

分配ヘッダにおける流れの均一化に関する研究 —粒子画像流速測定装置と熱流体解析による流れの可視化—

大内 崇史^{*1}

Study on Flow Uniformization in a Dividing Header

- Flow Visualization with Particle Image Velocity and Computational Fluid Dynamics -

Takafumi Ouchi

工業用途で流体を配管等の管路網内で循環あるいは槽内空間に噴出する際などにおいて、均一に分配させる要求があることが多い。本研究では、円管側面に10個の噴出口を設けた水中の分配ヘッダを対象に、水の分配に及ぼす噴出口径（分岐支管径）の影響を調べた。調査手法は、管路損失ヘッドの計算と数値流体力学による分配量の比較、数値流体力学と粒子画像測定による解析と実験の両者での噴流構造の可視化による比較である。結果として、噴流口径が大きいほど、分配量のばらつきが大きくなることがわかった。また、このような分配ヘッダにおいて、ばらつきを低減する汎用性のある手段として、主管径を大きくすることが効果的であることを確認した。

1 はじめに

工業製品や生産設備などにおいて、流体を配管等の管路網内で循環あるいは槽内空間等に噴出させる際に、均一に分配させる要求があることが多い¹⁾。このような場合、分配直後の各流路に流量計および流量制御機構を設けて、所望の分配量とすることは可能である。しかしながら、分岐流路構造そのものを適切に設計して各流路での制御を必要としない構造とすれば、流路全体を低圧損化することができ、配管設備としても簡素なものにすることが可能となる。

分岐流路における分配量の計算方法としては、管路損失ヘッドによる計算法がある。この計算法において、水道管インフラのように分岐後の配管による摩擦損失が圧倒的に大きい場合には、分岐損失を無視できるが、摩擦損失がそれほど大きくない場合には、分岐損失を考慮する必要がある。

分岐損失係数は、単純なT字分岐流路形状に対して提案されており²⁾、円形断面^{3, 4)}や正方形断面⁵⁾ではそれぞれ分岐流量比の二次関数の形式で整理されている。なお、乱流の場合、分岐損失係数はレイノルズ数にはほぼ関係なく形状によって決まるといわれている³⁾が、層流の場合⁵⁾や分岐部が干渉する場合⁶⁾なども考慮すると、分岐部が複数連なった多分岐管のような場合には、分岐損失係数の見積もりだけでも非常に複雑あるいは困難となる。そのため、多分岐管等の流体設計に

における分配流量の見積もりは、数値流体力学⁷⁾ (Computational Fluid Dynamics, 以下「CFD」という) による検討が一般的であると考えている。

そこで、本研究では、円管側面に10個の噴出口を設けた水中の分配ヘッダを対象に、水の分配に及ぼす噴出口径（分岐支管径）の影響を調べた。最初に、円形断面のT字分岐損失係数の整理式を用いて、管路損失ヘッドの計算により分配量を予測した。続いて、当研究所が保有⁸⁾するCFDおよび粒子画像流速測定装置 (Particle Image Velocity⁹⁾、以下「PIV」という) により、解析的および実験的に流れを可視化した。これらを基に、多分岐流路における流れの均一化について、汎用性のある設計指針を検討した。

2 研究, 実験方法

本研究が対象とする分配ヘッダの模式図を図1に示す。内寸294 mm角の透明性アクリル水槽内に水位240 mmで水を満たし、水中に設置した分配ヘッダを対象とした。分配ヘッダは外径φ25 mm、内径φ19 mm、全長230 mmのアクリル管であり、下部先端を封止した。先端封止面から7 mmの側面に噴出口を1つ設け、ここから軸方向に20 mm間隔でさらに9個の噴出口を設けた。水は、主管の上端面から鉛直下向きに3 L/minで供給した。分配ヘッダに設けた各噴出口には、水の供給口側から順に1, 2, …, 10の番号を割り当てた。本研究では、合計10個の噴出口径を全て同一径とし、水の分配量におよぼす噴出口径の影響を調べるため、φ2,

