

ジェットポンプ式流動装置における混合管内の混合過程の可視化とその評価

呉工業高等専門学校専攻科 学生会員 ○佐野 一輝

広島大学工学部 学生会員 玉置 尊

呉工業高等専門学校 正会員 黒川 岳司

1. はじめに

ジェットポンプ式流動装置（図1）は、成層化した水域の成層を破壊・緩和する装置である。黒川ら¹⁾は、混合管内で駆動水と吸引水が十分に混合するには、混合管長 l と管径 d の比 l/d が 5~6 程度必要であると実験的に明らかにしている。一方、本多ら²⁾は、PIV 計測により混合管内の流動を可視化した結果 l/d が 10 程度必要と結論付けており、両者の見解にずれが生じている。また、黒川ら³⁾によって PIV 計測による混合過程の研究も進められてきたが、上述の通り混合管に長さを要することから管全体を一度に計測することができず、測定の妥当性に疑問が残っている。そこで本研究では、一度で混合管全体の PIV 計測ができるまで装置を縮小化させたうえで、装置条件の違いによる混合過程の評価を行うこととした。

2. 実験方法

2.1 PIV 計測の方法

開水路（幅 0.6m×長さ 10m×高さ 0.6m）に水深 0.43m まで貯水し、駆動水を噴出するノズル（ノズル管径 $\phi=0.9$ cm）と混合管を図1のように設置する。なお、混合管は管径 $d=3.2$ cm のアクリル円筒管を用い、管長は $l=20$ cm ($l/d=6.3$)、 $l=30$ cm ($l/d=9.4$)、 $l=40$ cm ($l/d=12.5$) の3種類とした。混合管内の PIV 測定は、水路床からレーザーを照射し、混合管の吸引部付近からトレーサーを流し、水路側面からハイスピードカメラで撮影したデータを二次元流体解析ソフトウェア（ディテクト Flownizer2D）で解析した。なお、撮影速度は 1000FPS に設定して約 6 秒間撮影し、このうち 2 秒程度はトレーサーが供給されている状態とした。

3. 実験結果及び考察

3.1 混合管内の流動解析

図2に PIV 計測によって得られた各混合管のある瞬間の流速ベクトルの様子を示す。流下方向は図の矢印で示す方向で、ベクトルが青いほど遅く、赤いほど速い流れを表している。どの管も共通して、ノズルからの駆動水の影響により、まず混合管の入り口付近は中心部の流速が大きくなっており、流下に伴い中心から上下方向の流れが見られ、駆動水が壁面に向かって拡がっていることが分かる。一方、壁面付近の流れは中心に向かっていくような傾向が見られた。

