

リークを伴う管群の熱流動特性に関する研究

Study on Heat Transfer and Flow Characteristics of a Bank of Tubes with Tube-to-Baffle Leakage

水野 昌幸 技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部 主査 博士(工学)
藤原 浩介 技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部

シェル&チューブ熱交換器の管外側の主要流動要素のうち、管とバッフル孔が形成する環状隙間からのリーク流れと、リーク流れを伴う管群直交流の圧力損失特性を実験的に調べた。二つの損失係数に及ぼす隙間形状係数 Z の影響は $29 < Z < 55$ では比較的小さく、リーク比 R の影響も $0.4 < R < 0.75$ では無視できることが分かった。また、主流と直交方向にリーク流れの流入がある場合の管群損失係数は、リーク流れの流出がある場合よりも小さいことが、実験および RANS 解析の実施によって明らかとなった。

This study investigated pressure drop characteristics of a bank of tubes with tube-to-baffle leakage and that of baffle-to-tube spacing itself by conducting experiments on various orifice shape factors Z and leakage ratios R . The results show that the two pressure drop factors depend neither on the orifice shape factor for $Z = 29 - 55$ nor on the leakage ratio for $R = 0.4 - 0.75$. Also, the pressure drop factor when the leakage flows into the bank of tubes is lower than the factor when the leakage flows out. This result is obtained not only experimentally, but also numerically by RANS simulation.

1. 緒 言

シェル&チューブ型の熱交換器や反応器では、管群直交方向の流れが主流となるが、管とバッフル孔が形成する環状隙間からのリーク流れが存在するために、複雑な熱流動場となることが知られる。特にディスク&ドーナツ型バッフルを用いる場合には、流路断面積の拡大・縮小に伴って、流れの減速・加速の効果も重なることから、その熱流動特性を把握することは設計上極めて重要である。

管群直交流の熱流動特性については、Kays and London⁽¹⁾、Zukauskas⁽²⁾、Zukauskas and Ulinskas⁽³⁾が詳細に報告しているが、これらはいずれも断面積一定の単段流路で実験取得されたものであり、リーク流れは考慮されていない。断面積が変化する管群流れについては、熊谷ら⁽⁴⁾が拡大方向の流れに関して実験を行っているが、縮小流れについての言及はない。

一方、環状隙間のリーク流れについては、Bell and Bergelin⁽⁵⁾が円管内面(内径 D)とその内部に挿入した円盤(直径 d 、厚さ t)の外周面に形成される環状隙間に対して、隙間形状係数 $Z = 2t/(D-d)$ を導入し、 $0.1 < Z < 33$ の範囲で流量係数との関係を実験的に整理している。

管群直交流と環状隙間からのリーク流れが重畳する系では、Sullivan and Bergelin⁽⁶⁾と Bergelin et al.⁽⁷⁾が、セグメンタルバッフルを用いたシェル&チューブ熱交換器の

圧力損失と熱伝達特性を、やはり $Z < 33$ の領域で調べている。ここで、バッフル1枚当たりの総リーク量は、単位流路長さ当たりのリーク量を管群直交方向に積分した値となるため、流れ方向の管列数が増加するとリーク量も増加し、温度分布の不均一化を生じやすい。今後、機器が大容量化していくと、 $Z > 30$ での特性を理解しておく必要性が高まるが、従来の研究視野には入っていない。

