二次元水噴流の付着現象と拡散*

須藤 浩三^{*1}, 檜原 秀樹^{*1}, 角田 勝^{*1}
島田 伸和^{*2}, 石橋 幸男^{*3}, 平岡 照朗^{*4}

Reattachment Phenomena and Diffusion of Plane Submerged Water Jets

Kozo SUDO, Hideki HIBARA, Masaru SUMIDA,
Nobukazu SHIMADA, Yukio ISHIBASHI and Teruaki HIRAOKA

Plane submerged water jets which issue from nozzle into quiescent water in channel have been known to attach to the adjacent solid or free surface owing to the Coanda effect. This paper is concerned with an experimental investigation on the plane submerged jets. Flows are visualized by using hydrogen bubbles and tracer particles. The photographs show that the jets attaching to the free surface are classified into six types according to their behavior after issuing from the nozzle. Under some limited conditions, the free surface is found to make self-induced vibration. The velocity distributions are given in the form of the vector diagram and the flow patterns made in the channel for each type of the jets are indicated. The flow visualization by tracer particle method provides that the jets attaching to the free surface diffuse faster than those attaching to the solid boundary.

Key Words: Jet, Flow Visualization, Diffusion, Attachment Phenomena, Hydraulic Jump, Hydrogen Bubble Method, Tracer Particle 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みられる。したがって、噴流の偏向方向や境界面上の付着位置と噴出条件の関係およびこれら噴流のフローパターンや拡散過程を明らかにすることは、上記の諸設備あるいは機器の設計・改善にとって重要な課題である。このような流動現象に関連する研究には、噴流が自由境界面に付着する場合に生じる跳水現象に着目した報告⁽¹⁾、流体素子内の噴流の切換え機構に関する報告⁽²⁾あるいは液体噴流の自励振動に関する研究^{(3)~(5)}があるが、自由境界と固体境界の2境界面の影響、噴流の偏向方向や付着位置あるいは流動パターンを噴出条件と関係づけて調べた研究は、著者らの知る限りでは見

当たらない。

そこで本研究では、水中に水平に噴出する二次元水噴流を取り上げ、噴出速度、ノズル中心から自由境界(水面)および固体境界(底面)までの水深を変えて水素気泡法ならびに固体トレーサ法による広範な可視化実験を行い、噴出条件による噴流の偏向方向、付着位置、下流方向への流動状態の変化などを調べた。そして、これらの結果から噴出条件と流動特性についての系統的な検討を行った。

2. おもな記号(図1参照)

A_d : 噴流の拡散面積

D : ノズル中心から固体境界(底板)までの深さ

Fr : フルード数 ($= U_o / \sqrt{gH}$) (g : 重力の加速度)

H : ノズル中心から自由境界(水面)までの高さ
(ノズル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 ($= 5 \text{ mm}$)

H_m : 下流の水面から測った最高水位点までの高さ

L_m : ノズル先端から最高水位点までの水平距離

L_r : ノズル先端から噴流付着点までの水平距離

q : 合成速度 ($= \sqrt{U^2 + V^2}$)

* 原稿受付 1997年5月8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5-1)。

^{*3} 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)。

^{*4} (株)西島製作所 (☎ 569-1142 高槻市宮田町1-1-8)。

下流端 ($x/h=280$) に設けたせきとは別に x 方向の任意の位置に設置可能なせきを用意し、これを水槽の下流端から上流側に移動して流れの観察を行った結果、 $x/h=100$ より下流にせきを設けた場合、ここで扱う流れについてはせきの影響がみられないこと、またホットフィルムによる速度測定より測定領域内の中央部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、まずはじめに噴出レイノルズ数 Re およびノズル中心から底板までの深さ D を固定して下流の水位を $H/h=0\sim80$ に変化させ、噴流の偏向方向が水面側から底板側へあるいは逆に底板側から水面側へ切りかわる様子を観察した。同様な実験をレイノルズ数 Re および深さ D をそれぞれ $Re=2400\sim10^4$, $D/h=10\sim80$ に変えて行い、噴出条件と噴流の偏向方向および付着位置との関係を明らかにした。なお、本研究では、噴流が境界面に付着後上流および下流方向に分岐する位置を噴流の付着位置とし以下の手順で求めた。まず、付着点近傍の流れの様子(トレーサの挙動)を約 30 s VTR 撮影し、その結果を 0.5 s 間隔に分割してそれぞれの付着位置を求める。こうして得られた付着位置を平均し、その結果を噴流の付着位置とした。なお、計測誤差は約 7% である。次に、噴流が水面側に偏向する場合について、噴出レイノルズ数 Re 、ノズル中心から底板までの深さ D および下流の水位 H を細かく変えて可視化実験を行い、噴出条件により流れ場の流動パターンが変化していく様子を調べた。

