二次元水噴流の自励振動*

須藤 浩三^{*1}, 檜原 秀樹^{*1}, 島田 伸和^{*2}
原田 昌博^{*3}, 石橋 幸男^{*4}

Self-Induced Vibration of Plane Submerged Water Jets

Kozo SUDO^{*5}, Hideki HIBARA, Nobukazu SHIMADA,
Masahiro HARADA and Yukio ISHIBASHI^{*5} Hiroshima University, Faculty of Engineering,
4-1, Kagamiyama 1 chome, Higashi-Hiroshima, Hiroshima, 739-8527 Japan

This paper is concerned with an experimental investigation on a self-induced vibration of plane submerged water jets, which occurs, as pointed out in the previous authors' report⁽¹⁰⁾, under the condition of a reduced Froude number, $Fr^* \approx 0.7 \sim 1.0$ when water jets issue into quiescent water with a free surface. Flow fields are visualized by using injected dye and tracer particles, and interesting data are drawn from the obtained photographs. As the results, it is clarified that the self-induced vibration of water jets is caused by attachment of a jet to a water surface owing to the Coanda effect and branching of a jet at an attachment point, and that the frequency of vibration is independent of water level.

Key Words: Water Jet, Flow Visualization, Self-Induced Vibration, Diffusion, Flow Attachment, Coanda Effect, Hydraulic Jump, Tracer Particle Method, Injection Streak Line Method

1. 緒 言

水中に噴出する水噴流は、噴出条件により自由境界(水面)側あるいは固体境界(底面)側へ偏向付着して流れることが知られている。このような流れは、河川や湖沼・海洋への発電所や工場からの排水、ダムや水門からの放水、高速船の推進ジェットなどに見られ、古くから多くの研究が行われている^{(1)~(9)}。しかし、これらの研究は特殊な条件の下での噴流の振る舞いについて行ったもので、広い流動条件について系統的に行った研究は見当たらない。特に、種々の条件下で噴流がどのような挙動を示し、下流に進むにつれてどのように拡散するかを解明することは、現在重要視されている環境問題の解決にとっても意義のある課題である。このような研究の現状を考慮して、著者らは、水中に水平に噴出した二次元水噴流の挙動を広範な条件の下で水素気泡法ならびに固体トレーサ法によって可視化

し、噴出条件による噴流の偏向方向、噴流が水面に付着することによって生じる跳水の挙動、噴流の付着位置等を調べて、噴流が自由境界側に偏向する流れは噴出条件により大きく六つの流動パターンに分類されることを報告した⁽¹⁰⁾。そして、フルード数 $Fr = U_0/\sqrt{gH}$ と噴流と水面の幾何学的関係を表す無次元量 H/h (ノズル中心から水面までの水位とノズル幅との比) を組合せた無次元数 $Fr^* = Fr \times (H/h)^{-1/2} \approx 0.7 \sim 1.0$ の範囲では、外部から振動的な力が作用していないにもかかわらず、噴流の偏向方向が時間経過とともに変化し、このため水面が大きく自励振動するという特異現象の存在することを指摘した。しかし、前報の時点では、流れ場がこのような変化を示す原因が解明されておらず、水面の振動特性について十分に触れることができなかった。

そこで本研究では、水中に水平に噴出した二次元水噴流が自由境界方向へ偏向する流れのうち、水面が大きく自励振動する流動パターン ($D/h \gtrsim H/h$ の場合) についてさらに詳細な可視化実験を行い、自由境界面の形状、噴流の偏向方向、内部の速度ベクトルが時間経過とともに変化する様子や、水面の振動の周波数、振幅等を調べ、水面の自励振動の原因とその機構および

* 原稿受付 1998年11月24日。

^{*1} 正員, 広島大学工学部 (☎ 739-8527 東広島市鏡山1-4-1)。^{*2} 正員, 海上保安大学校 (☎ 737-0832 呉市若葉町5-4)。^{*3} 正員, 広島大学大学院。^{*4} 正員, 千葉職業能力開発短期大学校 (☎ 286-0045 成田市並木町221-20)。