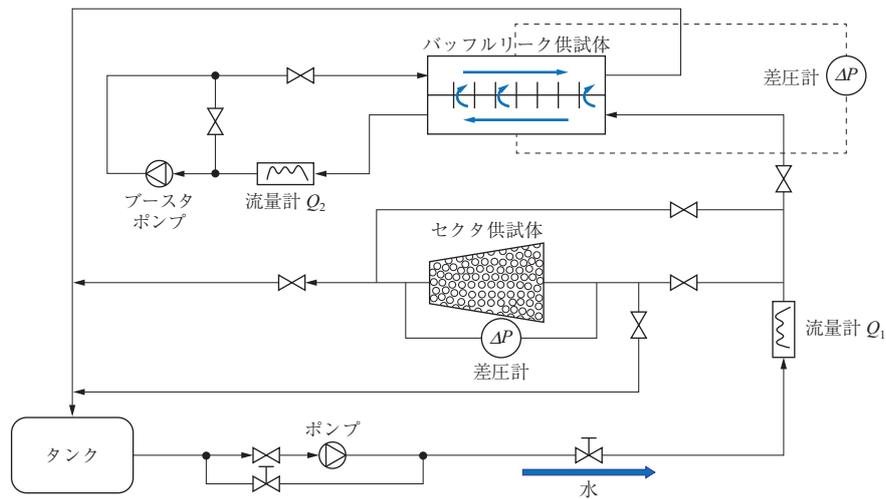
管群流れの数値解析に関しては、LES モデル⁽⁸⁾、⁽⁹⁾や、レイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式(RANS)^{(10)~(13)}を用いた研究が行われている。しかし、筆者らが知る限りにおいては、リークを伴う管群直交流の熱流動特性に関する詳細な研究報告は見当たらない。

そこで本研究では、対向流を形成する上下二段の管群流路において、管とバッフル孔が形成する環状隙間を $Z > 30$ としたときの、主流である管群直交流の流動特性に及ぼすリーク流れの影響、および隙間をリークする流れ自体の流動特性を実験と数値解析によって調べた。さらに、流路の拡大あるいは縮小が管群直交流の損失係数に与える影響についても数値的・実験的に調べ、評価した。

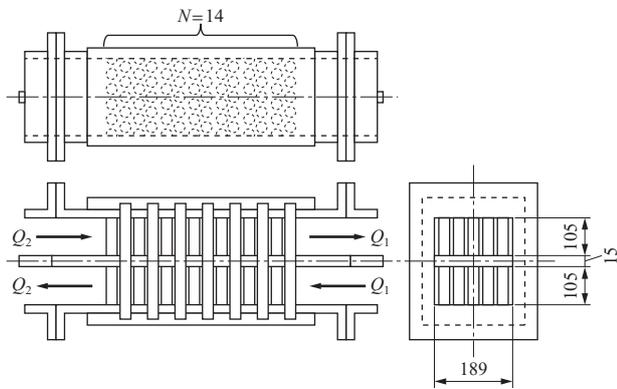
2. 実 験

2.1 バッフルリーク実験

第1図に実験装置の概略図を、第2図にバッフルリーク供試体の略図を示す。供試体はアクリル製で、矩形断面



第 1 図 実験装置
Fig. 1 Overall experimental system



第 2 図 バッフルリーク供試体 (単位: mm)
Fig. 2 Test section with tube-to-baffle leakage (unit: mm)

流路 (189 mm × 105 mm) を上下二段に配置した流路に、センタレス加工後に研磨して直径をそろえた円柱群を配置している。上下の流路間はバッフルで仕切られ、また、バッフルには各円柱に対応する位置に円柱貫通孔を設けて、管-バッフル孔間の環状隙間を模擬した。

実験流体の水は第 2 図の下段流路の右側から流入し、円柱群と直交する方向に流れた後、中間配管を経て、今度は上段流路の左側から対向して再流入する。下段流路を流れる流体の一部は円柱-バッフル孔隙間から上段流路へリークし、バッフル 1 枚の総リーク量は、下段流路の上流側に設置した電磁流量計で計測される流量 Q_1 と中間配管の流量 Q_2 との差で得る。ここで、リーク比 $R = (Q_1 - Q_2) / Q_1$ は、中間配管に設置したブースタポンプによって調整する。

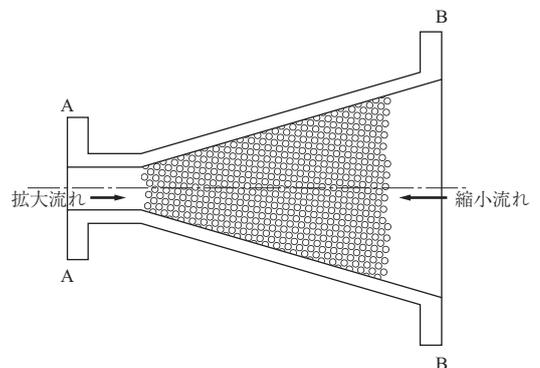
供試体の側面には、上下段の各々 13 か所に $\phi 2.0$ の静圧孔を設けたほか、円柱群のうち上下段の流路中央列にある各々 7 本の円柱のよどもみ点位置に $\phi 2.0$ の全圧孔を設けた。なお、圧力分布は上段流路の出口静圧を基準として整