4. 実験結果および考察

4・1 流れ場の概略 ノズルから噴出した噴流は、その偏向方向により大きく二つのタイプ、すなわち水面側か底板側へ偏向し付着する場合に分けられる。両タイプの例を、図 4、5 に示す(後述のように、同一条件下でも二つのタイプが実現される；以後、噴流が水面に付着する場合あるいは噴流自身が水面を形成する場合を自由境界付着流れ、底板に付着する場合を固定境界付着流れと呼ぶこととする)。なお、この場合に生じる自由境界付着流れは、分類上後述の S 型に属する。各図の (a)、(b) はそれぞれ可視化写真および流れの模式図を表す。自由境界付着流れの場合(図 4)、ノズルから噴出した噴流はコアング効果のため噴流軸の方向を水面側に曲げ、流れは水面に付着する。このとき付着点付近の水面は隆起し跳水を生じる。付着点より下流では噴流は水面に沿って下流方向へ流下する。一方、固体境界付着流れの場合(図 5)、ノズルから噴出した噴流は底板側に偏向し流れは底板に付着する。付着点より下流では噴流は底板に沿って流下する。また、いずれの場合も、付着点より上流では噴流軸と水槽の前側壁および噴流が付着する境界面で囲まれた領域内に反時計方向または時計方向に循環する強い渦が、一方、付着点より下流では上流の渦とは逆回りに流動する弱い流れが誘起される。以上の二つのタイプの噴流のうち、自由境界付着流れでは、後述のよ

(a) Photograph(exposure 1/8 at f.1.2)

(b) Schematic diagram of flow pattern

Fig. 4 Flow attaching to free boundary
($H/h=30$, $D/h=30$, $Re=4500$)

(a) Photograph (exposure 1/8 at f.1.2)

(b) Schematic diagram of flow pattern

Fig. 5 Flow attaching to solid boundary
($H/h=30$, $D/h=30$, $Re=4500$)

うに噴出条件により6種類の流れパターンがみられるが、固体境界付着流れでは、噴出条件を変えても流れパターンは変化しない。

4・2 噴流の偏向方向と付着位置 噴出後の噴流がどちらの境界側に偏向し、どの位置に付着するかは噴出条件によって決まる。そこで、噴流の偏向方向と噴出条件の関係を図6に、偏向後の噴流の付着位置 L_r を図7に示す。

噴流の偏向方向は噴出条件により以下の三つに分かれる。

(1) ノズル中心から水面までの高さ(下流の水位) H が底板までの深さ D に比べて十分大きい $H/h \geq 2.2D/h$ の場合(噴出条件が図6中の左上の破線より上側に位置する場合)：噴流は底板側に偏向し、固体境界付着流れとなる。

(2) H が D に比べてかなり小さい $H/h \leq (0.27D/h + 4.2)$ の場合(噴出条件が図6中の右下の実線より

り下側に位置する場合)：噴流は水面側に偏向し、自由境界付着流れとなる。

(3) H と D にあまり差がない $(0.27D/h + 4.2) \leq H/h \leq 2.2D/h$ の場合(噴出条件が図6中の両直線に挟まれた領域に位置する場合)：噴流はいずれの境界側にも偏向する場合がみられ、その偏向方向は噴出する際のノズル近傍の流れ場の状態により決まるようである。

また、偏向後の噴流の付着位置 L_r は、自由境界付着流れの場合(対象は後述のS型のみ)はノズル中心から水面までの距離 H 、固体境界付着流れの場合は底面までの深さ D によって決まり、図7中の実線で示される同一形の実験式

$$\text{自由境界付着流れ： } L_r/h = 1.3H/h + 6.8 \quad \dots\dots\dots (1\cdot a)$$

$$\text{固体境界付着流れ： } L_r/h = 1.3D/h + 6.8 \quad \dots\dots\dots (1\cdot b)$$

により表される。

以上のように噴流の偏向方向および付着位置は、 H 、 D により決まり、噴出レイノルズ数にはほとんど依存しない。

4・3 自由境界付着流れにおける流動パターンの分類

4・3・1 流動パターン 自由境界付着流れは、噴出条件により流れの様相が大きく異なり、6種類の流れパターン(本研究では便宜上6種類の流動パターンをS, R, B, D I, D II型およびO型と呼ぶこととする)に大別できることが可視化実験によりわかった。図8～13に各パターンの流れの代表例を示し、流れの概略を説明する。なお各図の(a)～(c)は、それぞれ可視化写真、流れの模式図および可視化写真より求めた速度ベクトル図である。

