

音響エネルギーの有効利用

愛媛大学工学部機械工学科
野村信福

1. はじめに

『音響エネルギー』という言葉はあまり聞き慣れない言葉かもしれない。音波や超音波あるいは弾性波のエネルギーを積極的に利用しようとする観点から、この言葉が使われるようになった。中四国を中心に関連する講演会や研究会が幾つか開催されてきている。

さて、音場中に置かれた物体には音響放射圧による力が作用することが知られている。近年、超音波浮揚や微小物体のマニピュレーション技術等、超音波を力として利用する研究が盛んに行われている⁽¹⁾。1992年にはスペースシャトルに円筒型超音波浮遊炉が搭載され、宇宙空間で物体を安定に保持させるためにこの放射力が利用された。

一方、液体中に超音波照射するとキャビテーション気泡（音響キャビテーション）が発生し、その気泡から発光現象が観察される。この音響発光は多泡性ソノルミネッセンス（Multibubble sonoluminescence, MBSL）⁽²⁾、単一気泡の場合は単泡性ソノルミネッセンス（Single-bubble sonoluminescence, SBSL）⁽³⁾と呼ばれている。音響キャビテーション内部の高温・高圧場を反応場として利用して、新材料の創製や有害物質を分解・無害化しようとする研究が始められている⁽⁴⁾。機械材料のキャビテーション・エロージョンなどに見られるように、音波の共振は局所的には非常に莫大な力を液体中に作用させることが可能である。

本セミナーでは、まず、私が音響エネルギーの有効利用として取り組んでいる超音波による熱流体への応用研究について紹介する。

2. 音響エネルギーの熱・流体への応用

液体中の発熱体に超音波を照射すると、この発熱体の熱伝達率は飛躍的に増加する。超音波による伝熱促進機構は音響流による流動効果と音響キャビテーションの攪拌効果であると考えられている。一口に流動や攪拌による効果と言っても、物

理現象としては幾つかの複雑な現象がからんでいる。ここで、現在までに考えられている超音波伝熱促進機構について少し説明しよう。

音響流は超音波の周波数が数 MHz 程度になると振動面から上方に流れる直進流の様式を示す（これを音響直進流と呼ぶ）が、それでも数 cm/s から 10 cm/s 程度であり⁽⁵⁾⁽⁶⁾、この流れを伝熱促進技術として使うには限界がある。それなら最初からポンプを駆動させて流れを作り、強制流動させたほうがよいという理由である。このため音響流を伝熱促進技術として応用するにはかなり特殊な環境に限られる。

一方、超音波によるキャビテーション気泡（音響キャビテーション）が発生する場合は熱伝達率が飛躍的に増加する。図1は定在波音場中に発生する流れの様子を模式的に示したものである。定在音場中には音響キャビテーションの強制渦流れ（私はこれを Cavitation bubble streaming と呼んでいる）が発生する⁽⁷⁾。メガネなどの超音波洗浄を経験したことのある人なら一度は見たことがあるだろう。水中で気泡が数珠つなぎ状に流れているように見える流れであり、超音波洗浄水槽内では容易に観察することができる。この流れは随伴流を誘起させるため、例えば LDV などで計測する

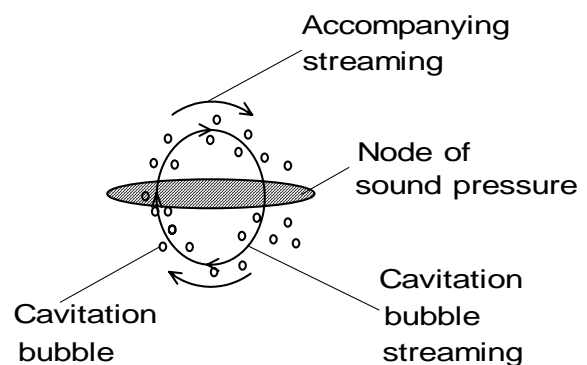


図1 定在波音場中に誘起される流れ⁽⁷⁾

場合はこの外側の随伴流の速度がデータとして現れてくる。この Cavitation bubble streaming はしばしば超音波音響流と混同されてきたが、この流れは従来型の音響流とは全く独立に存在する流れである。Cavitation bubble streaming の速度は伝熱実験の類推から、数 m/s 程度ではないかと予想されている⁽⁸⁾。気液二相流であるこの流れの速度を高精度で測定することは技術的に難しいが、予測される速度は従来型の音響流と比べてもオーダーが2桁大きく、この速い流れを自在に制御することができれば、伝熱促進技術として非常に有効な方法となるだろう。

