超音波照射による流路内流れに関する研究*
(超音波による乱流促進)野村 信福^{*1}, 村上 幸一^{*1}
佐々木 雄一^{*2}, 徳永 賢一^{*1}Effect of Ultrasonic Vibrations on Fluid Flow in a Channel
(Turbulence Promotion by Ultrasonic Vibration)Shinfuku NOMURA^{*3}, Koichi MURAKAMI,
Yuichi SASAKI and Kenichi TOKUNAGA^{*3} Ehime University, Dept. of Mechanical Engineering,
Bunkyo-cho 3, Matsuyama Ehime, 790-8577 Japan

The flow pattern by ultrasonic vibration in a square channel was investigated as basic research into fluid control without contact. A turbulence promoter by ultrasonic vibration was proposed in this experiment. An ultrasonic transducer was fixed to the bottom of a square test channel, and a standing wave field was formed in this channel. The ultrasonic oscillators are bolted Langevin PZT-type vibrators with resonance frequencies of 25.4 kHz and 44.21 kHz and ultrasonic power varies in a range of 10 W to 80 W. The fluid velocity was measured by a Laser-Doppler velocimeter. By applying the ultrasonic vibrations into the laminar flow, the flow pattern in the channel was developed by the agitation or turbulence of cavitation bubbles, which consequently, changed from a laminar flow into a uniform flow. Since it is possible to control the fluid flow from outside due to the easy transmission of ultrasonic vibration in liquid, this technique can be applied to fluid flow in various channels as a non-contacting turbulence promoter.

Key Words: Flow Control, Ultrasonic Vibration, Turbulence, Turbulence Flow, LDV, Cavitation, Acoustic

1. はじめに

近年、超音波による非接触浮揚⁽¹⁾や微小物体のマニプレーション技術⁽²⁾の研究がさかんに行われてきている。Mandralis⁽³⁾らはチャンバ内に形成される0.7 MHzの定在波を通過させることによって懸濁中のポリスチレン微粒子の分離や回収が可能であることを報告している。超音波音場中の微粒子には音響放射圧による力が作用するため、この力を利用した計測技術や粒子の凝集・分散技術が実用化されてきている⁽⁴⁾。

一方、液体中に数十kHzの超音波を照射すると、非線形の音響工学的効果によって音響流とキャビテーション気泡が誘起される。これらの超音波の二次的効果は液中に置かれた加熱物体の熱伝達率を増加させるため、超音波を用いれば能動的な伝熱促進を行うことができる⁽⁵⁾。これは見方を変えれば、超音波を用いて流体自身の流動様式を能動的に制御できる可能性があることを示唆している。

超音波による伝熱促進は Re 数が1300~2000の範

囲で効果があることが報告されているが⁽⁶⁾、一般的に、自然対流域に近づくほど大きく、強制対流域に近づくにつれてその効果は小さくなる⁽⁷⁾。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し、流体の運動を変化させることは難しいが、流体の運動は境界層のはく離や乱流遷移の現象からも明らかなように、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。これまでに微粒子の操作や伝熱促進に超音波を用いた研究はあるものの、超音波が流れ場に対してどのような効果を与えるのかを調べた研究はない。

本研究では超音波等の音響エネルギーを利用した流体制御法の基礎研究として、超音波照射によって流体に乱れを与えて乱流促進させる方法を提案し、その効果を実験的に調べた。