(1) S型(図8)：下流の水位 H が十分に高い場合、ノズル出口は潜水し、ノズルから噴出した噴流は水面側に大きく偏向し、流れは水面に付着する。このとき付着点付近の水面は隆起し跳水を生じる。付着点より上流の水面と水槽の前側壁で囲まれる密閉領域では反時計方向に循環する渦が形成される。また、付着点より下流では噴流は自由境界に沿って下流方向へ流下する。

(2) R型(図9)：S型の状態から噴出レイノルズ数 Re を大きくかつ下流の水位 H を低くすると、ノズル出口は潜水しなくなり、水面はノズル出口から大きく上昇して、大きな跳水を生じるようになる。このとき噴流はノズル噴出後急速に水面に沿ってやや斜め上方へ向かい、水面の下降とともに噴流も斜め下方に

Fig. 6 Influence of H and D on deflecting direction of jet

Fig. 7 Horizontal distance from nozzle to attachment point

(a) Photograph (exposure 1/8 at f.1.2)

(b) Schematic diagram of flow pattern

(c) Velocity vectors

Fig. 8 S-type ($H/h=10$, $D/h=20$, $Re=4\,000$)

(a) Photograph (exposure 1/8 at f.1.2)

(b) Schematic diagram of flow pattern

(c) Velocity vectors

Fig. 10 B-type ($H/h=3$, $D/h=20$, $Re=4\,000$)

(a) Photograph (exposure 1/8 at f.1.2)

(b) Schematic diagram of flow pattern

(c) Velocity vectors

Fig. 9 R-type ($H/h=2$, $D/h=20$, $Re=4\,000$)

(a) Photograph (exposure 1/15 at f.1.2)

(b) Schematic diagram of flow pattern

(c) Velocity vectors

Fig. 11 D I-type ($H/h=2$, $D/h=10$, $Re=5\,000$)

(a) Photograph (exposure 1/2 000 at f.2)

(b) Schematic diagram of flow pattern

Fig. 12 D II-type ($H/h=0.5$, $D/h=10$, $Re=8\ 000$)

向かう。さらに下流では、凹凸する水面にあわせて流れは水面直下を蛇行する。

(3) B型(図10)：R型では噴流は水面に沿って流下するが、ノズル中心から底板までの深さ D が浅くかつ大きな跳水を生じる下流の水位 H/h が比較的高い場合には、最高水位点下流側の斜め下方に向かう噴流はそのまま進み、流れは底板に再び付着する。このとき再付着点より上流の底板と水槽の前側壁で囲まれる密閉領域では時計方向に循環する強い渦が形成され、再付着点より下流では噴流は底板に沿って下流方向へ流下する。

(4) D I型(図11)：比較的低い跳水を生じる下流の水位 H/h が低い R 型の場合において、ノズル中心から底板までの深さ D を浅くしていくと跳水の高さはさらに低くなりついにはノズル出口直後の水位が下流の水位より低くなる。このためノズル流出後、噴流は水面の下側に潜り込みながら底板方向へ偏向し、流れは底板に再付着する。このとき再付着点より上流では循環する渦が、下流では底板に沿う流れがみられ、先ほどの B 型とよく似た流れとなる。

(5) D II型(図12)：D I 型の状態から噴出レイノルズ数を大きくしていくとノズル出口直後の水位はさらに低くなるとともに、ノズル出口直後の噴流下側(底板側)に空間ができる変わった流れとなる。

また、以上の流動パターンはどの場合も、付着点あるいは再付着点より下流の領域では付着点より上流にできる渦とは逆向きの緩やかな流れが誘起される。

(6) O型(図13)：噴出条件が上述の S, R 型の中間にある場合、流れは S, R 型のどちらにも完全に移

(a) Photograph (exposure 1/1 000 at f.2)

(b) Schematic diagram of flow pattern

Fig. 13 O-type ($H/h=12$, $D/h=80$, $Re=10\ 000$)

行できず、図13(a)にみられるように時間経過とともに S, R 型を交互に繰り返す。このため、水面は S 型および R 型にみられる跳水を交互に生じ、大きく自励振動する。

