音波による付着水噴流の挙動[†]

——曲線側壁の場合——

木 村 一 郎*・米 持 政 忠*

Behaviour of Attached Water Jets Sensitive to Sound

——In the Case of Using a Curved Wall——

Ichiro KIMURA* and Masatada YONEMOCHI*

It is necessary to know the conditions in which sound affects an attached water jet and clarify these phenomena for practical application of acoustically controlled fluidic devices in oceanographic developments.

In the present paper, the effects of applied sound on the attachment of water jets to a curved wall are experimentally investigated from the changes of the deflection angle of jets and jet centerline on the basis of the fundamental characteristics of two-dimensional water jets sensitive to sound. In addition, the transient response of the test device with a receiver located in the jets is examined by using sound as a control input in order to discuss the possibility of applying the phenomena of the attached jets to fluidics. And the attachment phenomena of water jets affected by sound are considered from the statistical inference of the response time.

As a result, the following facts are especially confirmed:

- 1) Three different phenomena of wall attachment of a water jet sensitive to sound are fundamentally recognized. It is especially worth noting among them that an attached jet separates from the wall by sound and changes into a separated jet.
- 2) The dynamic behaviours of an attached water jet affected by sound are related to the formation of low pressure bubble region, the irregularity of fluctuations in the jets, and the stability of attachment.

1. ま え が き

音波による2次元水噴流の挙動については、すでに

速度分布に及ぼす影響¹⁾、音波感応域における考察²⁾、および流速乱れの挙動に基づく考察³⁾からその基本的現象を明らかにし、音波による水噴流制御の可能性を実証した。しかしこの現象の実用化をはかるためには、さらに音波による付着噴流の挙動を明確にすることが必要である。

従来、この種の系統だった研究は空気噴流を含めてもきわめて少ない。このうち Rockwell ら⁴⁾は空気噴流を対象に曲線側壁への付着現象に及ぼす音波の影響を四つのレイノルズ数領域に分けて実験的に考察した。その主な挙動は噴流が音波によって乱され側壁へ付着する場合に限定される。しかしすでに報告^{1)~3)}したように、音波によって乱れを抑え噴流中心流速を増加させる現象を考慮すると、逆に音波によって噴流を側壁から完全に剥離させることも可能であることが推察できる。

そこで本報告では、曲線側壁を対象にとり音波による噴流の側壁付着現象を噴流偏向角および噴流中心線の変化として実験的に捉え、その基本的挙動を明らかにし音波による付着噴流制御が十分可能であることを実証した。

また、この現象をフルイディクス素子として利用することの可能性を検討するため、噴流の流れの場に受流口を設定し音波に対するこの構成要素の過渡応答を実験的に調べた。そして特にその応答時間の統計的推測から考察した結果、音波による付着噴流の動的挙動は低圧渦領域の形成、噴流内の乱れの不規則性および付着状態の安定性に関係することを指摘した。

2. 実験装置および方法

実験装置の基本的構成は既報¹⁾と同じであるが、付着噴流の挙動を検討するために、ここでは **Fig. 1** に示すような曲線側壁を設けた。供試ノズルは前報³⁾と同様である。曲線側壁の半径 R は Rockwell ら⁴⁾の研

[†] 第14回フルイディクスシンポジウムで発表(昭54・10)

* 神戸大学工学部 神戸市灘区六甲台町 1-1

* Faculty of Engineering, Kobe University, Kobe
(Received June 1, 1981)

Fig. 1 Configuration of test element

Fig. 2 Sensitive regions of jets for applied sound

究結果を参考にして $R=9.5\text{ W}$ とした.

実験はノズル出口から側壁までの X 方向の距離 W とオフセット D をパラメータにとり、噴流偏向角 θ (注 1) および噴流中心線をホットフィルム流速計により求めた。また噴流の挙動を水性インクを用いて可視化した。

つぎに音波信号を流体信号に変換するために Fig. 1 の 1 点鎖線に示す X, Y 方向に移動可能な受流口部を噴流の流れの場に設けた。この受流口位置は図示のように点 (X_r, Y_r) で表わす。受流口幅は 5 mm (注 2) で、出力負荷状態は閉鎖の場合を取り扱う。

(注 1) θ は $X=W_c+6W$ の位置での Y 方向の最大流速点と $X=W_c, Y=0$ の点を結ぶ直線と X 軸とのなす角として定義する。

(注 2) 受流口幅は 1, 3, 5, 7, 10, 15 mm の幅で予備実験を行い, 安定性, 出力圧を考慮し決定した.

