8 二次元フォーストブルームにおける連行過程の可視化

阪大工 室田 明・中辻啓二・服部悦士

Visualization of Entrainment Process in Turbulent Plane Forced Plume

Akira MUROTA, Keiji NAKATSUJI and Etsushi HATTORI

The apparent flapping motion and the entrainment process in a turbulent plane forced plume are investigated by flow visualization. The visualization supports the existence of counter-rotating spanwise structures appearing alternately on opposite sides of the plume centerline in the self-preserving region of transient state from a jet-like flow to a plume-like flow. The asymmetric arrangement of the structures results in the flapping motion of a plane forced plume, which leads to the intermittent entrainment of ambient fluid into the forced plume.

1. まえがき

フォーストブルームは自由な乱れの噴流に浮力効果の相乗された流動であり、流下とともに「ブルーム軸が左右に大きく揺動する」ゆらぎが観察される。このゆらぎ現象が周囲流体の連行や放流流体の混合希釈に直接的に関与することから、環境水理において活発な研究が行なわれてきた。しかしながら、ゆらぎ現象と自由な乱れ特有の組織構造、あるいは両者と連行機構とを結びつける指摘は数多いものの、それらの関連性を明解に説明した研究はほとんどない。周囲環境水の連行機構を考察する場合には、まずその形態を可視観測から明らかにする必要がある。このような考え方の下に、本研究ではフォーストブルームの組織構造、ゆらぎの特性と連行過程を明確にすることに努めた。

2. 実験装置および方法

実験は図-1に示す前面ガラス張りの水槽(高さ130cm,幅90cm,奥行90cm)の前面15cmを仕切って行った。ヒーターで加熱した温水を恒温水槽で攪拌し一定温度に調整した後、ヘッドタンクを通して水槽下部に設置したスリットより鉛直上向きに放流した。ブルームの温度はスリット内に設けたサーミスターで、また流量はバルブ④で調整し、流量計Bで測定した。熱収支の不均衡に原因して水表面近くで成層化した界面が計測中に低下することを抑制するために、また水槽の有限性により水槽内に循環が形成されることを避けるために、周囲水として水道水をバルブ⑥より補給するとともに、水槽の前後面に水位差をつけて計測水槽中に下方から上向きに一樣な流れを生起させている。スリットの形状はフォーストブルームの初期流動に重要な影響を与えるので慎重に設計した。その形状

Department of Civil Engineering, Osaka University, Suita City, Osaka 565, Japan

は整流箱から15cmまでは1:2.5に絞り、先端部20cmは口径0.4cm×15cmの矩形管路となっている。また、放流口の先端は45°のエッジで機械加工され、不要な攪乱が生じないようにした。

流速と温度は直径0.8cm、長さ3cmの検出部を有した二方向電磁流速計(計測技研製)と高感度サーミスター(芝浦電子製)を用いた。

水理諸元は表-1に示す。ここに、 U :流速、 W_0 :スリット幅、 $\epsilon(=\Delta\rho/\rho_a)$:相対密度差、 $Fd_0 = U_0/\sqrt{\epsilon g W_0}$:密度フルード数、 $Re_0 = U_0 W_0/\nu$:レイノルズ数であり、添字0とaはそれぞれ放流口、周囲水の水理諸量を示す。初期温度差 ΔT_0 は20~80℃の範囲である。

流れの可視化法としては、色素流脈法と液体トレーサー法を採用した。注入したトレーサーの描く流脈線や流跡線をモータードライブ付カメラおよびビデオで撮影した。

3. 実験結果および考察

(a) 渦動とゆらぎの成長過程

写真-1(a),(b)はそれぞれブルームとジェットにおける渦動とゆらぎの成長過程を染料(メチレンブルー)を放出温水に注入することによって可視化したものである。露出時間は1/125秒、撮影時間間隔は0.84秒である。

ブルームにおいては $x/W_0 > 20$ で認められる渦構造は流下とともに発達し $x/W_0 = 50$ 付近で中心軸に達するような大規模な渦動となる。界面の凸部で確認できる渦動は左右逆向きの回転を有しており、中心軸に非対称な位置関係を保って移流している。それは流下

図-1 実験装置

表-1 水理諸元

Run	U_0 (cm/s)	$\Delta\rho_0$ (g/cm ³)	Fd_0	Re_0	Regime
1	33.5	0.00069	64.4	980	Jet
2	12.3	0.00069	23.7	650	Jet-遷移
3	10.3	0.00380	8.4	590	遷移
4	18.0	0.01520	6.6	1130	遷移-Plume
5	8.5	0.01520	3.5	770	Plume