^{*1} 機械電子研究所

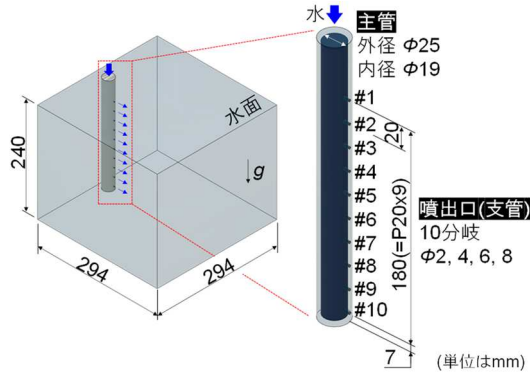


図1 研究対象とする分配ヘッド

φ4, φ6, φ8 mmの4種口径を対象にした。T字分岐損失係数の整理式を用いた管路損失ヘッドの計算, CFD, およびPIVによる方法をそれぞれ以下に述べる。

2-1 管路損失ヘッドの計算による方法

図2に示すとおり, i 番目の噴出口に分岐する前の主流速度を u_i , 噴出口からの噴出速度を v_i , 分岐後の主流速度を u_{i+1} とすると, i 番目の分岐前主流を基準にした, i 番目と $i+1$ 番目の噴出口への流線上の損失 Δp_i および Δp_{i+1} は, それぞれ式(1)と(2)で表される。

$$\Delta p_i = \frac{\rho}{2} (v_i^2 + \zeta_{12,i} u_i^2) \quad (1)$$

$$\Delta p_{i+1} = \frac{\rho}{2} \left\{ v_{i+1}^2 + \zeta_{13,i} u_i^2 + \left(\lambda_{i+1} \frac{L}{D_1} + \zeta_{12,i+1} \right) u_{i+1}^2 \right\} \quad (2)$$

ここに, ρ は流体の密度,

λ_i は i 番目の噴出口への分岐前の主管における管摩擦係数, $\zeta_{12,i}$ は主管から i 番目の噴出口への分岐損失係数, $\zeta_{13,i}$ は i 番目の噴出口を通過する主管方向の分岐損失係数, D_1 は主管管路直径, L は噴出口間隔である。各噴流は同一水槽中に噴出させているため, Δp_i および Δp_{i+1} は等しくなり, 式(1)と(2)を整理すると, 式(3)の関係が得られる。

$$v_{i+1}^2 - v_i^2 + \left(\lambda_{i+1} \frac{L}{D_1} + \zeta_{12,i+1} \right) u_{i+1}^2 + (\zeta_{13,i} - \zeta_{12,i}) u_i^2 = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, 9) \quad (3)$$

分岐損失係数は, 円形断面のT字分岐流路に対する整理式として文献³⁾で紹介されている伊藤の式⁴⁾を用い, ここでは分岐部内壁のコーナRをゼロとして, 式(4)および(5)により算出した。

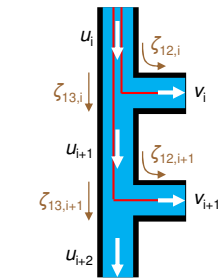


図2 分岐部の記号

$$\zeta_{12,i} = 1 - \left\{ 0.34 + 0.5 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \right\} \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)_i + \left\{ 0.5 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^4 + 0.64 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^4 \right\} \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)_i^2 \quad (4)$$

$$\zeta_{13,i} = -0.29 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)_i + 0.67 \left\{ 0.54 + 0.46 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \right\} \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)_i^2 \quad (5)$$

ここに, D_2 は噴出口径 (支管径), $(Q_2/Q_1)_i$ は i 番目の噴出口の分岐前主流に対する i 番目の噴出口からの分岐流量比である。本研究では, 式(3)から(5)および分岐部における質量保存則を連立して, Microsoft Excel 2019のソルバー機能を用いた繰り返し・収束計算を行い, 10個の噴出口からの分配量を算出した。なお, Excelのソルバーでは, 解決手法にエボリュージョナリーエンジンをを用いた。また, ヘッド先端側の噴出口10の流線上に生じる, 主流から噴出口への曲がり損失係数 $\zeta_{12,10}$ には, 式(4)の $(Q_2/Q_1)_{10}$ を1として算出した分岐損失係数の値を採用した。