さて、壁面近傍に球形気泡が存在するとき(図2左)壁面に近い側の流体は動きにくいので気泡壁の位置はほとんど変わらないが、反対側の気泡壁は流体が自由に動けるので、圧力振幅が加わると、上部がへこみ(図2中)、壁に向かって噴流が発生する(図3右、噴流発生は流体力学的には気液界面の不安定現象の一つである)壁面近傍のキャビテーション気泡崩壊時には 100m/s 程度の微小噴流が壁に向かって発生する(この噴流は液体マイクロジェットと呼ばれる)⁽⁹⁾。この微小噴流は伝熱面の温度境界層を攪拌し、熱伝達率を増加させる。しかし、実際の現象はもう少し複雑で、気泡崩壊時に発生する衝撃波や、この衝撃波と壁面近傍の気泡が干渉して、ウルトラジェット(音速の2倍程度)と呼ばれる噴流が発生するという説もある。当然、これらの現象が長時間持続すると、伝熱面がキャビテーションによる腐食(キャビテーション・エロージョン)をうけることになる⁽¹⁰⁾。

これまで、キャビテーションを取り扱う工学的研究の多くは、材料などの耐キャビテーション・エロージョン特性に重点が置かれており、キャビテーション自身のもつエネルギーや運動を利用しようとした研究はほとんどなかった。音波の共振

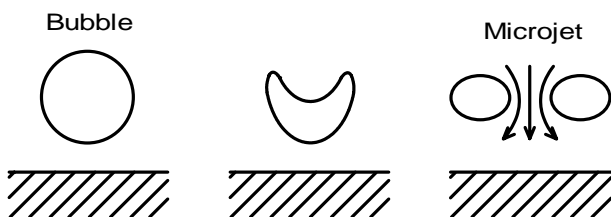


図2 キャビテーション・マイクロジェットの発生

作用を利用すれば局所的には非常に莫大な力を液体中に作用させることが可能である。超音波伝熱促進法はこのような気泡の運動や気泡崩壊時のエネルギーを積極的に利用しようとする技術であり、このように考えてみると、キャビテーション気泡の衝撃力を利用した超音波洗浄と超音波伝熱促進は全く類似の現象であると言える。

超音波伝熱促進の見方を変えると、超音波は流体自身を能動的に制御できることを示唆している。超音波エネルギーによって直接流体の大きな運動を引き起こすことは難しいが、流体の運動は境界層の剥離や乱流遷移の現象からも明らかのように、その運動の方向や形態は小さな乱れによって大きく変化させられることがある。音響キャビテーションは流体の乱流促進に利用することも可能である⁽¹¹⁾。

高性能圧電素子の開発によって超音波は簡単に取り扱うことができるようになってきた。図3は矩形流路に超音波を照射するための実験装置の写真である。超音波振動子(1本 5000 円程度以下で

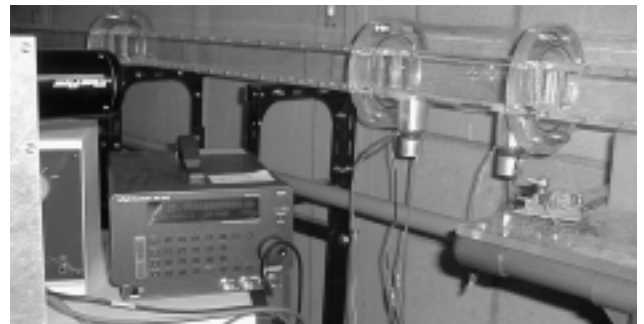


図3 矩形流路: 矩形流路は超音波振動面を除いてはアクリル製である。振動子はそれぞれ独立に動作可能であり、下部の振動面(ステンレス板)に種々の振動モードを形成させることができる。

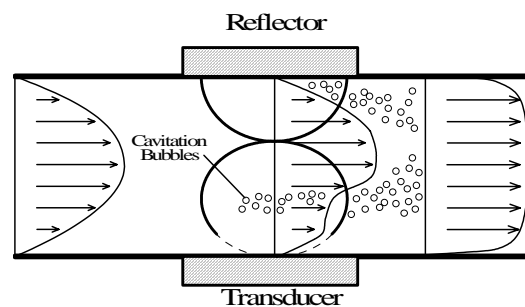


図4 超音波による乱流促進のメカニズム⁽¹¹⁾

購入できる。)は矩形流路下部のステンレス板にエポキシ樹脂系接着剤で接着されている。発振器から出力された連続正弦波をパワーアンプによって増幅し、振動子に入力すれば超音波を簡単に発生することができる。