記号

d : 流路の幅 m

P : 超音波出力 W

f : 周波数 kHz

r : 円管中心軸からの距離 m

Re : レイノルズ数 $= U_0 \cdot d/\nu$

U : 超音波照射時の速度 m/s

* 原稿受付 1999年4月16日。

^{*1} 正員、愛媛大学工学部 (☎ 790-8577 松山市文京町3)。

^{*2} 准員、三菱重工業(株) (☎ 750-8505 下関市彦島江の浦町6-16-1)。

E-mail: nomu@enl.ehime-u.ac.jp

$\bar{U}_{ac}$: 超音波照射区間の中央断面における音響流の
平均値 m/s

U_0 : 超音波非照射時の速度 m/s

U_m : 流路内平均流速 m/s

x : 流れ方向の座標 m

y : 流路内壁からの距離 m

ν : 動粘性係数 m^2/s

添 字

—: 流路高さ方向の平均

2. 実験装置および方法

図1に実験装置の概略を示す。実験流路として全長3300 mm, 流路幅 $d=50$ mm の正方形断面をもつ透明なアクリル製流路を使用した。流路入口から2800 mmの位置には縦50 mm×横50 mm×厚さ2 mmのステンレス板が超音波を照射するために上下に埋め込まれている。超音波振動子はエポキシ樹脂系接着剤によって下部のステンレス板に接着されている。このステンレス板を振動面として流路内に超音波が照射され、上壁のステンレス板で反射することによって定在音場が矩形流路内に形成される。本実験では公称共振周波数28 kHzと45 kHzの2種類のボルト締めランジュバン形振動子を使用した。発振器から出力された連続正弦波はパワーアンプによって増幅された後、振動子に入力されて強力な超音波を発生させる。このときの音響パワーは振動子への入力電力を測定し、これを超音波出力 P として記録した。作動流体として一般水道水を使用し、流れは流路の上流側と下流側にそれぞれ設けたタンクのヘッド差によって発生させた。流路内の流速測定にはレーザドップラー流速計(Spectra-Physics社製6 W アルゴンイオンレーザ光線, Dantec社製60 X シリーズ光学系, および57 N 20, 57 N 35 信号処理系)を使用し、トレーサ粒子として白

Fig. 1 Experimental apparatus

色ポスタカラーを採用した。流速測定点における測定体積は直径46 μm , 長さ387 μm である。各測定点において30 sに約5000個のデータがサンプリングされた。

実験は、水温 $12 \pm 2^\circ\text{C}$, レイノルズ数 $Re=1500 \sim 2500$ (流量 $8.0 \sim 1.5 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s}$), 超音波出力10~80 Wの範囲で行った。矩形流路内の振動子の中心軸上を $x=0$ mm とし、それより上流側を負, 下流側を正にとり, $-120 \text{ mm} < x < +200 \text{ mm}$ の範囲において流路中心断面における主流方向速度分布が測定された。

3. 共振周波数の選定と音響流の影響

3.1 共振曲線 図2(a)は公称共振周波数28 kHzの振動子を流路下部に取付けて、流れがないときに測定した共振曲線である。アンプの入力電圧を $0.68 V_{p-p}$ と一定にして、発振器からの連続波の周波数を変化させたときの超音波出力を測定した。入力周波数が25.4 kHzのときに出力が最大となっている。同様に図2(b)の45 kHzの場合には入力電圧を $0.53 V_{p-p}$ として測定した結果, 44.1 kHzと47.2 kHzの2箇所でピークが現れた。

図3は流れがあるときの共振周波数を調べた結果で

(a) 28 kHz

(b) 45 kHz

Fig. 2 Resonance curve

(a) 28 kHz

(b) 45 kHz

Fig. 3 Resonance frequencies for forced flow

Fig. 4 Mean acoustic streaming on the center plane of vibrating section

ある。図 3(a) の 28 kHz の振動子を用いたとき、流量を変えても共振周波数に大きな差は見られない。同様に図 3(b) の 45 kHz の場合も共振周波数はほとんど変わらなかったため、本実験範囲では 25.4 kHz と 44.1 kHz を共振周波数に選定した。この周波数で使用するれば、流路内の超音波照射区間において均一な定在波音場が形成されているものと思われる。

3.2 音響流の影響 流路内の強制流れの実験に入る前に、流路内に超音波を照射したときの超音波振動面に発生する音響流を実測した。図 4 は流れがない静止流体中で測定された音響流速の結果である。振動子面上 ($x = -25 \sim 25$ mm) の流路中心断面での音響流速が LDV によって測定された。縦軸の $\bar{U}_{ac}$ は中心断