E-mail: sudo@mec.hiroshima-u.ac.jp

特性について知見を得たので、ここに報告する。

2. おもな記号(図1 参照)

- A_d : 噴流の拡散面積(図13 参照)
 A_{mp} : 跳水の垂直変位(振幅)
 A_t : 検査面の面積(図13 参照)
 D : ノズルの中心から固体境界(底板)までの深さ
 Fr : フルード数 $= U_0 / \sqrt{gH}$
 f : 跳水の変動周波数
 H : ノズルの中心から水面までの高さ(ノズルの中心から測った水位が一定となる位置での水面までの垂直距離)
 h : ノズル高さ (=5 mm)
 Re : レイノルズ数 $(= U_0 \cdot h / \nu)$
 (U, V) : (x, y) 方向の速度
 U_0 : ノズル出口の速度
 (x, y) : ノズルの中心を原点とした座標系

3. 実験装置および方法

3.1 実験装置 本実験に使用した座標系および

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

実験装置の概略を図1, 2に示す。実験装置は、作動流体の水(約18°Cの水道水)を供給する管路系と測定流路部(水槽)より構成されている。水は、ポンプによって水槽より約4 m 鉛直上方に設置したヘッドタンクに送られ、そのヘッド差によって駆動される。ヘッドタンクより供給された水は、流量調節弁、浮き子式流量計を通り、二次元絞リノズルより水槽内へ水平に噴出される。ノズル[図2(b)]は高さ $h=5$ mm, 幅 $B=150$ mm, アスペクト比30の長方形ノズルで、ノズル上流の流路内には整流用格子が設けてある。水槽は幅 $B=150$ mm, 高さ $A=1200$ mm, 長さ $L=1400$ mm のアクリル製で、ノズル中心から底面までの深さ D は水槽内に設置した稼動可能な水平底板により、下流の水位 H は水槽の下流端に設置した可動ぜきにより自由に調節できる。なお、流れを安定にせきから流下させるために、せきより上流800 mmの区間は水槽の幅を600 mmに拡大してある。流量の調節はヘッドタンクの下に取付けたバルブで行い、測定はノズルの上流に設置した浮き子式流量計で行うとともにさらに体積法により測定値の精度を確認した。

3.2 計測方法

本研究では、色素流脈法および固体トレーサ法の二つの方法を用いて可視化を行い、噴流の流動状態を調べた。前者はノズル出口近傍から

(a) Schematic diagram of apparatus

(b) Circuit

Fig. 3 Outline of flow visualization

噴流の付着点付近の流動パターンの把握に、後者は検査領域全体の流動パターンの把握と速度ベクトルの算出に用いた。色素流脈法では色素(黒あるいは赤インク)を、固体トレーサ法では直径約1 mm(比重約1.03)のポリスチレン粒子をノズルの手前で注入し、ノズルよりほぼ均一な分布で流出させた。可視化測定の概略を図3(a)に示す。可視化は水槽の中央部の x - y 面内で行い、トレーサ法においてはスライドプロジェクタ(150 W)から出た光を幅約20 mmのスリット光にして試験部下方より照らし、照射されたトレーサ粒子を側壁側よりカメラおよびVTRを用いて撮影した。なお、撮影にあたっては、水面の水位が最大となる時刻を基準にとることとし、それから計った指定の時刻に撮影ができるように図3(b)に示す回路およびタイマを用いた。なお、開閉スイッチにはアルミニウムの薄板を用い、スイッチの位置は予備実験により水位が最高となる位置で回路が閉じるように調節した。また、撮影は、検査面内の速度の大きさに応じてシャッタースピードを変えて行い、得られた可視化写真からトレーサ粒子の流跡の長さおよび向きを求めて速度ベクトルを算出した。

