壁面上の一様な浮力フラックスによって発生する傾斜プルームのPTV計測

道奥康治[○] (神戸大学), 藤田一郎 (神戸大学)

高橋俊之 (復建調査設計株), 藪本圭一郎 (株マイカル)

PTV of An Inclined Plume Generated by Uniform Buoyancy Flux on A Sloping Wall

Kohji MICHIOKU, Ichiro FUJITA, Toshiyuki TAKAHASHI and Kei-ichiro YABUMOTO

ABSTRACT

A PTV analysis was performed to examine flow structure of a plume that is generated by buoyancy flux discharge imposed on an inclined boundary. Fine nylon particles of $60\mu\text{m}$ in diameter and 1.02 in a specific weight were used as tracers. The flow field was illuminated by a laser light sheet. Velocity profiles and streamlines from the PTV were compared with a theoretical solution that was obtained from a self-similarity flow analysis. They agreed quite well and the present visualization and the PTV were verified to be a useful measurement tool for such a slow and stratified flow. Performance of the tracer particles was rather satisfactory, despite it is usually difficult to keep tracer particles buoyantly neutral in a stratified flow system.

Keywords: Plume, PTV, Stratified flows, Thermal buoyancy, Tracer particles, Self-similar flow

1. はじめに

実験室で再現される密度流は緩やかで流れの規模も小さいため、プローブ型流速計による計測は困難である。また、密度変化をとめない光が屈折するので、低流速に対応できる LDV を用いても計測誤差をとめない。以上のことから密度流に対して信頼性の高い流速計測を行うためには、可視計測に頼らざるを得ない。成層せん断流のように流速がある程度大きい流れでは浮力の影響が相対的に小さいので、流れに追従性のよいトレーサ粒子を容易に選定できる。しかし、流速が小さい場合にはトレーサ挙動におよぼす浮力効果を見逃さず、長時間にわたり中立浮遊状態を維持するトレーサ粒子の選定と適切な可視化が計測上の重要なポイントである。本報告で対象とする流れは、流速が $0(0.1\text{cm/sec})$ で流れの層厚スケールが $0(1\text{cm})$ 程度の緩やかで微細な熱密度流である。計測に際してはトレーサとして微細なナイロン粒子を採用し、レーザー光膜による流れの可視化と PTV (Particle Tracking Velocimetry) による流速解析を実施した。密度差のために投入した大部分の粒子は沈降するが、わずかに残留した粒子が中立性と追従性に優れていることがわかり、画像解析が可能となった。流速分布や流跡線(流線)は、別途実施した流れの自己相似解析による理論解と比較され、良好な一致を得た。これより、本実験で採用した粒子と可視化手法が熱密度流計測にも

Fig.1 Plume systems in the present experiment model and a reservoir prototype

適用できることを確認した。

2. 対象とする密度流

対象とする流れを Fig.1(a)に示す。一定の角度 θ で傾斜した固定壁面の温度 T_w が一定に保たれ、その下面に壁面傾斜 Plume が発生する。Plume は浮力の斜面方向成分のみによって駆動され、質量供給をとめない自由対流である。これは、有機汚濁が進行した貯水池におい

て底層が貧酸素化し、栄養塩や金属成分の底泥からの嫌氣的溶出によって湖底に生成された汚濁水塊の重力流れ (Fig.2) を模擬したものである。汚濁 Plume は貯水池底層に栄養塩や金属成分などを集積させ、水質環境の悪化を促進する^{1),2)}。貯水池の流れは Fig.1(b) のようにモデル化される。その駆動力は汚濁水の塩分浮力であるのに対し、実験モデルの Plume は熱浮力により駆動される。また、実現象とモデルは上下逆であるが、熱浮力と塩分浮力が理論的に相互換算されるので、両者の力学的相似は保証されている。

3. 実験方法

3.1 実験装置

Fig.3 のように、縦 1.5m×横 1.0m×高さ 1.1m の側面ガラス張り水槽の中に、長方形断面（幅 15cm×側壁高さ 5cm×長さ 80cm）を有する透明アクリル製チャンネルを所定の傾斜角度 θ で取り付ける。チャンネルの底面には、アルミ板で被覆されたラバー・ヒーターが装着され、一様な熱フラックスが供給される。水槽を上水で満たして静置した後、ヒーターに電力を供給すると傾斜面をブルームが遡上し始める。約 10 分程度で流れは定常になる。チャンネルを流下した温水ブルームは、下流端で水槽内へベント・オーバーし拡散する。水槽容量が十分大きいので、実験時間中の周囲水の水温上昇は小さくブルームの定常性は十分保証される。ヒーターへ電力を供給しながら計測水温がモニタリングされ、周囲水とヒーター面の温度差が一定値 T_0 に保たれるように PC から SSR (Solid State Relay) へ (ON/OFF) 制御信号を送り、ヒーター出力が制御される。