理している。

円柱群は、流れ方向段数 $N = 14$ 、これと直交する方向に 5 列、円柱ピッチ $p = 1.26$ の正三角形配列とし、流路側面に沿う位置には半割円柱を配置した。円柱直径 $d = 29.95$ mm とバッフル厚さ $t = 15$ mm を固定し、バッフル孔直径を $D = 30.5, 30.6, 30.7, 31.0$ mm (隙間形状係数 $Z = 55, 48, 40, 29$) として、リーク比 $0.4 < R < 0.75$ の範囲で流動実験を実施した。

2.2 セクタ実験

第 3 図にセクタ供試体の略図を示す。流路内の円柱群は直径 $d = 10$ mm、ピッチ $p = 1.26$ の正三角形配列とし、流路側面には半割円柱を設置している。供試体はアクリル製で、断面 A (48 mm × 105 mm) から断面 B (240 mm × 105 mm) にかけて広がり角 30° のセクタ流路を形成している。実験流体の水はバルブ操作によって、拡大または縮小方向に流動の向きを変化させることができる。流路の下面には $\phi 2.0$ の静圧孔を 23 点設置しており、拡大・縮小



第 3 図 セクタ供試体
Fig. 3 Sectorial test section

流れ方向のそれぞれについて流量を変化させた場合の静圧分布を計測した。

3. 実験結果と考察

3.1 バッフルリークを伴う管群直交流

2.1 項に示したバッフルリーク実験装置における円柱群直交方向（主流）の損失係数 f とレイノルズ数 Re_{max} の関係について、第4図に下段流路の結果を、第5図に上段流路の結果を示す。レイノルズ数には、各段とも流路出入口の平均流量 $(Q_1+Q_2)/2$ を、円柱間の最小隙間基準の流路断面積で除して求めた平均速度 U_{max} で定義した $Re_{max}=U_{max}d/v$ を用いる。ただし、 d は円柱径 (m)、 v は動粘性係数 (m^2/s) を表す。ここで、主流の損失係数 f は次の(1)式のように表す。

$$\Delta P = 4f \left(\frac{1}{2} \rho U_{max}^2 \right) N \dots\dots\dots (1)$$

- ΔP : 圧力損失 (Pa)
- f : 主流の損失係数 (-)
- ρ : 流体密度 (kg/m^3)
- U_{max} : 円柱間の最小断面積基準の流速 (m/s)
- N : 円柱の流れ方向段数 (-)

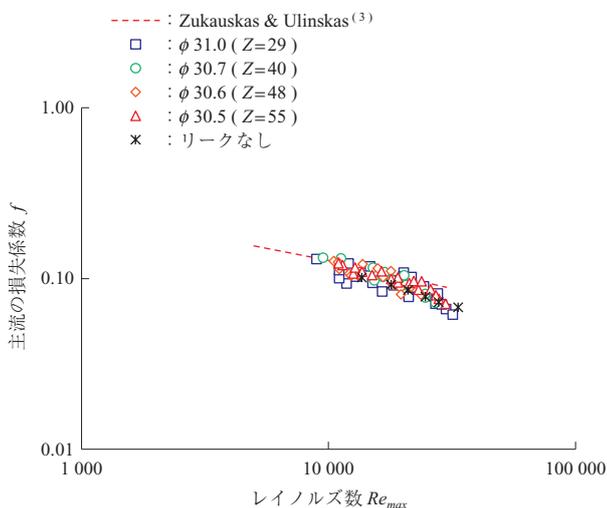
実験パラメータには隙間形状係数 Z をとったが、下段流路の結果を見ると、今回の Z の範囲においては明瞭な差異は確認できなかった。リークなしの結果を含めて、いずれの隙間形状係数 Z についても、破線で示した Zukauskas and Ulinskas⁽³⁾ の式とほぼ同等か、若干下回る程度となっている。

