

ジェットポンプ式流動装置における吸引作用の性能評価の高度化

広島大学 学生会員 ○玉置 尊 呉工業高等専門学校専攻科 学生会員 佐野 一輝
呉工業高等専門学校 正会員 黒川 岳司

1. はじめに

閉鎖性水域の水質汚濁対策の一つとしてジェットポンプ式流動装置（図1）による方法がある¹⁾。この装置の機構の特徴として、混合管内での混合によって吸引が生じることから、装置形状、特に混合管の管径 d と混合管長 l の比 l/d が吸引性能に大きく影響することになる。吸引性能の評価には流量の算定が必要であるが、黒川ら¹⁾は、モデル実験において混合管吐出部で流速分布を計測し、その積分値から流量を求め、十分な吸引水量を得るには l/d が5～6倍必要であることを明らかにした。一方で、本多ら²⁾はPIV計測によって、混合管内での十分な混合には l/d が10倍以上必要という結果を得ており、両者に矛盾が生じている。そこで本研究では、吐出部分の流量を容積法で直接測定を試み、吸引性能の正確な評価につなげ、その時の流れの様子をPIV計測で見ることによって理論式との整合性を確かめた。

2. 理論式

ノズルから混合管の中に噴出された駆動水が吸引水と直ちに混合されるという仮定のもとで立てられた理論式¹⁾を以下に示す。

直径 d_1 、断面積 $A_1(=\pi d_1^2/4)$ のノズルから噴出される駆動水の流速を v_1 、流量を Q_1 、同じく吸引水は d_2 、 A_2 、 v_2 、 Q_2 、混合水は d_3 、 A_3 、 v_3 、 $Q_3(=Q_1+Q_2)$ とし、摩擦損失や各断面での形状損失を考慮してベルヌーイ式と運動量式を適用すると、駆動水と吸引水の流速比 v_1/v_2 は式(1)のように導かれる。

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (1)$$

a 、 b 、 c は各断面積と各種の損失係数を含み、式(2)～式(5)のように表される。

$$a=(k_1+k_3 \frac{A_1^2}{A_3^2}), \quad b=(2k_3 \frac{A_1 A_2}{A_3^2}), \quad c=(k_2+k_3 \frac{A_2^2}{A_3^2}) \quad (2)$$

$$k_1=(-2f_{se}+\alpha)A_1 \quad (3)$$

$$k_2=(-2\alpha+f_e+f_1 \frac{l_1}{d_1})A_2 \quad (4)$$

$$k_3=(-f_2 \frac{l_2}{d_2}-1)A_1+(2-\alpha+f_o+m f_b+f_2 \frac{l_2}{d_2})A_3 \quad (5)$$

ここで、 f_{se} ：急拡大損失係数、 f_e ：入口損失係数、 f_b ：屈曲損失係数、 m ：屈曲部分の数、 f_1 、 f_2 ：各区間(l_1 、 l_2)での摩擦損失係数、 α ：エネルギー補正係数($\alpha=1.1$)である。

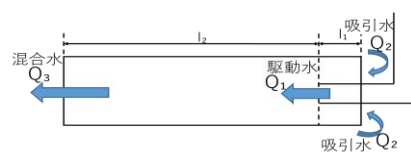


図1 ジェットポンプ式流動装置

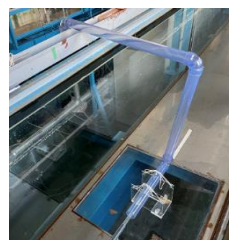


写真1 容積法①（混合管を水路外まで繋げて測定）



写真2 容積法②（吸引側と吐出側を仕切って測定）

したがって、連続式から、駆動水に対する吸引水の流量比 Q_2/Q_1 は式(6)で表すことができる。

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{A_2}{A_1} \cdot \frac{v_2}{v_1} = \frac{A_2}{A_1} \cdot \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{-1}$$

3 実験方法

本研究では、直径1.3cmのノズルと管径 $d=3.2$ cmの混合管のモデル装置を主に使用した。混合管長 $l=20$ cm ($l/d=6.25$)、30cm ($l/d=9.34$)、40cm ($l/d=12.5$)の3種類について、水深0.4mまで貯水した開水路（幅0.6m、高さ0.6m）に設置し、PIV計測を行った。

吐出水流量 Q_3 の容積法による測定は、二つの方法を試みた。容積法①、②とする。まず、容積法①（写真1）では、混合管を3つの90°の継手で繋げ、直接吐出水を水路外に導いて測定した。この場合、混合管の総延長が $l=165$ cm ($l/d=52$)となった。これは、ジェットポンプ式流動装置としては有り得ない l/d であり、流動性能の評価の上では3か所の屈曲による損失の算定にも正確性が求められることから、実際の l/d の範囲で測定可能な容積法②（写真2）を考案した。混合管が通る穴を開けたコンテナを2つ用意し、ノズルと混合管入口（吸引側）部分を上流側のコンテナ内に納め、混合管出口からの吐出水を下流側のコンテナで受けられるよう

キーワード ジェットポンプ式流動装置、混合管、吸引性能、容積法

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

に、混合管で両コンテナを繋げる形で設置し、流量測定時は上流側コンテナに給水して一定水位を保ちながら、下流側のコンテナを用いて吐出水の流量を測定した。なお、測定法②では、PIV 計測で用いた管長以外に $l/d=10$ cm ($l/d=3.13$) と $l=58$ cm ($l/d=18.13$) でも測定した。