3.2 トレーサー粒子

トレーサーは、平均粒径 $60\mu\text{m}$ 程度に破砕された比重 1.02 のナイロン粒子である。密度流では場所的、時間的に密度が変化するため、厳密には中立浮遊粒子は存在しない。本実験の作業水温は 10°C 程度であり、トレーサー粒子とは 0.02g/cm^3 以上の密度差を有する。これは、淡水と海水の密度差、あるいは 50°C 以上の水温差に相当する。これに対し、本実験で対象とする Plume は、水温差が高々 10°C 程度の熱密度流である。

トレーサー粒子を水槽へ投入後約 10 分以内にその大部分は沈降する。密度調整のために食塩を投入すると、粒子のマイナス電荷がキャンセルされてフロックが形成され粒子沈降はさらに進む。界面活性剤はフロキュレーション防止には有効に作用しなかった。これより、作業流体の密度調整は困難と判断し、おおよその沈降終了段階で残留するわずかのトレーサー粒子を用いて画像計測を実施することとした。一部の粒子が残留する原因は明らかではないが、平均粒径よりも微細な粒子成分に何らかの物理化学的要因が作用しているものと推察される。

しかし、これらも約 30 分～1 時間程度経過すると最終的に沈降し、画像計測が不可能となる。結果的には実験

Fig.2 Polluted waters running down a sloping reservoir bed

Fig.3 Experimental system

開始前の約 20 分の静置時間と微細粒子沈降までの数十分間だけが計測可能な粒子浮遊状態であった。

3.3 可視化と画像解析

空冷アルゴン・イオン・レーザー (1W) を光ファイバー・ケーブルで水槽側壁に導光し、ビーム・エキパンダーにより約 3mm 幅の光膜に整形して流れを可視化した。粒子数と流速の制約条件から流程方向 60cm 程度の計測区間を 6 分割し、モノクロ CCD カメラとデジタル・ビデオを用いて撮影・記録した。流れは壁面に沿う厚さ約 10mm 程度の境界層流であること、粒子数が限定されることから、PIV ではなく二値化相関法による PTV³⁾を採用した。1/6 秒間隔で約 100 枚の画像データを取り込み解析した。

3.4 水温計測

水温は、Kタイプ熱電対 (アルメル・クロメル) を用いて鉛直方向 0.1cm 間隔の 20 点で計測され、1sec のサンプリング間隔によりデータロガー経由でハードディスクに記録される。壁面水温は、前述のようにヒーター出力の制御に用いられ、底面と周囲水との温度差 T_0 が一定に維持される。水温分布は上流端から $x=13, 19, 25, 31, 37, 49\text{cm}$ の 6 断面で計測された。

3.5 実験条件

壁面と周囲水の温度差が $T_0=3.6\sim 9.7^\circ\text{C}$ 、壁面の傾斜角度が $\theta=15, 30, 45, 60, 75^\circ$ の範囲で合計 15 ケースの実験を行った。

4. 流跡線 (流線), 流速分布, 浮力分布

Fig.4 にビデオ画像の時間的重ね合わせから得られたトレーサー粒子の奇跡を示す。壁面が水平となるよう

Fig.4 Streaklines from tracer particles superimposed by theoretical streamlines ($T_0=8.5^\circ\text{C}$, $\theta=75^\circ$)

Fig.5 Measured velocity vectors compared with theoretical streamlines ($T_0=9.7^\circ\text{C}$, $\theta=45^\circ$)

に画像を- θ だけ回転して表示している。Plume は定常であり、下方から周囲水を連行して壁面に沿う流れを形成している。周囲水の連行は上流ほど強く、下流に至るほど壁面に平行な流れが発達している。このような流れの構造は、同図に併記する流線の理論値（後述）と良好に一致している。Fig.5 は、PTV によって得られた流速ベクトルを同様に表現したものであり、やはり流跡線（流線）の理論解と一致している。

Fig.6 は、流程方向距離 x にもなう流速分布 $u(z)$ の変化をあらわす。図中の曲線は後述の理論解である。壁面からの浮力供給により流れが加速され、流速が x とともに増加することが確認できる。

Fig.7 には壁面の傾斜角度 θ にもなう流速分布の変化を、Fig.8 には壁面での水温偏差 T_0 にもなう流速分布の変化を示す。 θ が大きいほど、また T_0 が大きいほど有効重力の x 方向成分が増加して流れが加速されることが確認できる。