2-2 CFDによる方法

ソフトウェアには株式会社ソフトウェアクレイドルのscFLOW (V2023.1) を用いた。乱流モデルはSST $k-\omega$ モデルを適用し, 境界条件として分配ヘッドの主管上端面から下向きに水3 L/minの流入を設定した。また, 水槽からのオーバーフロー排水を簡略化し, 水面に静圧0 Paを設定した。八分木オクタントサイズは, 水槽全体に10 mm, 噴流周辺 (深さ方向に200 mm, 噴出方向に180 mm, 噴流幅方向に20 mmの領域) に1 mm, 噴出口内部に0.3 mmとした。境界層の厚み係数は0.2, 厚みの変化率は1.1, 層数2としてメッシュを生成した。

2-3 PIVによる方法

図3に実験装置概略図を示す。水槽内の水および供給水にはトレーサ (カノマックス製 ORGASOL 0457, 比重1.03, 粒子径50 μm) を混入し, ポンプで分配ヘッドに供給して, ニードルバルブで流量を調整した。水槽からのオーバーフロー水を連続的に取り出し, 重量と時間の計測値から, 供給水の流量を得た。10個の噴出口中心を通る面にシート状のCWレーザを照射し, 照射面上のトレーサ粒子を光らせ, 高速度カメラ (フォトロン製 FASTCAM Nova S6) にて撮影速度1 kHzで100枚の画像を取得した。撮影像には, Lavision GMBH社製のDavis10によるPIV演算を行い, 流速分布を得た。

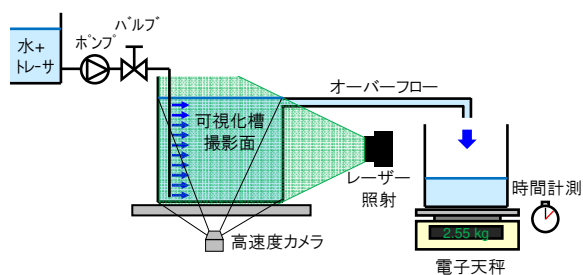


図3 PIVによる可視化実験装置

3 結果と考察

3-1 管路損失ヘッドの計算による方法

図4に、供給水量に対する各噴出口からの分配比率を噴出口径ごとに示す。噴出口径 $\phi 2$ mmでは、ほぼ均一な分配となったが、噴出口径を大きくするとばらつきが大きくなった。噴出口径 $\phi 8$ mmにおいては供給口に最も近い1番の噴出口に対する分配量が均一分配の場合の半分以下、最も遠い10番の噴出口では均一分配の約1.4倍の流量であった。

3-2 CFDによる方法

図5に、scFLOWで噴出口径ごとの解析により得た、噴流断面での流速コンター図を同一の等値範囲で示す。噴出口径が大きくなるほど、噴流の向きが下方に変化する傾向がみられた。また、図6には、各噴出口からの分配比率を図4と同様に示す。この結果から、管路損失ヘッドの計算とCFDによる分配量はおおむね一致する傾向を示した。管路損失ヘッドの計算に用いた分岐損失係数の整理式は、干渉のないT字分岐路に対するものであり、本研究における噴出口からの流れを、支管の流れとして取り扱うこととなる。図5から、噴出口径が大きくなると、噴流の向きが主流の流れの影響を受け、噴流が主管に対してT字とはいえない分岐形状となっている。すなわち、分岐損失係数の整理式から逸脱した流れとなる。そのため、管路損失ヘッドの計算による分配量と、CFDによる分配量は、噴出口径が大きい領域で、ばらつきの程度がやや異なる結果