4. 実験結果および考察

図 2 は、容積法①の駆動水に対する吸引水の流量比 Q_2/Q_1 と l/d の関係である。継手をその曲率半径から屈曲（損失係数 $f_b=0.35 \times 3$ か所）として求めた理論値よりも実験値はかなり小さく、吸引が少ないことが分かる。この原因として継手の内側部分は直角になっており、屈曲よりは屈折に近い形状であることや、混合管（円管）とのつなぎ目の凹凸の影響が考えられる。そこで継手を屈折 ($f_b=0.986 \times 3$) と仮定した線が黒色の線であり、実験値とほぼ一致している。したがって損失の状況によって吸引性能も大きく影響されることが分かる。

図 3 は、容積法②の結果である。 $l/d=3.13$ (管長 10cm) は短すぎるため混合される前に吐出され、 Q_2/Q_1 の実測値は理論値より明らかに小さく吸引性能が低い。これに対して、 $l/d=6.25$ 以上の混合管では Q_2/Q_1 が実測で 2.6 以上で理論値に近い。したがって、 l/d が約 6 倍以上で十分な吸引性能が発揮できることが実証できた。

図 4 と図 5 は、 l/d が約 6~12 倍と十分な吸引性能を得られるときの混合管内の流動の様子（図 4）と流速分布（図 5）である。図 4 より $l/d=9.34$ までは流速ベクトルが様々で混合が完了していないが、 $l/d=12.5$ になると一様な流速ベクトルになっており混合が完了している。また図 5 の流速分布から $l/d=6.25$ は吐出付近でも駆動水の影響が卓越し混合が完了していないが、 $l/d=12.5$ では吐出付近では混合が完了し流速が一樣になっている。よって、本多ら²⁾の主張の通り、混合が完了するには $l/d=10$ 倍程度必要なことも確かめられた。

しかし、図 3 をみると $l/d=6.25$ (管長 20cm) 以降でも吸引性能はほとんど減少してないのに対し粗度係数 $n=0.0095$ を用いた理論値は l/d の増加によって吸引性能が低下し、実験値とのばらつきが生じている。これは理論式の「駆動水が噴出されたら吸引水と直ちに混合する」の仮定から管内全域で摩擦抵抗を考慮しているが、混合が完了するのは l/d が約 12 であり、 l/d が 12 までは n が半分の 0.0045 と摩擦の影響を小さく仮定した場合を黒色線で示している。実験値とほぼ一緒になっていることから、摩擦損失の評価方法の検討が必要である。

5. おわりに

本研究で得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 混合管内の混合が完了するには l/d が 10 倍以上必要だが、混合が完了していない l/d が 6 倍程度でも十分な吸引性能を得られることが確かめられた。
- (2) 理論式から吸引性能を見積る場合、摩擦損失や形状損失の評価の仕方が重要となる。

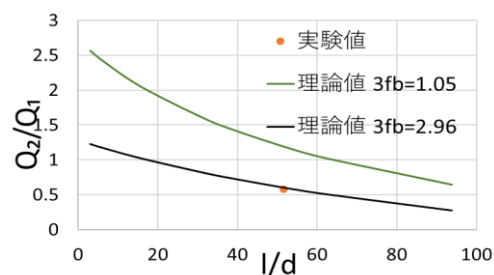


図 2 容積法①の吸引流量比

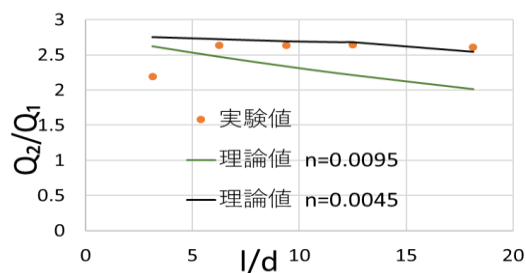


図 3 容積法②の吸引流量比

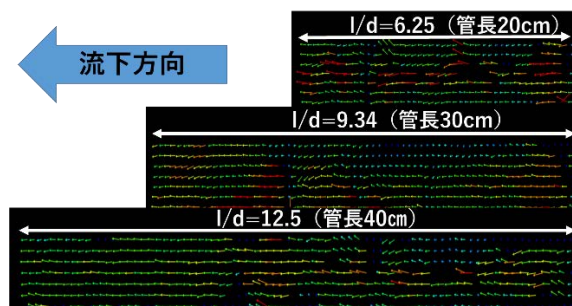


図 4 各 l/d での混合管内の流動の様子

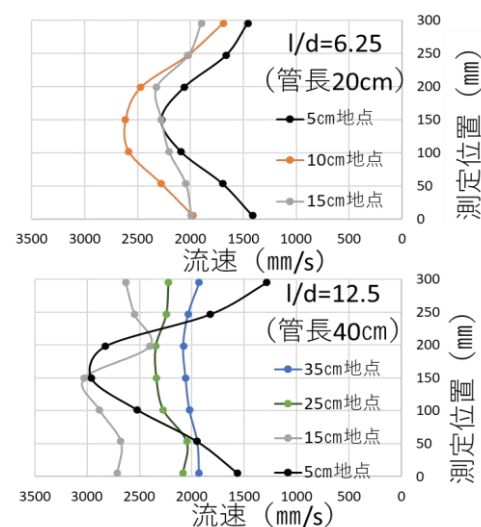


図 5 混合管内の流速分布の変化 ($l/d=6.25, 12.5$)

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 他: ジェットポンプ式流動装置の装置形状と吸引・混合特性の関係, 第 74 回土木学会年次学術講演会, II-27, 2019