過渡応答を調べるため音波信号はゲート信号が正の期間だけ発生するよう制御された。それに対応する受流口の出力圧信号は半導体圧力変換器で検出され、その応答波形の記録にはペン書きオシログラフを用いた。

Fig. 2 は音波周波数 f とノズル出口平均流速 U_0 に基づく供試ノズルの音波感応域²⁾である。図中の実線内領域（音波の作用により中心流速が増加）および点線内領域（中心流速が減少）はいずれも音波の作用により中心流速が 5% 以上変化する領域である。

実験条件としては図中の2点鎖線で示すように、受流口部のない場合には $U_0=0.95 \text{ m/s}$, $f_s=270 \text{ Hz}$ (図中のa点) および $f_s=200 \text{ Hz}$ (b点), 受流口部のある場合には $U_0=1.07 \text{ m/s}$, $f_s=300 \text{ Hz}$ (c点) および $f_s=180 \text{ Hz}$ (d点) を選択した(注3)。

3. 実験結果および考察

3.1 ノズル側壁構成条件による影響

Fig. 3 は音波の作用によるノズル側壁構成条件に対する噴流偏向角 θ の変化を示す。図(a) ($W_c/W=0$) の場合、 D/W が小さい条件では噴流は側壁に付着した状態で、ある偏向角をもつが、 D/W がある値を越えると側壁から完全に剝離した非付着流 ($\theta=0$) となる。図から $f_s=270$ Hz では音波の影響はみられないが、 $f_s=200$ Hz の音波の作用により $0.4 < D/W < 0.9$ の範囲で噴流は側壁へ付着することがわかる。

図(b) ($W_c/W=4.0$) の場合、 D/W に対する θ の傾向は図(a)と同様であるが、 $0.4 < D/W < 0.9$ では $f_s=270$ Hz, $0.4 < D/W < 1.2$ では $f_s=200$ Hz の音波の作用により噴流は側壁へ付着する。 $f_s=270$ Hz の場合、噴流は音波の作用により乱れが抑えられ中心流速が増加するので常識的には噴流は付着しないと考えられる。しかし既報¹⁾で示したように、中心流速が増加する場合でも遷移点のすぐ上流で、いったん噴流幅は音波を作用させない場合に比較して広がり、遷移点の下流では逆にせままる。したがって側壁が遷移点のすぐ上流に位置する場合には、中心流速が増加する音波周波数でも付着するものと考えられる。

図(c) ($W_c/W=7.0$) の場合には, θ の急激な変化はなく D/W がある値以上になると徐々に $\theta=0$ に近づく. ここで特に注目されるのは, $D/W=1.3$ 付近の構成条件で $f_s=270$ Hz の音波の作用により, 噴流が側壁から完全に剝離し非付着流になることである.

(注 3) いずれの条件も付着噴流の変化に及ぼす影響が顕著な場合であるが、一般に流速が大きくなると影響が現れにくい傾向がある。

Fig. 3 Deflection angle of jets affected by sound

る。これは音波の作用により噴流の乱れが抑えられるため、従来の研究⁴⁾ではみられなかった現象であるが、既報^{1)~3)}で得られた噴流の特性から予想された結果である。また $f_s=200$ Hz の場合、 $D/W=1.6$ 付近で音波の作用により噴流は乱され側壁へ付着する。

3.2 噴流中心線および噴流パターン

3章1節の結果をもとにノズル-側壁構成条件を一定にとった場合における音波の作用による噴流中心線の変化例を Fig. 4 に、その噴流パターンを Photo. 1 に示す。ここで、図の(a), (b), (c)はそれぞれ Photo. 1 の(a), (b), (c)に対応する。

図(a) ($W_c/W=0$, $D/W=0.6$)では、(1)音波を作用させない場合、噴流は非付着の状態にある。(2) $f_s=200$ Hz の音波を作用させると噴流は乱されて側壁へ付着する。(3)音波を取り去っても噴流は付着の状態を保つ。これは音波の作用により、安定な状態へ移行したためであろう。

