. Basic Eng.*, (1972), 917.
- (14) 実吉・ほか2名, 超音波技術便覧, (1985), 76, 日刊工業.
- (15) 遠藤・岡田・馬場, 機論, 34-267(1968), 1831.
- (16) 岩井・田中・岡田, 機論, 54-500, A(1988), 861.