図4は超音波照射による矩形流路内流れのメカニズムを示している。矩形流路内の流れが層流のとき、超音波を照射すると音響キャビテーション気泡が乱れ成分を増加させ、流れを層流から乱流への遷移を促進させる⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。また、定在波にトラップされるキャビテーション気泡は流体に抵抗として作用し流体速度を減速させる効果がある⁽¹³⁾。

熱や流体場に超音波エネルギーを適用する場合は音響キャビテーションを発生させることが重要である。この現象を把握し、これを如何にしてコントロールするのが今後の課題である。

3. おわりに

音響エネルギーの熱流体への応用についてのみ紹介したが、近年、音響発光現象の研究を中心として、音響キャビテーション内部の高温・高圧場の解析や応用研究が進められている。図5はルミノール反応を利用した音響化学発光の写真である。発光画像から定在波が液中に形成されている様子がわかる。MBSLでは内部の温度は瞬間的には5000K、数千気圧に達する。化学反応炉としての利用が期待されている。発光が非常に暗いので、MBSLではたびたび可視化の手段としてルミノール

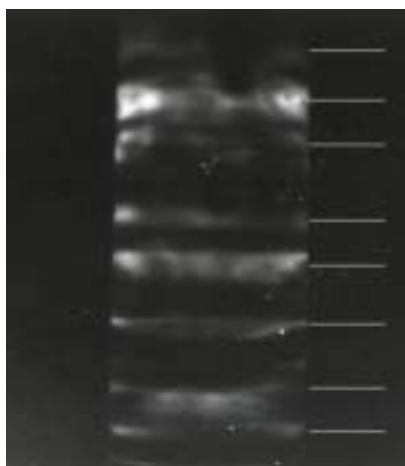


図5 ルミノール反応を利用した音響化学発光現象
超音波の周波数は46.98kHzである。定在波の音圧振幅の腹の位置で気泡が化学発光している。

ル反応が利用される。なお、SBSLでは到達温度および圧力がMBSLより1桁以上大きいので、発光強度が強く、ルミノール化学反応を使う必要なく、暗闇でその青白い光を実際に見ることが可能である。

これらの研究はキャビテーション気泡の内部現象に着目した研究であり、気泡の外部挙動に影響をうける超音波伝熱促進機構とは、気泡挙動の解明という点では類似の現象である。著者は別途、伝熱促進と洗浄の類似性から、キャビテーション気泡の運動を考波洗浄水槽の解析も実施した⁽¹⁴⁾。こう考えてくると、結局のところ、発光現象も、伝熱促進も超音波洗浄技術も、音場中での気泡の挙動の解明が必要とされていることがよくわかる。

4. 参考文献

- (1) 小特集 "力としての超音波", 音響学会誌 52-3 (1996)195.
- (2) Kyuichi Yasui, J. Chemical Physics, Vol. 115, No.7 (2001) 2893.
- (3) B.P. Barber and S.J. Putterman, Nature, 352 (1991)318.
- (4) 前田 他, 超音波 *TECHNO*, 12-5 (2000)32.
- (5) 三留秀人, 電子情報通信学会論文集, A, Vol. J80-A, No.10 (1997) 1614.
- (6) 藤井丕夫, 泉祐正, 張興, 日本音響学会論文集, 52巻, 5号 (1996)327.
- (7) S. Nomura, K. Murakami and Y. Sasaki, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.39, Part 1, No. 6A (2000)3636.
- (8) 木本日出夫, 月刊フィジクス, Vol.6, No.3, (1985)187.
- (9) 藤川重雄, 赤松映明, 日本機械学会論文集(B編), 50巻, 450号(1984)293.
- (10) 岡田庸敬, 岩井善郎, 日本機械学会誌, 第91巻, 831号(1998) 168.
- (11) 野村信福, 他 3名, 日本機械学会論文集(B編), 66巻, 643号 (2000)716.
- (12) S. Nomura, K. Murakami and M. Kawada, Jpn. J. Appl. Phys., 41-11A (2002) 6601.
- (13) S. Nomura, Y. Sasaki and K. Murakami, Jpn. J. Appl. Phys., 39-8A (2000) 4987.
- (14) S. Nomura and M. Nakagawa, Acoust. Sci. & Tech. Vol. 22, No.4 (2001)283.