4・3・2 噴出条件による流れの分類 自由境界付着形の流れが前述したどの流動パターンとなるかは噴出条件、すなわちノズル中心から底板までの深さ D 、下流の水位 H およびノズル噴出速度 U_0 の三つのパラメータにより決まると考えられる。そこで、フルード数と噴流と水面の間の幾何学関係を表す無次元量 H/h を組合せた次の無次元数(変形フルード数) Fr^*

$$Fr^* = Fr \times (H/h)^{-1/2} \quad (Fr = U_0 / \sqrt{gH}) \quad \cdots (2)$$

を導入すると、流動パターンは Fr^* と D の二つのパラメータにより図14に示すように分類ができる。

Fig. 14 Classification of flow patterns

Fig. 15 Decay of maximum velocity for flow patterns

Fr^* が大きくなるにつれて流れはS, O, R型へと変わるが、底面までの深さが浅くなり底面の影響が流れに現れ始めると ($D/h \leq 30$), R型の流れのうち大きい跳水を生じるすなわち Fr^* が小さい場合にはB型へ、低い跳水を生じるすなわち Fr^* が大きい場合にはD I型へと流れは変わる。さらに底面までの深さが浅くなると ($D/h \leq 8$), D I型の流れのうち噴出速度が速い Fr^* の大きい場合にはD II型へと流れは移行する。

4.3.3 噴流特性と流動パターン 速度ベクトル図より得られた合成速度 $q = \sqrt{U^2 + V^2}$ (計測誤差約8%)の最大値 q_m の減衰を図15に示す。また、極めて大雑把ではあるが、噴流が流路内を拡散していく様子を調べるために、トレーサ粒子を含んだ流体がノズルより噴出する時刻を基準にとり、この流体部分が着目する検査領域内を占める拡散面積 A_d を各時刻ごとに求めプロットした結果を図16に示す。ここで拡散面積 A_d は、ノズルから流出したトレーサ粒子がある時刻に占める流路内の面積で以下の手順で求めた。まず、流路を $2h \times 2h$ の正形状に格子分割し、ある時

(a) Photograph (diffused area)

(b) Schematic diagram of diffused area

(c) Diffusion of jet for flow patterns

Fig. 16 Diffusion of jet

間 t において格子内にトレーサ粒子が存在するかどうかを図16(a)に示すような可視化写真より判定した。格子内にトレーサ粒子が存在する場合にはその格子内に噴流は拡散しているとみなした。以上の作業を同じ噴出条件および時刻において5~6回繰返し、その結果から噴流の外縁を決め拡散面積を算出した。図15の減衰および図16の噴流の拡散は、噴出速度 $U_0 = 0.8 \text{ m/s}$ (レイノルズ数 $Re = 4000$), ノズル中心から底板までの深さ $D/h = 20$ のもとで下流の水位を $H/h = 20, 3, 2$ と変えてできるS, B型およびR型の流れについての結果で、図15, 16には参考のためS型と同一条件下で実現される固体境界付着流れの結果も併せて示してある。なお、図15中の矢印で示す位置は付着点(S型), 再付着点(B型および固体境界付着流れ)および最高水位点(R型)の位置を、図16中の破線および実線の矢印で示す位置はそれぞれ噴流が境界面

Fig. 17 Height of maximum water level point

Fig. 18 Horizontal distance of maximum water level point

に付着した時刻および検査領域内全域にわたって拡散した時刻を表す。ここで検査領域は水面、底板、前側壁および $x/h=70$ により囲まれる領域である。

噴流の拡散を表す拡散面積 A_d は、R、B、S 型の順に大きく、その差は時間が経過するほどより顕著となる。これに対応して最大速度の減衰は、R、B、S 型の

順に大きくなる。また、S 型および R 型の場合、水面の上昇・下降に対応して噴流の運動エネルギーが位置エネルギーにあるいは位置エネルギーが運動エネルギーに変換されるため最大速度を表す曲線も水面の変化に応じて変化する⁽¹⁾。

噴出直後の跳水発生による水面の変形は、ノズル出口およびその近傍の噴流特性に大きな影響を及ぼす。また、下流における噴流特性の変化は、そのノズル出口近傍の変化に大きく支配される。そこで、跳水の発生位置を表す目安として最高水位点の位置を噴出条件を変えて調べた。図 17, 18 はその一例で、それぞれ下流の水面から測った最高水位点までの高さ H_m および水平方向距離 L_m と噴出条件の関係を示しており、各図の (a) は、流れに底面の影響が現れない $D/h=80$ の場合について噴出レイノルズ数の影響を、(b) は、レイノルズ数 $Re=10\,000$ の場合についてノズル中心から底面までの深さ D/h の影響をみたものである。なお、底面までの深さ D/h の影響は他のレイノルズ数の場合についてもほぼ同様な傾向となる。また、ノズル噴出後の水位が下流の水位よりも低くなる場合 (D I 型および D II 型) については、参考のための最低水位点の水位を破線にて示した [図 17(b)]。

