音波による2次元水噴流の挙動[†]

—速度分布に及ぼす影響—

木村一郎*・米持政忠*

Behaviour of Two-Dimensional Water Jets Sensitive to Sound

—Effects of Applied Sound on Velocity Profiles—

Ichiro KIMURA* and Masatada YONEMOCHI*

The effects of sound on air jets have been studied by many researchers, but the behaviour of two-dimensional water jets sensitive to sound, which is especially important for the application of fluidics in oceanography, has not yet been clarified.

In this study, the authors investigated experimentally the fundamental behaviour of a two-dimensional water jet affected by sound, to find out the exact jet-sound relationships. The jet profile variables including the centerline velocity, the jet width, and the velocity distribution of the jet were measured with a hot film anemometer. Especially, the tendency of the velocity distribution of the jet was compared with Görtler's model.

The following facts were confirmed:

- 1) A water jet becomes sound-sensitive when both its Reynolds number and the frequency of sound are within some bounds.
- 2) When a sound of certain frequency is applied, the jet centerline velocity increases but the velocity in the outer shear layer decreases. In this case, a sound-sensitive jet has a responsive frequency bandwidth involving the maximum value of centerline velocities which shifts towards a higher frequency with an increase in the Reynolds number.
- 3) The tendency of the spread parameter shows that such changes in the velocity profile with the application of sound are related to the abrupt spreading of the jet following the transition from a laminar domain to a turbulent domain.

1. ま え が き

音波による自由噴流の挙動は、ノズル形状や流れの状態などの条件とそれに対応する音波の条件により異なる。したがって、噴流を音波によって効果的に制御するためには、その目的に対応した最適な条件を選定することが必要である。

計測制御系では、特にフルイディクスに関連した応用が注目され、すでに空気噴流を対象に乱流遷移素子の超音波制御方式¹⁾とデジタル素子への応用例²⁾がある。しかし、空気中の音波に比較して水中での音波の減衰は、きわめて小さく、しかも電磁波に比べても減衰が少ないという利点を考慮すると、水中における水噴流の挙動を明確にすることは、最近注目されている海洋開発関連技術への応用面からみても、きわめて重要な意味をもつものと考えられる。

このような立場からの研究は、空気噴流の場合に比較して、きわめて少ない。Chanaud ら³⁾は、その影響をレイノルズ数とストローハル数の関係において、実験的に考察した。しかし、その周波数範囲が数 Hz の低周波域に限定されているため、音波による水噴流の挙動を理解するには不十分であり、適用性に乏しい。

本研究では、2次元水噴流を対象に音波周波数に依存する噴流の挙動、ならびに音波による速度分布と噴流幅の流れ方向の変化について実験的に検討し、特に速度分布については、Görtler の噴流モデルと比較検討し、噴流の拡散係数の変化について考察することにより、音波による水噴流の挙動の基本的感応特性を明らかにした。

2. 実験装置および方法

Fig. 1 に実験装置の概要を、Fig. 2 に供試ノズルの形状を示す。供試ノズルは水そう (720×1000×510 mm³) 内に設け、 $L_1=730$ mm, $L_2=300$ mm の板で

† 第11回フルイディクスシンポジウムで発表 (昭51・10)

* 神戸大学工学部 神戸市灘区六甲台町1

* Faculty of Engineering, Kobe University, Kobe
(Received May 30, 1977)

Fig. 1 Schematic of test section and measuring system

Fig. 2 Configuration of nozzle

上下拘束されている。ノズル幅 W は 1 mm でアスペクト比 AR は 35 と 70 の 2 種類である。なお、ノズル出口での乱れを低く抑えるためノズル平行部の長さを 190 mm とし、ノズル中心軸から水面までの距離は 220 mm とした。水中スピーカーは図示のように、噴流に対し音波が垂直に作用し、しかもその中心がノズル出口に向くように設定した。なお、このスピーカーの最大出力の音圧レベル (SPL) は実測周波数範囲 (200~2,000 Hz) 内で 130 dB 以上であった。

音圧は図示のように、ノズル出口付近の一定位置 (上側拘束板の上方) に設けた水中マイクロホン (ハイドロホン) (注1) により測定した。なお、この設定位置

(注1) 測定可能周波数範囲 1 Hz~125 kHz

Fig. 3 Tendency of jet centerline velocity against Reynolds number

と流れのない状態でのノズル出口付近の位置 (ノズル中心軸上) との SPL の差は、実測周波数範囲内で 1 dB 以内であった。

流速の検出には X, Y 方向に移動可能なホットフィルムを用い、噴流中心流速 U_c 、噴流幅 $2b$ 、ならびに速度分布を測定した。なお b は噴流の中心線から Y 方向に中心流速の 10% の流速となる点までの距離とした。