3.3 実験条件と手順 実験を行うに先立って、 $x/h=100$ より下流にせきを設けると流れに対してせきの影響が見られないこと、またホットフィルムによる速度測定より測定領域内の流れは二次元性を維持していること、を確認した。実験は、まずはじめに、レイノルズ数 $Re=4\,000$ および底板までの深さ $D/h=20$ で下流の水位が $H/h=3.5, 4, 4.5$ の三つの場合について、水面の形状および流路内部の流動パターンが時間経過とともに変化する様子を観察した。その後、噴出条件(表1)を細かく変えて自由境界面に生じる最大変位(跳水の垂直変化:以後、振幅と呼ぶ)およびその変動の周波数(以後、振動の周波数と呼ぶ)を測定し、噴出条件と水面の自励振動との関係を調べた。

Table 1 Experimental condition

D/h Re	20	40	60	80
5000	$Fr=1.84, 2.0$	$1.77, 1.84, 2.0$	$1.84, 2.0, 2.1$	$1.84, 2.1$
7500	$Fr=2.26, 2.3, 2.4$	$2.3, 2.4$	$2.25, 2.4$	$2.2, 2.25, 2.4, 2.56, 2.66$
10000	$Fr=2.4, 2.5, 2.6$	$2.5, 2.6, 2.7, 2.85$	$2.6, 2.7, 2.85$	$2.6, 2.7, 2.85, 2.9$
12500	$Fr=2.8, 2.9, 3.0$	$2.8, 3.0, 3.1$	$2.9, 3.0, 3.1$	$2.8, 2.9, 3.0, 3.1$
15000	$Fr=3.1, 3.2, 3.3, 3.4$	$3.1, 3.2, 3.3, 3.4$	$3.1, 3.2, 3.4$	$3.1, 3.2, 3.3, 3.4$

4. 実験結果および考察

4.1 流れ場の概略 ノズルから流出後、噴流が次第にその方向を変え、それに伴って自由境界面が振動する様子を把握するために、 $Re=4\,000$, $H/h=4$, $D/h=20$ の場合を例にとり、流れ場の概略を説明する。なお、この場合の跳水の振動の周期 $T \approx 0.71$ s であった。本研究では、水面の形状がほぼ水平となり噴流がほぼ水面に沿って流下する状態を時間の基準にとり、便宜上 $t=0$ s とした。そして、水面の形状および流れ場が特徴的な様相を示す時刻 $t=0, 0.13, 0.22, 0.31, 0.40, 0.58$ s において、それらの様子を調べた。その結果を、色素流脈法(ノズル近傍の領域)および固体トレーサ法(検査全域)による可視化写真および流れの模式図を用いて図4~6に示す。以下に、それぞれの時刻において見られる流れ場の特徴について述べる。

(1) $t=0$ s: 水面はほぼ水平で噴流はおおむね水面に沿って流下する。ノズル出口近傍の噴流の下部には、噴流内部への流体の巻き込みによって生じる渦状の流れが見られる。

(2) $t=0.13$ s: コアング効果的作用を受けて、噴流は噴流軸の方向を水面側に曲げ、流れが水面に付着して付着点付近の水面が隆起する、すなわち跳水が生じる。また、底面付近では噴流の巻き込みによって運び去られる流体を補うために、 $-x$ 方向に向かう循環流が発達する。

(3) $t=0.22$ s: 噴流の水面側への偏向はさらに大きくなり、噴流の付着点付近の水面はさらに大きく隆起するとともに最高水位点の位置はノズル側に近づく。また、付着点付近では流れはよどみはじめ、ノズル出口近傍の噴流の下部に見られた渦は下流側へ移動する。

(4) $t=0.31$ s: 水面の隆起は最大となり、最高水位点の位置はさらにノズルに近づく。また、付着点付近では流れの分岐が起こり、水面近傍では付着点より上流側に向かう流れが見られるようになる。