図(b) ($W_c/W=4.0$, $D/W=1.0$)では、(1)音波を作用させない場合、噴流は非付着流である。(2) $f_s=200$ Hz の音波の作用により噴流は側壁へ付着す

Fig. 4 Effects of applied sound on attached jet centerline

Photo. 1 Attached jet patterns affected by sound

る。(3)音波を取り去ると、図(a)の場合と異なり、噴流は側壁から剝離し非付着流に戻る。図(a)の場合は $W_c/W=0$ であるから、まき込まれる流体の場が制限を受け低圧渦領域が存在するので、付着は安定で元の状態へ戻らない。しかし図(b)では $W_c/W \neq 0$ で、まき込まれる流体の場が制限を受けないので、特に D/W の大きな範囲 ($0.8 < D/W < 1.2$) での付着の状態は図(a)の場合ほど安定でないため音波を取り去ると、もとの状態へ戻るものと考えられる。

図(c) ($W_c/W=7.0$, $D/W=1.3$)では、(1)音波を作用させない場合、噴流は側壁へ付着している。(2) $f_s=270$ Hz の音波の作用により噴流は乱れが抑えられ、側壁から剝離し非付着流になる。(3)音波を

Fig. 5 Tendency of jet deflection angle versus average velocity at the nozzle exit

Photo. 2 Attached jet patterns affected by sound

取り去ると噴流は再び側壁へ付着する。

以上のように、音波による付着噴流の挙動には構成ならびに音波の条件により三つの異なる基本的現象が存在する。これは音波によって切り換えが可能なデジタル素子の実用化の可能性を示している。

Fig. 4 のノズル側壁構成条件での流動状態から上述の三つの現象の相異を検討するため、Fig. 5 にノズル出口平均流速 U_0 の連続的変化に対する噴流偏向角 θ の傾向を示す。図の(a), (b), (c)の構成条件は、それぞれ Fig. 4 の(a), (b), (c)に対応する。図(a)では、 U_0 を連続的に増加すると $U_0 \approx 0.97 \text{ m/s}$ で噴流は側壁に付着し、逆に U_0 を連続的に減少すると付着状態を保っていた噴流は $U_0 \approx 0.60 \text{ m/s}$ でついに剝離し非付着流になる。この付着のヒステリシス特性から、本実験での流速条件 ($U_0 = 0.95 \text{ m/s}$) では、噴流は付着、非付着の二つの安定な状態を維持しうることが明らかであり、これは Fig. 4(a)の噴流の挙動を裏付けている。

図(b)では、(a)のようなヒステリシスが存在しないため、音波を取り去ると噴流は付着の状態を維持できなくなり剝離して非付着流に戻る (Fig. 4(b))。

図(c)では、(a), (b)とは異なり、 U_0 の変化に伴い θ は連続的に変化する。すなわち付着と非付着の明確な二つの状態だけでなく、その間に位置する偏向の

状態が存在する。したがって流動状態の微小な変化で噴流偏向角は変化すると考えられ、Fig. 4(c)に示すように、乱れを抑え中心流速を増加させる音波の作用により、付着流 ($U_0 = 0.95 \text{ m/s}$) は側壁から剝離し非付着流になる。

Photo. 2 は音波周波数の違いによりまったく逆の噴流挙動がみられる構成条件 ($W_c/W = 7.0$, $D/W = 1.5$) での噴流パターン例を示す。(1)音波を作用させない場合、噴流は偏向状態にある。(2) $f_s = 200 \text{ Hz}$ の音波の作用により噴流は側壁へ付着する。(3)この音波を取り去ると噴流は偏向状態へ戻る。(4) $f_s = 270 \text{ Hz}$ の音波を作用すると噴流は完全に剝離し非付着流となる。(5)この音波を取り去ると噴流は再び偏向状態へ戻る。以上のように、この構成条件では音波周波数により噴流を三つの状態に制御可能であることを示しており、これは注目すべき現象であると考えられる。