この実験におけるレイノルズ数 Re の範囲はノズル幅 W を代表長さとして、ほぼ 600~2,000 とし、 $Re \approx 200 \sim 600$ の範囲では噴流は音波の影響をほとんど受けないことを確認した。

Fig. 3 はノズル出口近傍 ($X/W=2$) での Re に対する U_c の傾向を示す。ここで U_{cn} は $Re=2,078$ の場合の中心流速である。層流から乱流への遷移は $Re=1,400 \sim 1,500$ 付近で起こることがわかる。

3. 実験結果および考察

3.1 噴流中心流速

Fig. 4 は音波周波数 f_s に対する噴流中心流速 U_c/U_{cn} の傾向を示す。ここに U_{cn} は音波を作用させない状態での中心流速である。またパラメータとしての Re は音波の影響の特に顕著な範囲内のものを例示した。この範囲は Fig. 3 で示したようにノズル出口近傍で層流から乱流への遷移状態、あるいはそれに近い層流の状態、噴流としては不安定な状態にある。これらの傾向から特に注目すべきことは、 $U_c/U_{cn} > 1$ の領域が存在

Fig. 4 (a), (b), (c) Effects of applied sound on jet centerline velocity

Photo. 1
Jet patterns
affected by
sound

することである。すなわち、音波の作用により中心流速が増加する。これは空気噴流の場合も含めて従来の研究^{4)~7)}では、みられなかった現象である。しかも図(a)に示すように、いずれの場合も、そのピークは R_e の増加に対し高周波側に移動している。一般に、噴流の流速乱れ成分のピーク周波数はノズル出口平均流速の増加に伴い大きくなる⁸⁾。それゆえ、前報⁴⁾のカルマン渦発生法により噴流に特定の周波数の乱れを与えた場合の音波周波数との対応関係と同様、この現象が噴流のもつ乱れの周波数成分と音波との相互作用に起因するものであると推定できる。**Photo. 1**は水性インクを用いた可視化により、 $R_e=1,246$ における噴流パターンの音波による影響を示したものである。音波が作用した場合、遷移点は上流に移行するにもかかわらず、噴流の拡がりがおさえられている。この現象は中心流速が増加することを裏付けている。また音波の作用により中心流速が減少する領域も存在し、その周波数領域は低周波域に限られている。

図(b)は流れ方向の各位置での音波の影響の違いを示す。この噴流は Fig. 3 ならびに Photo. 1 で示したように、ノズル出口近傍では層流あるいは遷移状態の噴流であり、流れ方向のある点(遷移点)で急激に拡がり完全に乱れた乱流噴流に移行する。音波の影響は $X/W=3$ ではほとんどみられず、 $X/W=10$ (音波を作用させない状態での遷移点付近)で最も顕著となり、 $X/W=18$ では小さくなる。すなわち、乱流噴流領域での影響は遷移点付近で受けた影響が減衰したものと考えられるので、音波の影響が特に顕著に現われるのは、遷移点付近であるといえる。

3.2 噴流幅

前節の傾向をより明確にするため、Fig. 5 に音波の作用による噴流幅 b/W の流れ方向への変化を示す。図(a)で明らかなように $R_e=623$ では、ほとん

Fig. 5 (a), (b), (c) Jet width affected by sound

ど音波の影響はみられない。図(b) ($R_e=1,246$) では、音波を作用させない場合と比較して、 $f_s=400$ Hz では $X/W \leq 8$ でわずかに噴流幅は拡がるが、逆に $X/W \geq 10$ ではせばまる。すなわち Photo. 1 においても明らかであるが、音波の作用により遷移点は上流に移行するにもかかわらず、下流では噴流の拡がりか緩やかとなることを示している。これは前節の中心流速の増加を裏付けている。これに対し $f_s=250$ Hz で

Fig. 6 (a), (b), (c) Jet velocity distributions affected by sound

は音波の作用により、噴流は乱され遷移点は上流に移行し、しかも噴流幅は流れ方向に急激に広がる。しかし $f_s=1,000\text{ Hz}$ では大きな変化はみられない。図(c) ($Re=2,078$) では、わずかに変化がみられるが図(b)と比較すると、その変化は小さく、高レイノルズ数になると音波に対する噴流の反応は鈍くなる。