(5) $t=0.40 \sim 0.49$ s(図省略): $t=0.31$ s 付近より始まる流れの分岐により、付着点より上流側の水位が上昇する。噴流の水面側への偏向が小さくなるとともに付着点付近の水面の隆起は低くなり、最高水位点の位置(付着点)はノズルより離れる。

(6) $t \geq 0.49$ s(図省略): 付着点上流側の噴流の上部の水位が急激に上昇し、一時、付着点付近の水位より高くなる。このため、水面の最高水位点の位置はいったんノズル側に移動して最もノズルに近づく。その

(a) $t=0\text{ s}$

(b) $t=0.13\text{ s}$

(c) $t=0.22\text{ s}$

(d) $t=0.31\text{ s}$

(e) $t=0.40\text{ s}$

(f) $t=0.58\text{ s}$

Fig. 4 Photograph (Injection streak line method : exposure 1/60 at f. 1.4)

(a) $t=0\text{ s}$

(b) $t=0.13\text{ s}$

(c) $t=0.22\text{ s}$

(d) $t=0.31\text{ s}$

(e) $t=0.40\text{ s}$

(f) $t=0.58\text{ s}$

Fig. 5 Photograph (Tracer particle method : exposure 1/8 at f. 1.2)

(a) $t=0\text{ s}$

(b) $t=0.13\text{ s}$

(c) $t=0.22\text{ s}$

(d) $t=0.31\text{ s}$

(e) $t=0.40\text{ s}$

(f) $t=0.58\text{ s}$

Fig. 6 Schematic diagram of flow pattern

Fig. 7 Velocity vectors

後, 再び付着点が最高水位となり, 水面の最高位点の位置はノズルより離れる. 流れの分岐後, 上流側に向かう流体はノズル出口付近で再び噴流に巻き込まれるため, 噴流の下部での流体の巻き込みは弱くなる.

(7) $t=0.58\text{ s}$: 噴流はいったん水平方向よりもわずかに底面側に偏向して流下する. その後, 流れは $t=0\text{ s}$ の状態へと戻る.

Fig. 8 Schematic diagram of flow mechanism

図7は流れの速度ベクトルを示したもので、これより速度分布の概略、水路内に誘起される循環流およびそれらの変化の過程が把握できる。

4.2 水面の自励振動の機構 そこで、上述の観察に基づき、振動の発生とその過程について要約すれば、次のようになる[模式図(図8)参照]。

(1) ノズルより流出した噴流はほぼ水平に流下し、下流で水面に付着する。このとき、水面はほぼ水平となる[図8(a)]。

(2) 付着点より上流の噴流と水槽の前側壁で作られる領域(A領域)では、噴流内部へ流体が巻き込まれるため圧力が低下する。このため、噴流軸は水面側に偏向し(コアンダ効果)、付着点付近では水面が隆起する一跳水の発生[図8(b)]。

(3) (2)の状態がさらに進むと領域Aの水面は低くなり、噴流軸の水面側への偏向が大きくなるため噴流は水面により大きい角度で付着し、(2)の状態よりも水面はさらに大きく隆起する[図8(c)]。

(4) (3)の状態がさらに進み噴流の偏向の程度が大きくなると、噴流の付着点、すなわちよどみ点(点s)付近で流れの分岐が起こる[図8(d)]。

(5) 流れの分岐により領域Aに流体が供給されるため、そこでの水位が高くなり、圧力が上昇する。

領域Aの圧力上昇により、噴流に作用するコアンダ効果が弱まり噴流軸の水面側への偏向は小さくなる。すなわち、噴流が水面に付着する角度は小さくなる。この結果、水面の隆起は低下する。

(6) (5)の状態がさらに進むと領域Aの上流部の水位が一時的に下流部の水位より高くなり、領域Aの上流部の圧力が下流部の圧力より高くなる。そのため、噴流はノズル流出後いったんその向きをわずかに底面側に曲げた後、ほぼ水平に流下する[図8(e)]。