最高水位点 (S 型では付着点と一致) の高さ H_m は、R 型および B 型の流れでは下流の水位が高くなるにつれて直線的に増加し、流れが O 型へ変わる付近で最大となる。さらに下流の水位が高くなると最高水位点の高さ H_m は下流の水位に逆比例して低くなりながら流れは S 型へと移行する。また、跳水の形成に底面の

影響がない場合 ($D/h \geq 50$) には、噴出レイノルズ数の増大につれて最高水位点の高さ H_m は高くなる。一方、底面までの深さが浅くなると、R, B 型および S 型の流れでは最高水位点の高さ H_m は低くなる。特に $D/h \leq 20$ でかつ下流の水位が低い場合には流れは D I 型あるいは D II 型へと変わり、噴出後の水位は下流の水位より低くなる。このときの最低水位点の水位は下流の水位が低くなるほど低下する。

最高水位点の水平距離 L_m は、R 型の流れでは下流の水位が高くなるにつれて減少し、流れが O 型に変わった後に最小値となり、最高水位点は最もノズルに近づく。さらに下流の水位が高くなると最高水位点はノズルから離れはじめ、流れが S 型になると L_m は図 18 中の直線で表される付着位置 [式(1)] にほぼ一致し下流の水位に比例して増加する。また、噴出レイノルズ数が増大すると R 型の流れでは L_m は増加するとともに、 L_m が最小となる下流の水位は高くなる。一方、底面までの深さ D/h が浅くなると L_m は増加し、最高水位点はノズルから離れる。

以上の結果より、最高水位点は、流れが O 型に変わる付近で最も高くなるとともに、最もノズルに近づくことがわかる。

5. 結 言

水中に水平に噴出する二次元水噴流について、噴出レイノルズ数 $Re = 2400 \sim 10^4$ 、ノズル中心から水面までの高さおよび底板までの深さ $H/h = 0 \sim 80$ および $D/h = 10 \sim 80$ の範囲で可視化実験を行い、以下の結論を得た。

(1) 噴流の偏向方向は、噴出条件(ノズル中心から水面までの高さ H および底板までの深さ D) により以下の三つに分かれる。

(i) $H/h \geq 2.2D/h$ の場合：噴流は底板側に偏向し固体境界付着流れとなる。

(ii) $H/h \leq (0.27D/h + 4.2)$ の場合：噴流は水面側に偏向し自由境界付着流れとなる。

(iii) $(0.27D/h + 4.2) \leq H/h \leq 2.2D/h$ の場合：噴流はいずれの境界側にも偏向する場合がみられ、その偏向方向は噴出する際のノズル近傍の流れ場の状態により決まる。

(2) 噴流の付着位置 L_r は、

自由境界付着流れの場合： $L_r/h = 1.3H/h + 6.8$

固体境界付着流れの場合： $L_r/h = 1.3D/h + 6.8$

なる実験式により表される。

(3) 自由境界方向に偏向し付着する流れは、流動パターンにより 6 種類の流れに大別でき、その流動パターンは、ノズル中心から底面までの深さ D と無次元数 Fr^* を用いて分類できる(図 14)。

(4) 最高水位点の高さは、R 型および B 型の流れでは下流の水位が高くなるほど高く、O 型および S 型の流れでは逆に低くなる。また、流れが O 型に変わる付近で最高水位点の高さは最も高くなる。

最高水位点の水平方向距離は R 型の流れでは下流の水位が高くなると減少し、O 型および S 型の流れでは逆に増加する。

本研究を行うにあたり、文部省〔科学研究費基盤研究 C(2)〕および日本証券奨学財団(研究調査費)の助成を受けた。ここに謝意を表する。

文 献

- (1) 須藤浩三・ほか 2 名, ターボ機械, 22-12(1994), 20-27.
- (2) 村尾卓爾・須藤浩三, 機論, 56-531, B(1990), 3360-3365.
- (3) 深谷征史・ほか 3 名, 機論, 60-574, B(1994), 2014-2021.
- (4) 飯田将雄・ほか 3 名, 機論, 61-582, B(1995), 517-523.
- (5) 社河内敏彦・ほか 3 名, 機論, 62-594, B(1996), 527-532.