3.3 速度分布

(1) 流れ方向における変化

Fig. 6 は音波の作用による噴流内の速度分布の変化を示す。ここで U_{co} はノズル出口での噴流中心流速である。図(a)は音波により中心流速が減少する場合で、その速度分布は上流 ($X/W=3$) ではほとんど変化しないが、遷移点付近 ($X/W=10$) では音波による噴流内の拡散作用により、一様な分布に近づき、さらに下流 ($X/W=18$) でも、その影響が残っている。図(b)

Fig. 7 Schematic representation of jet

は音波により中心流速が増加する場合で、上流 ($X/W=8$) では、中心流速がわずかに減少しているが、下流 ($X/W=15$) では逆に中心流速は増加し、鋭い形状の速度分布となる。これは Fig. 5(b), Photo. 1 の結果と比較してみると明らかである。図(c)も同様で、その速度分布は上流 ($X/W=3$) では、ほとんど変化しないが、遷移点付近 ($X/W=10$) で拡散作用が抑えられ、より鋭い分布に近づき、さらに下流 ($X/W=18$) になると、ほとんど影響がみられない。

(2) 噴流モデルとの比較

前項までの結果をもとに推定された近似的な噴流パターンを Fig. 7 に示す。噴流はノズル出口から流れ方向の遷移点までは、ほぼ層流状態であり、その後急激に拡がり完全に乱れた乱流噴流へと移行する。遷移点にいたるまでの噴流は、ほとんど拡散せず、かつ音波による影響も小さい。これに対し、特に中心流速が増加する場合の音波の影響が顕著な領域は遷移点付近、あるいは、その下流の乱流噴流領域である。そこで乱流噴流モデルと比較し、この噴流の速度分布に関する相似性について検討する。

乱流噴流モデルは、これまでに数多く提案されている⁹⁾が、ここでは一般的に利用されている Görtler のモデル¹⁰⁾を用いる。しかし、このモデルはノズル幅零で出口流速無限大の場合に相当するものであるのに対し、本実験におけるノズル幅、ノズル出口流速は有限で、しかもノズル出口近傍では乱流噴流ではない。そこで従来の場合⁹⁾ (ノズル出口速度分布が一様な乱流噴流) と異なり、仮想原点の位置を図示のように、ノズル出口より下流に考える。

したがって、Görtler の式をつぎのように表す。

$$U = U_c \operatorname{sech}^2 \left(\frac{\sigma Y}{X - X_0} \right) \quad (1)$$

Fig. 8 (a), (b) Comparison of experimental velocity distributions with fitted Görtler

ここに、 σ : 拡散係数、 X_0 : ノズル出口から仮想原点までの距離。

Fig. 8 は Görtler の速度分布モデルと本実験の実測結果との比較を示す。横軸は Y を半値幅 $b_{1/2}$ で無次元化し、 $b_{1/2}$ は両側 (Y 軸の正負) の平均値をとった。図(a)は音波を作用させない場合で、Görtler の速度分布モデルとよく一致している。図(b)は音波を作用させた場合で、わずかに速度分布がひずんでいるが、ほぼ相似な速度分布であると考えられる。

3.4 拡散係数

速度分布から噴流の拡散状態を表す因子である拡散係数 σ を算出するには、(1)式から明らかに、 X_0 を決定しなければならない。しかし、 X_0 は流れの状態やノズル形状などで異なる。(1)式より、半値幅は

$$b_{1/2} = \frac{\text{sech}^{-1} \sqrt{\frac{1}{2}}}{\sigma} \cdot (X - X_0) \quad (2)$$