(7) その後、流れは(1)の状態へと戻り、以後上記の過程を繰り返す。

4.3 噴出条件と水面の振動特性 水面の振動特性を明らかにするために、跳水の振動の周波数 f および振幅 A_{mp} と下流水位 H/h の関係を各種噴出条件について図9, 10に示す。各図の(a)は、流れに底面の影響が見られない $D/h=80$ の場合、(b)は、底面の影響が少し見られる $D/h=20$ の場合、についてレイノルズ数の影響を調べた結果である。

周波数 f は、いずれの場合も下流水位によらずほぼ一定の値を示し、レイノルズ数が大きくなるにつれて小さくなる。周波数が下流水位の影響を受けないことは、次のように解釈できる。下流水位が高くなると付着点より上流の噴流と水槽の前側壁で囲まれた領域

(a)

(b)

Fig. 9 Frequency of vibration of hydraulic jump

(a)

(b)

Fig. 10 Amplitude of hydraulic jump

(A 領域)が拡大し、噴流の巻き込みに伴って生じる圧力の低下に時間を要する。しかし、いったん噴流が水面に付着すると付着角が大きいため分岐流量が大きく、急速に A 領域の圧力は上昇する。一方、下流水位が低い場合、噴流は短時間で水面に付着するが付着角が小さいため分岐流量が少なく、A 領域の圧力上昇には時間を要する。この結果、周波数は、下流水位によらずほぼ同じ値を示すことになる。また、レイノルズ数が大きくなるとノズル出口付近の噴流の上部の巻き込みが強くなり、そこでの圧力が急速に低下し、A 領域の圧力上昇には時間を要することから周波数は小さくなる。

一方、いずれの場合も下流水位が高くなると噴流が水面に付着するまでの噴流速度の減衰は大きく、付着点付近で位置エネルギーに変換される運動エネルギーが小さくなるため水面の隆起は低くなる。このため、振幅 A_{mp} は下流水位が高くなるほど小さくなる。また、レイノルズ数が大きくなると噴流はより高速で水面に付着するため、付着点付近ではより大きな運動エネルギーが位置エネルギーに変換される。このため、水面の隆起が高くなり、したがって振幅は大きくなる。

レイノルズ数および下流水位 H/h が同じ場合でも、

Fig. 11 Frequency of vibration of hydraulic jump

Fig. 12 Amplitude of hydraulic jump

底面までの深さ D/h が浅い $D/h=20$ の場合には跳水の振動の周波数および振幅はともにわずかに小さくなる。

ここで、底板の影響のない $D/h \geq 30$ の周波数 f および振幅 A_{mp} について、測定結果から得られた知見に基づき次元考察を行うと

$$fh/U = F_1(Re) \quad \dots\dots\dots (1)$$

および

$$A_{mp}/h = F_2(Fr) \quad \dots\dots\dots (2)$$

なる関係を得る。ここで、 $Re = U h \rho / \mu$, $Fr = U / \sqrt{gH}$ 。そこで、これらの結果を基に、 $D/h=40, 60, 80$ における周波数および振幅を整理すると図 11, 12 のようになる。周波数および振幅は、図 11, 12 中の実線で示される以下の近似式で表される。

$$\frac{f \cdot h}{U} = 2200 Re^{-1.5} \quad (Re \approx 5000 \sim 15000, D/h \geq 30) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{A_{mp}}{h} = 0.25 Fr^4 \quad (Fr \approx 1.7 \sim 3.3, D/h \geq 30) \quad \dots\dots\dots (4)$$