(a) $Re = 1500$ (b) $Re = 2500$

Fig. 5 Profile of flow velocity in the channel without ultrasonic vibration

面の 168 点で測定された流速の平均値である。音響流は超音波出力が大きいくほど大きくなるが、その大きさは mm/s のオーダーであり、5~6 MHz の振動子を使ったときに発生する数 cm/s~数十 cm/s の速度をもつ音響流⁽⁸⁾⁽⁹⁾は発生していない。音響流の速度は非常に小さいので、音響流自身は流路内の実験にはほとんど影響しない。数十 kHz 程度の超音波振動は流路内に瞬時に定在波を形成してしまうために、速い直進流が発生しにくい。また、周波数の高いほうが定在波の性質が強くなるために、周波数の高い 44.1 kHz が 25.4 kHz より音響流速が小さくなっていると考えられる。

4. 正方流路内超音波照射実験

4.1 正方流路内の流れ 矩形管や円管内の定常流を記述する式(1)から式(3)、および数値解析から本実験流路内の流れ様式を調べた。

正方流路内の平均流速を u_m とすると、断面の直径が d の円管内を流れる円管内の流れは

$$u = \frac{8u_m}{d^2} \left(\frac{d^2}{4} - r^2 \right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表され、流路幅 d の平行平板間の場合は

$$u = 6u_m \frac{y}{d} \left(1 - \frac{y}{d}\right) \dots\dots\dots (2)$$

となる。また、断面の直径が d の円管内を流れる乱流速度分布は、よく知られた $1/7$ 乗則によって

$$u = \frac{60}{49} \left(\frac{d/2 - r}{d/2}\right)^{1/7} u_m \dots\dots\dots (3)$$

で近似的に表すことができる。

図5に超音波を照射しないときの振動子中心軸上における主流方向速度分布を示す。図5(a)は $Re = 1500$, (b)は $Re = 2500$ のときの実験結果である。縦軸は主流方向の速度、横軸は振動面からの距離であり、図5中の波線は式(1)から求まる円管内流れ、一点鎖線は式(2)から求まる平行平板間流れ、二点鎖線は式(3)から求まる乱流速度分布である。また、実線ははん用熱流体解析ソフト FiDAP [(株)計算力学研究センター] を使って実験流路と同じ形状を模擬して行った三次元正方流路内流れの解析結果を示している。解析では流路の対象性から4分の1を計算領域とした。主流方向を165分割、断面方向を壁に向かって間隔が密となるようにそれぞれ10分割し、全体で20086個の節点を設定して計算した。境界条件として流路入口で均一流を与えた。

$Re = 1500$ の場合、振動子中心軸上の速度分布は流

(a) $x = 0$ mm

(b) $x = 200$ mm

Fig. 6 Profile of flow velocity with ultrasonic vibration, 25.4 kHz

路中心で極大値をとる放物形となっている。また、実験結果は解析結果とよく一致しており、実験流路内の流れは十分に発達した層流となっていることがわかる。また、このとき流れは式(1)と一致している。流路入口での流速を上げて $Re = 2500$ とすると、実験結果は解析結果と合わなくなり、式(3)から求まる乱流速度分布に近い流れとなる。したがって、本実験流路では Re 数が1500以下では層流、それ以上では乱流へ遷移する流れになっている。

4.2 超音波照射による効果

図6に $Re = 1500$ のときの流路中心断面における流速分布を示す。図6(a)は振動子中心軸上 $x = 0$ mm, (b)は下流の $x = 200$ mm での測定結果である。横軸は振動面からの距離、縦軸は主流方向の流速を表している。図6中の○印は超音波を照射しない場合、●印は周波数25.4 kHz, 出力50 Wの超音波を照射した場合の結果である。超音波を照射すると、 $x = 0$ mm では振動面から10~20 mmの区間において流速分布が大きく変化しているのがわかる。また、このとき振動面上に無数のキャビテーション気泡が確認された。