の関係となるので、音波の影響が微小となり、しかも $b_{1/2}$ と X とが比例する領域 $X/W \geq 13$ ($AR=35$ の場

Fig. 9 Spread parameter affected by sound

合)での直線関係を X 軸まで延長し、その交点から X_0 を求めた。

Fig. 9 は音波による σ の流れ方向への変化を示す。ここで X_0 の値は音波の影響の小さい領域から求めたもので、音波の作用にかかわらず、ほぼ一定である。音波を作用させない場合の σ の傾向は $X/W \leq 9$ において徐々に増加するが、 $X/W=10$ 付近で一時急激に減少した後、再び増加し、 $X/W \geq 13$ ではほぼ一定 ($\sigma \approx 2.9$) となる。 $X/W=10$ 付近での急激な σ の減少は層流噴流から乱流噴流への移行に伴う激しい拡散作用によるものであると考えられる。これに対し、 $f_s=200$ Hz では音波による噴流内の拡散作用のため、一般に σ は小さい値をとり、流れ方向に徐々に増加し、 $X/W \geq 13$ ではほぼ一定 ($\sigma \approx 2.7$) となる。また音波の影響が特に顕著に現れるのは、遷移点のすぐ上流である。 $f_s=450$ Hz では、音波を作用させない場合のような σ の急激な変化はなく、流れ方向へ単調に増加し、 $X/W \leq 9$ において σ は音波の作用により、小さな値をとるが、 $X/W \geq 10$ では、逆に大きくなり $X/W \geq 11$ で一定値 ($\sigma \approx 3.0$) をとる。すなわち、特定の周波数の音波に対し、噴流は音波を作用させない場合よりも連続的に、しかも緩やかに拡がるため、遷移点のすぐ下流付近で中心流速の増加という現象がみられる。

本実験でえられた σ の値を従来の研究結果と比較してみると、たとえば、木下ら¹¹⁾の拘束水噴流 ($Re \approx 6.3 \times 10^4$) における $\sigma \approx 8.2$ 、また Reichardt の $\sigma \approx 7.67^{10)}$ などで、本実験でえられた値はかなり小さい。これは、層流から乱流へ遷移する噴流の拡散作用が非常に大きなものであることを示している。

4. あとがき

音波による2次元水噴流の挙動に関して、特に速度分布を対象にとり、その基本的現象について検討した結果を要約するとつぎのようになる。

1) 音波による噴流の挙動はレイノルズ数と音波周波数に依存し、しかも音波の作用により噴流中心流速

が増加する場合と、逆に減少する場合の2通りの現象の存在を実証した。

2) 流れ方向の噴流幅、速度分布に対する音波の影響を明らかにした。

3) Görtler のモデルと比較することにより、音波の作用による噴流の速度分布はわずかにひずむが、ほぼ相似性を保つことを示した。また流れ方向の拡散係数で整理することにより、特に音波による速度分布の変化は、層流噴流から乱流噴流への移行に伴う激しい拡散作用に関係することを実証した。

さらに今後、ノズル形状などの幾何学的条件による影響、ならびに付着噴流に対する音波の影響について検討する必要があると考えられる。

終りにあたり、本研究に協力された野中公男、横部祐二、片山光庸、長峯卓、伊丹博の諸君に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) B.B. Beeken: An Acoustic Fluidic Sensor for Use in Industrial Applications, *Fluidics Quarterly*, 2-3, 53/62 (1970)
- 2) R.N. Gotttron: Acoustic Control of Pneumatic Digital Amplifiers, *Proc. of the Fluid Amplification Symposium*, 1-2, 280/292 (1964)
- 3) R.C. Chanaud and A. Powell: Experiments Concerning the Sound-Sensitive Jet, *J. Acoust. Soc. Am.*, 34-7, 907/915 (1962)
- 4) 木村, 米持, 野中: 二次元噴流におよぼす音波の影響について, 第10回フルイディクスシンポジウム講演論文集, 11/16 (1975)
- 5) H. Sato: The Stability and Transition of a Two-Dimensional Jet, *J. Fluid. Mech.*, 7-1, 53/84 (1959)
- 6) G.L. Roffman and K. Toda: A Discussion of the Effects of Sound on Jets and Fluoric Devices, *Trans. ASME, Ser. B*, 91-4, 1161/1167 (1969)
- 7) D.O. Rockwell and K. Toda: Effects of Applied Acoustic Fields on Attached Jet Flows, *Trans. ASME, Ser. D*, 93-1, 63/73 (1971)
- 8) 米持, 木村: 純流体素子構成に基づくノイズの研究, 計測自動制御学会論文集, 11-5, 515/520 (1975)
- 9) たとえば, 原田, 尾崎: 流子工学, 72, 養賢堂 (1969)
- 10) H. Schlichting: *Boundary Layer Theory*, 605, McGraw-Hill (1955)
- 11) 木下, 大島: 水噴流の側壁付着現象, 計測自動制御学会論文集, 10-5, 611/616 (1974)