5. 理論解析の概要

ここで対象とする傾斜 Plume は境界層流であること

から、流速・水温分布の自己相似性を仮定して解析を行った。流れは非圧縮性の二次元定常流とし、Boussinesq 近似と境界層近似を適用する。

貯水池の塩分浮力 Plume を想定して、Fig.1(b)の座標系を対象とする。底面で一定濃度 C_b を有する物質が濃度フラックス、 $F_{C0} = -\kappa_C (\partial C / \partial z)|_{z=0}$ の割合で底面から溶出する。ここで、 κ_C は濃度 C の拡散係数である。溶出した流体塊には相対浮力 $\beta C g$ が作用し、傾斜面上をプルームとして流下する。ここで、 g は重力加速度、 β は物質の浮力換算係数である。連続条件と運動量・物質の保存則から、定常プルームの流速と濃度分布の解 $u(x, z)$, $C(x, z)$ を求める。

変数 η , 流れ関数 ψ , 濃度 C を

$$\eta = axx^{-l}, \quad \psi = bx^m F(\eta), \quad C = ex^n G(\eta) \quad (1)$$

とにおいてこれらを基礎方程式に代入すると、相似関数 $F(\eta)$, $G(\eta)$ に関する二元連立常微分方程式を得る。底面と無限上方での境界条件を用いてこれらを数値積分すると $F(\eta)$, $G(\eta)$ の解を得る。係数 (a, b, e, l, m, n) は流れの自己相似性に必要な条件などから定められる。今、

$$P_c = (U_0 L_0) / \kappa_C = 1, \quad U_0 C_0 = U_0 C_b = F_{C0}$$

の関係を満足するような代表スケールの組み合わせ

 Fig.6 Dependency of $u(z)$ on x .

 Fig.7 Dependency of $u(z)$ on θ .

 Fig.8 Dependency of $u(z)$ on T_0 .

$$[\text{長さ}] \quad L_0 = (\kappa_c^{-2} C_b \beta g \sin \theta)^{-1/3},$$

$$[\text{速度}] \quad U_0 = (\kappa_c C_b \beta g \sin \theta)^{1/3},$$

$$[\text{濃度}] \quad C_0 = C_b,$$

を用いると, 式(1)の無次元表示が次のように得られる.

$$\left. \begin{aligned} \eta &= \tilde{z} \tilde{x}^{-1/4} = (z/L_0)(x/L_0)^{-1/4} \\ \tilde{\psi} &= (\psi/U_0 L_0) = \tilde{x}^{3/4} F(\eta) = (x/L_0)^{3/4} F(\eta) \\ \tilde{C} &= (C/C_0) = G(\eta) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

塩分プルーム系と熱プルーム系の諸量は, $\alpha T \Leftrightarrow \beta C$, $\alpha H_S \Leftrightarrow \beta F_C$, $\kappa_T \Leftrightarrow \kappa_C$ の関係を用いて相互換算される. ここで, T は水温, α は熱膨張係数, κ_T は熱拡散係数, H_S は底面熱フラックスである.

6. 流れの自己相似性の検証

理論の前提となる流れの自己相似性を検証するために, 水平流速 u の画像計測値を式(2)₂に基づく相似関数表示

$$\tilde{u} \tilde{x}^{-1/2} = (u/U_0)(x/L_0)^{-1/2} (= F'(\eta)) \quad (3)$$

に規準化し, $\eta = (z/L_0)(x/L_0)^{-1/4}$ の関数として整理する. ここで, $\tilde{u} = \partial \tilde{\psi} / \partial \tilde{z}$ である. 式(3)は任意の測点座標 (x, z) における流速が η だけの関数として表示できることを意味しており, 粒子が存在する点での流速しか得られない PTV の計測結果を整理する上で都合がよい. u の画像計測値の相似関数表示と理論解 $F'(\eta)$ との比較を Fig.9 に示す. あらゆる粒子点で得られた流速が, 実線で表示される $F'(\eta)$ と一致しており, 画像計測と理論解析の妥当性が検証された.

7. むすび

作業流体との比重差を有するトレーサー粒子でも, 微細粒径成分をフィルタリングすれば, 低速密度流の画像計測が可能であることを示した. しかし, 依然として粒子は緩やかながらも沈降するために計測時間に制約がある. 定常に至るまで準備時間を要する現象や長時間計測

Fig.9 Normalized velocity from all measurement points compared with a self-similarity solution.

が必要な場合には適用できない. 密度流の実験においては, 計測対象と粒子特性の組み合わせを考慮して, 最適な画像計測法を選定することが重要である.

本実験のデータ整理には, 神戸大学大学院, 松尾昌和, 古澤孝明両氏のご協力を得た.

参考文献

- 1) 道奥康治・神田徹・中村篤史: 異常水温成層を呈する富栄養貯水池の熱塩循環, 第4回環境流体シンポジウム(1999).
- 2) 高橋俊之, 道奥康治, 松下研一: 傾斜湖盆上の塩分溶出により発生するプルーム, 第54回土木学会年次学術講演会講演概要集, II-263 (1999) pp.528-529.
- 3) 藤田一郎, 遠松篤: 画像解析による開水路乱流場の空間計測, 応用力学論文集, Vol.1 (1999) pp.627-636.