3.3 応答時間の統計的推測からの考察

ここでは受流口部を設定し、音波信号を流体圧力信号に有効に変換できる素子の可能性を確めると共に、その応答時間の統計的推測から 3 章 2 節で明らかにした音波による噴流の挙動の基本的 3 現象を比較考察する。

Fig. 6 は出力圧の応答波形例を示す。ここで応答波形(a), (b), (c)は、実験条件は異なるが、それぞれ Fig. 4 (a), (b), (c)の 3 現象に対応する。なお受流口位置 (X_r/W , Y_r/W) は噴流の安定性と出力圧の大きさを考慮し、(a), (b)の条件では (23, 0), (c)の条件では (40, 2) としたので、付着流では出力圧は 0 で、非付着流で出力圧が現れる。

図(a)では、音波信号が入ると出力圧は減少し 0 に近づき、音波信号を切っても出力圧は 0 を維持する。これに対し図(b)では、音波信号を切ると再び出力圧が上昇し出力信号が現れる。図(c)では、(a), (b)とは逆に、音波信号が入ると出力信号が現れ、音波信号を切ると出力信号がなくなる。このように音波の有無を 3 通りの流体圧力信号に変換できることが示された。

さて、これらの応答時間は噴流自体の不規則な乱れおよび噴流と構成要素の干渉などの影響のため不確定的であり、統計的検討が必要である。そこで各実験条

Fig. 6 Output traces of transient response to input sound signals

Fig. 7 Histogram of response time

件で 30 回の実験を繰り返し、それらの実測データに確率モデルをあてはめ、統計的推測を行う。

Fig. 7 は応答時間のヒストグラムの一例を示す。このように実測データのヒストグラムは対称な釣鐘型の分布よりも、図のようなひずんだ分布が多い。そこでこの確率モデルとしては、解析的に取り扱いやすく、ひずんだ分布にもよくあてはまるという理由から、ワイブル分布⁵⁾を選択した。

この確率密度関数はつぎのように表わされる。

$$f(x) = \begin{cases} \frac{m}{\alpha} (x-\gamma)^{m-1} \exp \left\{ -\frac{(x-\gamma)^m}{\alpha} \right\}, & x \geq \gamma \\ 0, & x < \gamma \end{cases} \quad (1)$$

ここに $\alpha(>0)$ は尺度のパラメータ、 $m(>0)$ は形のパラメータ、 $\gamma(>0)$ は位置のパラメータと呼ばれ、これらは市販のワイブル確率紙に測定値をプロットすることによって推定される⁶⁾。

図中の実線はパラメータの推定値を用いて計算されたワイブル分布の理論的度数曲線を示す。また比較の

ため、正規分布の理論的度数曲線を 1 点鎖線で示す。このようにワイブル分布は度数分布の形状をよく表わしている。しかし、推論の妥当性を保証するためには、適合のよさを確率論的に検定することが必要である。ここでは χ^2 検定⁷⁾を用いて、すべての実験条件について、有意水準 5% を選び、「母集団分布がワイブル分布である」という仮説を検定した結果、すべて採択された。

Fig. 8 の実線は各応答時間の確率分布関数(注 4)を示す。図(a)はスイッチ・オフの場合で、 t_a は音波の有無の急激な変化に対し、出力信号が下がり、初期値の 90% に達するまでの時間で、 τ_a は初期値の 90% から 10% までに要する時間である。 $W_c/W=0$, 4.0 では音波 ($f_s=180$ Hz) が入ったとき、 $W_c/W=8.0$ では音波 ($f_s=300$ Hz) を切ったときに、Fig. 6 から明らかなようにスイッチ・オフとなる。

図(b)はスイッチ・オンの場合で、 t_s は音波に対するステップ応答が最終値の 10% に達するまでの時間で、 τ_s は最終値の 10% から 90% まで変化するに要する時間である。 $W_c/W=4.0$ では音波 ($f_s=180$ Hz) を切ったとき、 $W_c/W=8.0$ では音波 ($f_s=300$ Hz) が入ったときにスイッチ・オンとなる。

これらの確率分布関数はある実測データから得られた推定値であって真の値ではない。したがって、真の値が確率論的にどのような範囲にあるかを推定することが必要である。図の点線は信頼水準 95% を選んだときの信頼限界(注 5)を示す。すなわち真の値は 95% の確率でこの区間内に存在すると予想される。