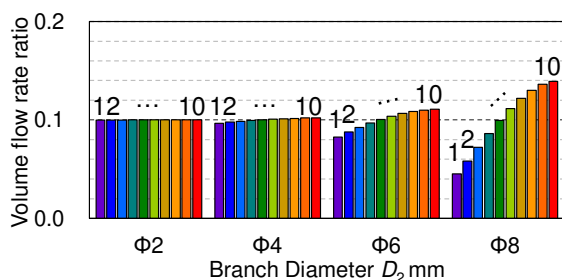


図4 管路損失ヘッドの計算による分配量

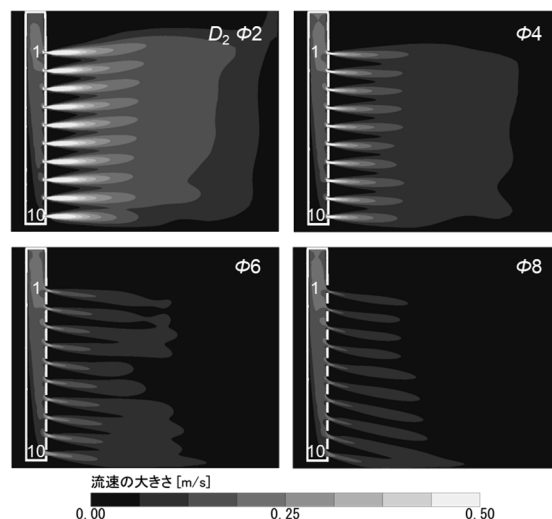


図5 流体解析に基づく分配量

を示したと推察している。

3-3 PIVによる方法

噴出口径ごとの撮影像100枚に対するPIV解析により得た流速分布を図7の上段に示す。ここでは、それぞれの噴出口径で等値範囲を変更している。なお、比較のため、CFDにより得た噴流断面の流速コンター図を図7の下段に示している。CFDの解析結果は、PIV解析結果と速度範囲を合わせて、等値表示もなるべく統一している。PIV解析では、噴出口近傍の流速が速い部分は捉えられていないが、10個の噴流による水槽内での流れの全体構造は概ね捉えられているように見える。特に、噴出口径が大きくなるほど、噴流の向きがやや下向きに変化する傾向が、PIVとCFDで一致した。

3-4 分配ヘッドの均一化についての考察

ここまでで、主管径および噴出口間隔がそれぞれ一定の場合の噴出口径の影響について検討し、噴出口径が小さいほど均一な分配となることが確認できた。本報告の最後に、主管径および噴出口間隔を変えた場合の分配量のばらつきについて、管路損失ヘッドの計算により考察した。分配量のばらつきが大きかった噴流口径 $\phi 8$ mmにおいて、主管径および噴出口間隔を変化