(a) ブルーム流動(Run 4)

(b) ジェット流動(Run 1)

写真-1 渦動とゆらぎの成長過程

とともにほぼ線形に成長しており、それにともなうブルーム軸が揺らいでいるように見える。また、図中にA, Bで表示した渦運動のように合体現象も時折観察される。

これに対して、ジェットでは染料塊は連続的に拡がっており、個々の渦動の規模は小さく、且つ渦動は左右断面で独立に不規則に挙動しているものと予想される。

(b) 連行加入形態

ジェットとブルームの渦構造の違いが連行形態にも影響を及ぼす。そこで、着色した不溶性のトレーサー（キシレン+四塩化炭素）を周囲環境水に注入し、粒子をラグランジェ風（ラグランジュ）に追跡して連行形態の把握を試みた。写真-2～4は連続撮影した一部である。

ジェットにおけるトレーサーの一部は主流に取り込まれるが、大部分は界面近傍の周囲環境水中に滞留する。その一部はジェット内外の速度差により引きずられるように界面に沿って移流し、その過程で小規模な渦動によってジェット内に連行される。連行されたトレーサーはジェット全幅に拡散されずに、界面に沿って流下する（拡散型—写真-2.1）。一方、滞留していたトレーサーの大半は大規模渦動の通過に出会って初めてジェットに連行され、ジェット全幅に拡散される（移流型—写真-2.2）。

他方、ブルームにおいては界面の凸部に注入されたトレーサーは連行されずに界面に沿って移流し、凸部界面の通過直後に主流に連行される。その後、トレーサーはブルーム全幅に拡散される（移流型—写真-3）。また、界面の凹部に存在するトレーサーは直接渦構造に取り込まれ、拡散されずに渦とともに流下する（写真-4）。このパターンの連行は渦同士の合体をとまわずに周囲環境水を取り込んで成長する過程を示しており興味深い。

全連行量の大部分を占めるのは界面の凹部から混入する大規模な移流型の連行である。とくに、ブルームでは非対称になった凹部からトレーサー群が交互に中心軸に向かって大きく取り込まれるのが観察される

写真-2 ジェットの連行過程

写真-3 ブルームの連行過程

写真-4 ブルームの連行過程

(写真-3)。ジェットにおいてもブルームと同様の移流型連行も観察されるが、その規模はそれほど大きくない。また、両側の渦構造が独立に挙動しているために、移流型の連行は間欠的にしか生じないようである。

移流型連行におけるトレーサーの挙動と渦構造の通過との関係を示したのが図-2である。流跡は0.4秒間隔で表示した。ジェット・ブルームともに連行は基本的に同様の機構で生じる。まず、界面に近づいてきたトレーサーは界面の凸部の流下により斜め上方あるいは外側にはじき出される。そして、凸部の頂点にきたときに一旦静止し、その後一気に中心軸に向う速度が増し、界面の凹部に吸い込まれ、図-2 渦構造の通過にともなう連行粒子の流跡の変化

図-2 渦構造の通過にともなう連行粒子の流跡の変化

図-3はトレーサーの移流速度を渦構造との相対的な位置関係より位相別に分類して示す。移流速度はベクトル表示しており、また軸上流速 U_E で無次元表示した値 V_r/U_E を併記している。トレーサーの移流方向は各位相ともジェットとブルームとで大差はみられないが、 V_r/U_E の絶対値は各位相ともブルームの方がジェットよりも約20%程度上回っている。とくに、主流に連行される位相3では1.4倍近い速度差になっている。

図-3 連行粒子の位相別移流速度

つぎに、トレーサー群の連行周期 T を U_E ならびに半値半幅で無次元表示したストローハル数 $St (=v_{0.5}/TU_E)$ を表-2に示す。ブルームの St はジェットのそれの約1.4倍と大きく、しかも比較のために併記した流速変動等の St と非常によく一致している。つまり、渦動の挙動に強く関連して連行が生じていることを示唆する。これに対して、ジェットでは連行周期と渦構造の卓越周期とは必ずしも一致していない。積分モデルで定義される連行係数は上記の V_r と St の積に比例すると考えられることから、両流動の連行能の差異は渦構造の配置、強さおよび規模と強く関連しているものと予想される。

表-2 卓越周期 (St 数) の比較

物理量	Jet	Plume
流速変動 u	0.084	0.114
" v	0.064	0.104
温度変動 t	0.062	0.104
界面変動	0.060	0.121
連行	0.075	0.104