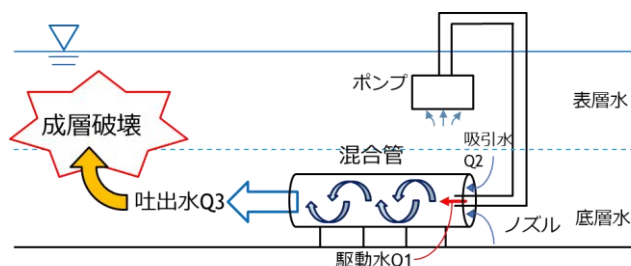


図1 ジェットポンプ式流動装置

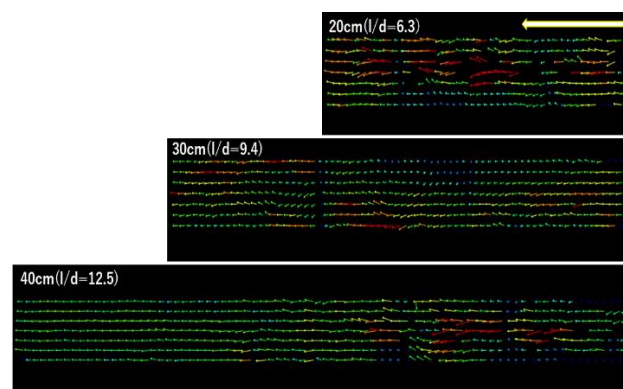


図2 各混合管内での流速ベクトル

それぞれの管長について比較してみると、20cm 管 ($l/d=6.3$) では管の後半部でも流速ベクトルに大きさ、向きともばらつきがあり、混合が完了していないといえる。30cm 管 ($l/d=9.4$) でも、出口付近では幾分一様になっていく様子が見られるものの、20cm ($l/d=6.3$) 管と同じような流速のばらつきが見られる。これらに対して、40cm 管 ($l/d=12.5$) では、約 25cm 流下地点以降において明らかに流速が一様になっており、混合が完了していることがうかがえる。この流速が一様になる 25cm 地点は、30cm 管においては一様になっていないことは特徴的である。

ベクトルの向きに注目すると、上部または下部に拡がる蛇行のような形が見られるが、これは瞬間的なものであり次の瞬間には方向が変化していた。つまり、混合管内では蛇行が時々刻々と不規則に動揺しながら流下していることが分かった。

キーワード ジェットポンプ式流動装置, 混合管, PIV, 可視化

連絡先 〒737-8506 広島県呉市阿賀南 2-2-11 呉工業高等専門学校 TEL.0823-73-8481

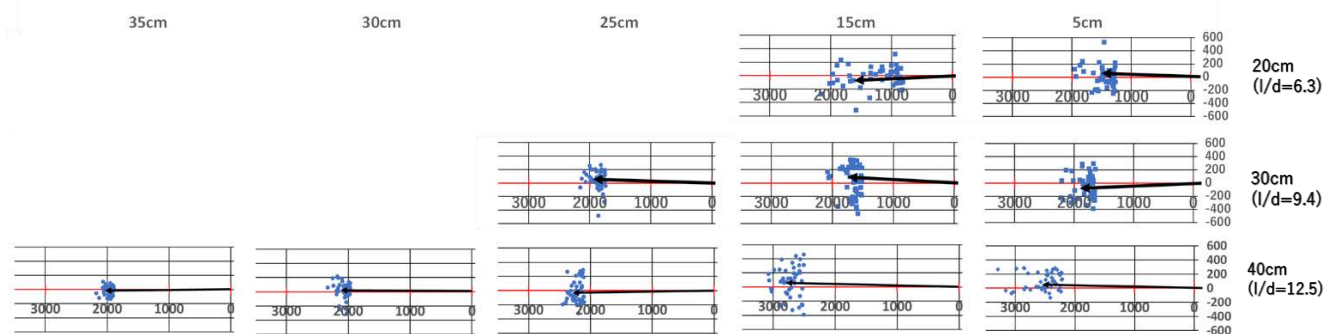


図3 各混合管の各地点における流動の変動特性（横軸：流速 U (cm/s)，縦軸：流速 V (cm/s)）

3.2 地点ごとの流動の変動特性

次に混合管の各地点での流れの変動の特徴を捉えるために、図3に各混合管のそれぞれの地点の、管中心から上部0.5cmの位置での流速ベクトルの変動の様子と、その散布データの平均値を黒色の矢印で示す。管長40cm ($l/d=12.5$)の混合管内の変動性について、5cm地点および15cm地点では流下方向、鉛直方向とも広くばらつきが見られ、5cm地点よりも15cm地点の方がばらつきが大きい。これは、ノズルからの駆動水が管の中心から壁面に向かって拡がる流れが発生しているためである。そして25cm、30cm地点と流下するにしたがって、ばらつきが小さくなっていき、35cm地点で最も散布がまとまっている。つまり管長40cm ($l/d=12.5$)の混合管では、25cm地点で混合がほぼ完了し、出口付近では完全に混合していることが分かる。管長20cm ($l/d=6.3$)の混合管の5～15cm地点の流速ベクトルのばらつきの変化は、管長40cmの5～15cmの変化と似ており、駆動水と吸引水の混合域が流下とともに拡がっていることが分かる。管長30cm ($l/d=9.4$)の混合管も5～15cm地点においては40cm混合管と同様の流れが見て取れるが、同じ25cm地点で比較すると管長40cmの場合よりもばらつきが大きい。これは30cm管 ($l/d=9.4$)と40cm管 ($l/d=12.5$)の25cm地点では、混合管出口まで残りの長さに差があり、その出口付近の流れが25cm地点の流れに影響を与えていると考えられる。つまり、本実験の40cm管 ($l/d=12.5$)のように出口地点で混合が完了している場合、その影響が上流側に（今回の条件では25cm地点当たりまで）遡及することが示唆された。