図(a)では、 $W_c/W=0$ と 4.0 は共に音波により噴流が乱され側壁へ付着する場合で、応答時間 t_a は $W_c/W=0$ の方が明らかに短い。これは音波が入ってから噴流が偏向し始めるまでの時間が短いことを意味し、低圧渦領域の形成が大きな影響を与えていると解釈できる。しかし、応答時間 τ_a は逆に $W_c/W=4.0$ のほうが短い(注 6)。これは噴流の偏向が速いことを意味し、噴流と側壁との相対的な位置関係が影響していると思われる。 $W_c/W=8.0$ の条件は音波の作用により非付着の状態にある噴流が音波を切ることで再び付着する場合で、応答時間 t_a , τ_a のい

(注 4) (1)式より、確率分布関数 $F(x)$ は、

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx = 1 - \exp \left\{ -\frac{(x-\gamma)^m}{\alpha} \right\}, \quad x \geq \gamma$$

(注 5) 真の分布が $F(x)$ である母集団からの標本の第 i 番目の大きさのデータを x_i とするとき、 $y_i = F(x_i)$ はベータ分布に従うという事実に基づき、信頼限界は計算される。

(注 6) この τ_a の両者は、斜線で信頼区間を区別しているように、95% 以上の確率で有意な差がある。

Fig. 8 Probability distribution functions of response time

れも、バラツキが大きい。この場合、側壁は遷移域あるいは乱流域³⁾に位置するため乱れが大きく、バラツキの傾向は乱れによる不規則性によるものと思われる。

図(b)では、 $W_c/W=4.0$ は音波を切ることにより、また $W_c/W=8.0$ は音波を入れることにより、噴流が側壁から剝離する場合で、応答時間 t_s は $W_c/W=8.0$ のほうが短く、逆に t_a は $W_c/W=4.0$ のほ

うが短い。明らかに $W_c/W=8.0$ のほうが剝離しやすいことを示している。これは3章2節で説明したようにノズル-側壁構成条件の違いによる付着の安定性に依存すると考えられる。また、 $W_c/W=8.0$ では図(a)と同様、応答時間のバラツキが大である。

4. あとがき

音波による付着水噴流の挙動を曲線側壁を対象に噴流偏向角および噴流中心線の変化から検討すると共に、噴流の流れの場に受流口部を設定することにより、特にその応答時間の統計的推測から現象を考察した。これらの結果を要約するとつぎのようになる。

1) 付着噴流の挙動は音波、流動ならびにノズル-側壁構成条件に依存し、基本的に三つの異なる現象が存在する。その内で、特に注目される新しい現象は付着流が音波の作用により側壁から完全に剝離し非付着流になることである。

2) 上述の三つの現象を利用した音波信号を流体圧力信号に変換する素子の可能性を実証した。

3) 音波による付着噴流の動的挙動に影響を及ぼす重要な因子は、低圧渦領域の形成、噴流内の乱れの不規則性、および付着状態の安定性であると統計的に推測した。

終りにあたり、本研究に協力された小松規秀、加藤明、西岡統吾、木下裕文、太田 明の諸君に深く感謝する。

参考文献

- 1) 木村，米持：音波による2次元水噴流の挙動—速度分布に及ぼす影響—，計測自動制御学会論文集，**14**-2，196/201 (1978)
- 2) 木村，米持：音波による2次元水噴流の挙動—音波感応域における考察—，計測自動制御学会論文集，**15**-7，953/958 (1979)
- 3) 木村，長峯，米持：音波による2次元水噴流の挙動—一流速乱れの挙動に基づく考察—，計測自動制御学会論文集 **16**-2，245/250 (1980)
- 4) D. O. Rockwell and K. Toda: Effects of Applied Acoustic Fields on Attached Jet Flows, Trans. ASME, Ser. **D-93**-1, 63/73 (1971)
- 5) W. Weibull: A Statistical Distribution Function of Wide Applicability, Trans. ASME, Ser. **E-18**-3 293/297 (1951)
- 6) たとえば，真壁：ワイブル確率紙の使い方—信頼性のための統計的解析—日本規格協会 (1980)
- 7) たとえば，E. クライグ：確率・統計入門，88，培風館 (1972)