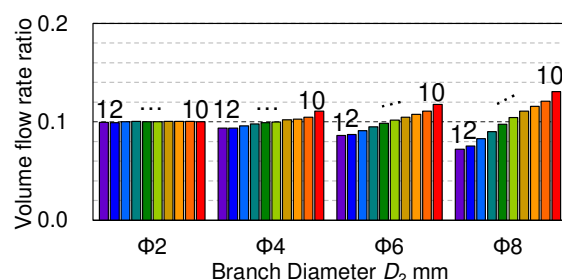


図6 CFDによる分配量

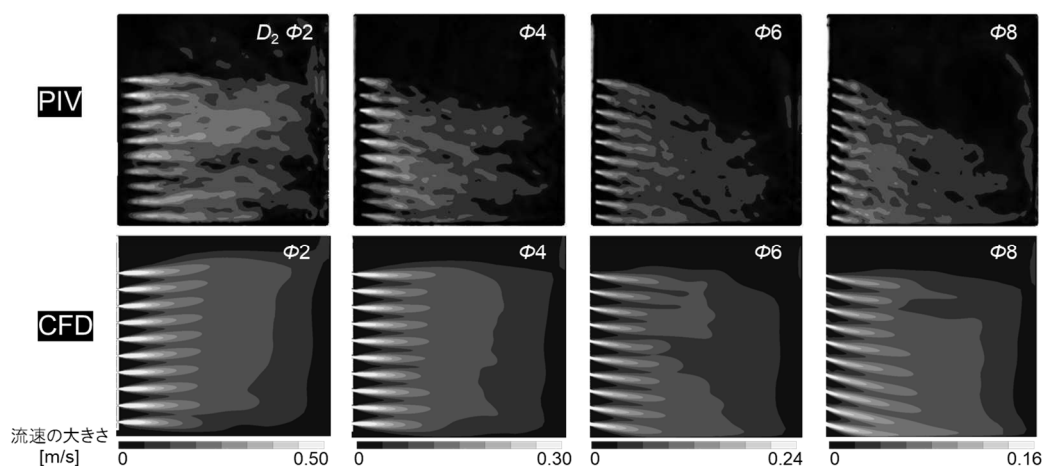


図7 PIVによる水槽内流れ可視化（CFD との比較）

させた場合の分配量を管路損失ヘッドの計算により算出した。結果を図8および9にそれぞれ示す。これらの結果から、主管径を太くして主管内流速すなわち慣性力を小さくすることで、分配量は均一化することがわかった。また、噴出口間隔を長くして主管部の摩擦損失を大きくすることで、供給口から遠い噴出口の流量を抑制できたが、一方で供給口に近い噴出口への分配量が大きくなりやすく、必ずしも均一化には至らなかった。そのため、噴出量を均一化する汎用性のある手段は、支管径は小さく、主管径は大きくすることであることを確認した。

4 まとめ

本研究では、円管側面に10個の噴出口を設けた水中の分配ヘッドを対象に、水の分配に及ぼす噴出口径の影響を調べた。結果として、噴流口径が大きいほど、分配量のばらつきが大きくなることがわかった。また、このような分配ヘッドにおいて、ばらつきを低減する汎用性のある手段として、支管径は小さく、主管径は大きくすることが効果的であることを確認した。今後は、流れの均一化などを目的とした熱流体分野の最適設計技術の研究に展開していく。

5 参考文献

- 1) 津島孝雄ほか3名：空気調和・衛生工学会論文集，26巻(82号)，pp. 67-76(2001)
- 2) 日本機械学会：管路・ダクトの流体抵抗，pp. 86-95，丸善(1979)
- 3) 津島孝雄，森川敬信：空気調和・衛生工学会論文集，10巻(28号)，pp. 21-31(1985)
- 4) 日本機械学会：分岐・合流管における流れの静特性 研究分科会研究成果報告書（1968）
- 5) 澤田亮一ほか2名：日本機械学会論文集，81巻(828号)(2015)
- 6) 細川歆延，森川敬信：空気調和・衛生工学，48巻(4号)，pp. 251-261(1974)
- 7) H. K. Versteeg, W. Malalasekera（松下洋介ほか3名共訳）：数値流体力学（第2版），pp. 1-7，森北出版(2011)
- 8) 村田顕彦：福岡県工業技術センター研究報告，No. 32，pp. 49-50(2022)
- 9) 一般社団法人可視化情報学会：PIVハンドブック（第2版），pp. 1-15，森北出版(2018)

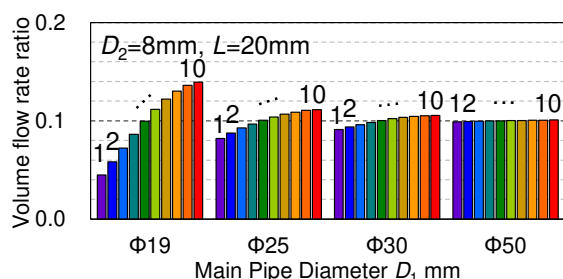


図8 主管径を変えた場合の分配量

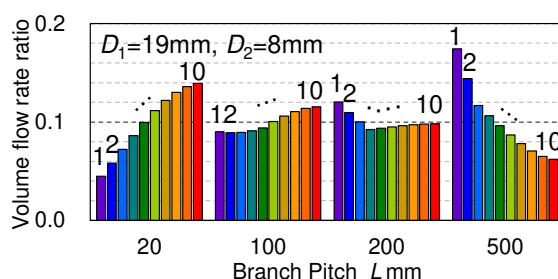


図9 噴出口間隔を変えた場合の分配量