3.3 吐出流量の実測による吸引性能の評価

図4にノズル流量に対する吸引流量の比 Q_2/Q_1 と混合管の管径に対する管長の比 l/d の関係の実測値と理論値¹⁾の結果を示す。図より管長10cmの混合管では、 Q_1/Q_2 が実測で2.19倍であり、理論値との比較から分かるように、混合管内での混合が不完全なことに起因して吸引性能が低いことが分かる。これに対して、管長20cm、30cm、40cm ($l/d=6.3, 9.4, 12.5$)の混合管では2.64倍 ($Q_2/Q_1=2.64$)に増加し、十分な吸引性能が発揮されていることを示している。なお、管長58cm ($l/d=18.1$)では2.60倍に低下しているが、これは管長が延びたこと

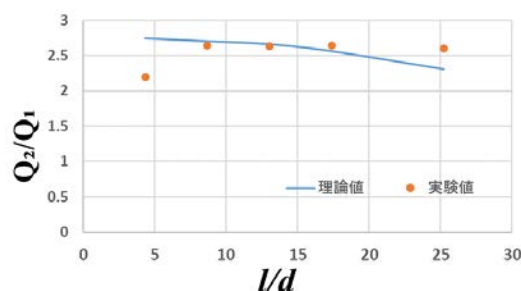


図4 ノズル流量と吸引流量

による摩擦損失の増加の影響である。ここで注目すべきは、混合管内の混合が不完全である管長20cm ($l/d=6.3$)や30cm ($l/d=9.4$)でも十分な吸引性能を発揮していることである。つまり、吸引性能に関しては、管内の混合の完了に必要な10倍以上の管長は必要なく、5～6倍程度の長さで十分な吸引を満足することが明らかとなった。したがって、必要な管長に関する黒川ら¹⁾と本多ら²⁾の見解のずれの理由を明確にすることができた。

4. おわりに

本研究で得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 混合管内の混合の進行度合いは、混合が完了しているか否かによって異なり、出口地点で混合が完了する場合、その影響が上流側に遡及する。
- (2) 混合管内では、瞬間的に蛇行のような流れが見られるが、この流れは時々刻々と方向が変化しながら流下している。
- (3) 混合管内で混合が完了するには管径に対する管長の比が10倍以上必要であるが、混合管の吸引性能に関しては、5～6倍程度の長さで十分な吸引性能を発揮する。

参考文献

- 1) 黒川岳司, 小谷拓弥: ジェットポンプ式流動装置の装置形状と流動特性の関係に関する研究, 土木学会論文 B1 (水工学) Vol.71, No4, 1_799-1_804, 2015.
- 2) 本多康平, 黒川岳司, 森 飛鳥: ジェットポンプ式流動装置の吸引・混合性能に及ぼす装置形状の影響, 土木学会第76回年次学術講演会講演概要集, II-174, 2020.9
- 3) 黒川岳司, 大田涼人: ジェットポンプ式流動装置の混合管長さが混合管内の流動特性に及ぼす影響, 第74回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, II-13, 2022.5