照射区間を通過した下流 $x = 200$ mm の位置では壁近傍の速度こう配が急となり、15 mm から30 mm では速度分布が放物形ではなくなっている。さらに出力を80 Wに上げた場合の△印では、流路内全域でほぼ均一流が得られている。超音波によって流体の乱れ成分が増大し、層流から乱流への遷移が促進されている。超音波は乱流促進体としての効果がある。

図7は Re 数=2500の場合である。振動面から15~20 mmの位置で局所的に流速が低下しているが、流路幅の4倍程度の下流では超音波による乱れの効果が $Re = 1500$ のときほど大きくない。 Re 数が増加すると超音波の影響は小さくなっているため、この乱流促進現象は流れが遅い層流のときに顕著に現れる。超音波は外部から電気的な方法で照射できるので、種々の流路で乱流促進体として応用することが可能であ

Fig. 7 Profile of flow velocity, $Re = 2500$

Fig. 8 Profile of flow velocity, 44.1 kHz

る。

図8は44.1 kHzの超音波を照射した場合の結果であり、 $x=200$ mmの位置で測定された超音波照射前後の速度分布がプロットされている。44.1 kHzの場合は5 mmから45 mmにわたって超音波の効果が現れている。超音波出力が同じなら、周波数が低い場合は局所的に大きな乱れが、周波数が高い場合は流路内の広い範囲に小さな乱れが与えられる。

4.3 メカニズム 一連の結果から超音波照射による効果について考察する。定在波音場では音圧振幅の腹の部分で激しくキャビテーション気泡が発生・消滅を繰り返す。静止流体中では密度の軽い気泡は音響放射力によって音圧振幅の腹にトラップされる。図9(a)のように層流が通過すると壁から主流への速度こう配が定在波の全域にわたって存在するため、気泡が下流側へ流される。この気泡の発生・消滅によって誘起される乱れと、この気泡自身が流されることによる流体のかくはん効果によって乱れ成分が増大し、下流域において均一流が得られる。また、周波数が高い図9(b)では音圧の腹の数が多くなるので、乱れが与えられる場所が多くなる。

5. あとがき

正方流路内に出力10~80 W、周波数25.4 kHzと44.1 kHzの2種類の超音波を照射し、そのときの流れのようすを調べた。その結果、流路内の層流に超音波を照射することによって発生するキャビテーション

Fig. 9 Mechanism of flow velocity by ultrasonics

気泡が乱れ成分を増加させ、層流から乱流への遷移を促進させることが明らかになった。超音波は流体に非接触な乱流促進体として利用できる。

本研究によって低周波数の超音波振動が流れ場に大きな影響を与えることが示された。本手法は超音波エネルギーによる流体制御法として幅広い分野への応用が期待できる。

文 献

- (1) 羽田野甫・ほか3名, 日本音響学会誌, **47**-1 (1991), 40-47.
- (2) 小塚晃透・ほか3名, 機論, **63**-608, C (1997), 1279-1286.
- (3) Mandrails, Z., ほか4名, *Ultrasonics*, **32**-2 (1994), 113-121.
- (4) 小特集 力としての超音波, 日本音響学会誌, **52**-3 (1996), 195-209.
- (5) 野村信福・ほか3名, 機論, **64**-622, B (1998), 1832-1838.
- (6) 油川博・ほか3名, 山形大学紀要(工学), **10**-2 (1969), 175-183.
- (7) NOMURA, S. and NAKAGAWA, M., *Proc. 4th ASME/JSME Thermal Eng. Joint Conf.*, **4** (1995), 275-282.
- (8) 三留秀人, 電子情報通信学会誌, A, **J80**-A-10 (1997), 1614-1620.
- (9) 藤井丕夫・泉祐正・張興, 日本音響学会論文集, **52**-5 (1996), 327-332.