4.4 噴流の拡散 大雑把ではあるが、噴流が流路内を拡散していく様子を調べるために、跳水の垂直変位が最大となる時刻を $t=0$ s とし、この時刻よりトレーサ粒子を含んだ流体をノズルより流出させ、この流体部分が着目する検査領域(水面、底板、前壁および $x/h=70$ により囲まれる領域、O 型の場合 $A_t=4.2 \times 10^{-2} \text{m}^2$)内を占める拡散面積 A_d を各時刻ごとに求めた[図 13(b)]。ここで拡散面積 A_d は、ノズルから流

(a) Photograph

(b) Schematic diagram of diffused area

Fig. 13 Diffusion of jet

Fig. 14 Diffusion of jet for flow patterns

出したトレーサ粒子がある時刻に占める流路内の面積を、図 13(a) に示すような可視化写真より算出した。図 14 に、噴流の拡散面積の時間変化を本研究で対象とした水面が大きく振動する流動パターン(以後、O 型と呼ぶ)と噴流が水面に付着する流れで O 型と異なる流動パターンを示す流れについて示す。図 14 はレイノルズ数 4 000、ノズル中心から底面までの深さ $D/h=20$ のもとで下流水位を $H/h=10, 4, 3, 2$ と変えてできる S 型[Submerged Jump 型: 図 15(a)], O 型, B 型[両境界付着型: 図 15(b)], R 型[Repelled Jump 型: 図 15(c)]の流れについての結果⁽¹⁰⁾である。

ノズル近傍の領域に着目したとき、噴流の拡散する割合は、O 型の場合がいちばん大きい。また、O 型では、ノズル流出後の流体で検査領域が占められる時間がいちばん短い。

5. 結 言

水中に水平に水噴流(二次元流れ)を噴出した際に生じる流動パターンのうち、水面が大きく自励振動する場合について可視化実験を行い、その結果を解析して以下の知見を得た。

(1) 水面の自励振動は、コアンダ効果による水面の隆起と、その後生じる噴流付着点付近での流れの分岐により誘起される。

(2) 跳水の振動の周波数は、

$$\frac{f \cdot h}{U} = 2.200 Re^{-1.5} \quad (Re \approx 5\,000 \sim 15\,000, D/h \geq 30)$$

Fig. 15 Schematic diagram of flow pattern

なる実験式で表される。

(3) 跳水の振幅は、下流水位が高くなるほど小さく、レイノルズ数とともに大きくなり、

$$\frac{A_{mp}}{h} = 0.25 Fr^4 \quad (Fr \approx 1.7 \sim 3.3, D/h \geq 30)$$

なる実験式で表される。

(4) 自励振動を生じる流動パターンを示す噴流では、他の噴流に比べて着目した領域内での拡散割合が最も大きくなる。

なお、本研究は日本証券奨学財団(研究調査費)の助成を受けた。また、実験にあたり大学院生 高崎徳之君、鷺見大輔君の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) Govinda Rao, N. S. and Rajaratnam, N., *Proc. ASCE*, **89-HY 1** (1963), 139-162.
- (2) Rajaratnam, N. and Subrmanya, K., *Proc. ASCE*, **94-HY 2** (1968), 481-503.
- (3) Rajaratnam, N. and Subrmanya, S., *J. Hydraul. Res.*, **23** (1985), 131-146.
- (4) Swaan, T. A., ほか 3 名, *Proc. ASCE, J. Hydraul. Eng.*, **115-HY 12** (1989), 1587-1606.
- (5) 須藤浩三・ほか 2 名, ターボ機械, **22-12** (1994), 20-27.
- (6) 村尾卓爾・須藤浩三, 機論, **56**-531, B(1990), 3360-3365.
- (7) 深谷征史・ほか 3 名, 機論, **60**-574, B(1994), 2014-2021.
- (8) 飯田将雄・ほか 3 名, 機論, **61**-582, B(1995), 517-523.
- (9) 社河内敏彦・ほか 3 名, 機論, **62**-594, B(1996), 527-532.
- (10) 須藤浩三・ほか 5 名, 機論, **64**-618, B(1998), 350-358.