一方、上段流路の場合は、下段流路の結果と同様に隙間形状係数 Z の影響は僅少であるが、 Z が無限大とみなせるリークなしの結果がやや高めかいの値を示した。ほかの有限の Z 条件ではやや低く、Zukauskas and Ulinskas⁽³⁾ の式との乖離が下段流路の結果と比べても大きくなっているのが特徴である。

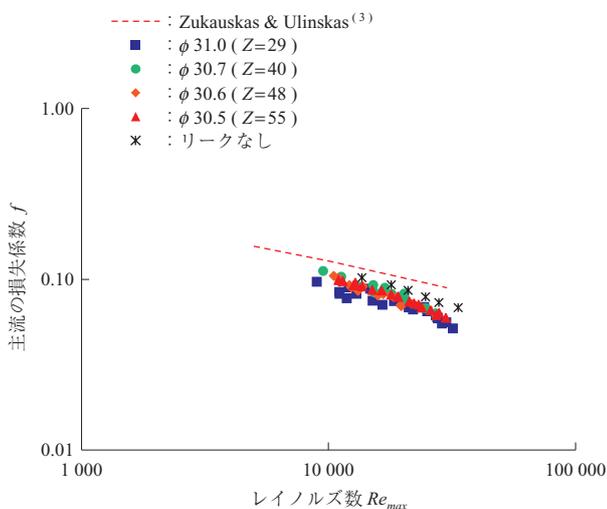
上記の二つの実験結果は、主流と直交する方向にリーク流出（分岐）がある場合とリーク流入（合流）がある場合で、主流の損失係数 f が異なることを示唆している。この理由については、各円柱の前縁への主流の到達速度を考えてみると分かりやすい。ここでは単純化して、下段流路の各円柱前縁には分岐直前の流速をもって到達するのに対して、上段流路の円柱前縁には合流直前の遅い流速で到達するものとみなす。このことから、各円柱前縁への到達速度が小さければ、円柱周りの圧力抗力も小さくなるので、上段流路（合流側）の流動抵抗も全体として小さくなるのが分かる。

なお、本研究では中間配管のブースタポンプを用いて、リーク比を $0.4 < R < 0.75$ の範囲で変えた実験も実施したが、既報⁽¹⁴⁾ に示したように、主流の損失係数に及ぼすリーク比 R の影響が小さいことから、第4図および第5図ではリーク比 R については区別せずにプロットしたことを述べておく。

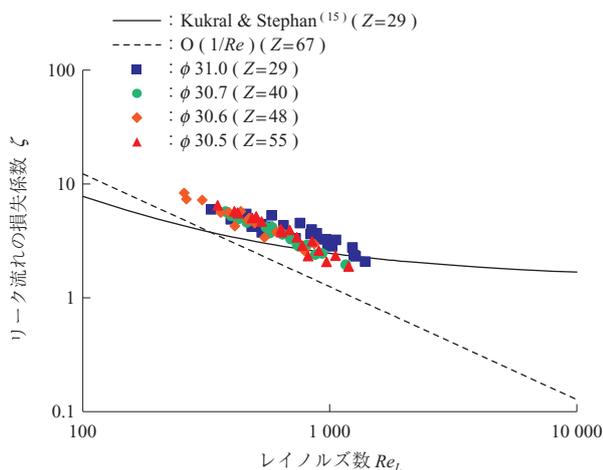
続いて、第6図にリーク流れの損失係数 ζ とレイノルズ数 Re_L の関係を示す。レイノルズ数には、総リーク流量 Q_1-Q_2 を管-バッフル孔隙間の総面積で除して求めた速度 U_L と、環状隙間の水力直径 D_{eq} で定義した $Re_L=U_L D_{eq}/v$ を用いている。ここで、リーク流れの損失係数 ζ は次の(2)式のように表される。



第4図 下段流路の損失係数
Fig. 4 Re_{max} vs. f in lower section



第5図 上段流路の損失係数
Fig. 5 Re_{max} vs. f in upper section



第 6 図 リーク損失係数
Fig. 6 Re_L vs. ζ of tube-to-baffle leakage

$$\Delta P = \zeta \frac{1}{2} \rho U_L^2 \dots \dots \dots (2)$$

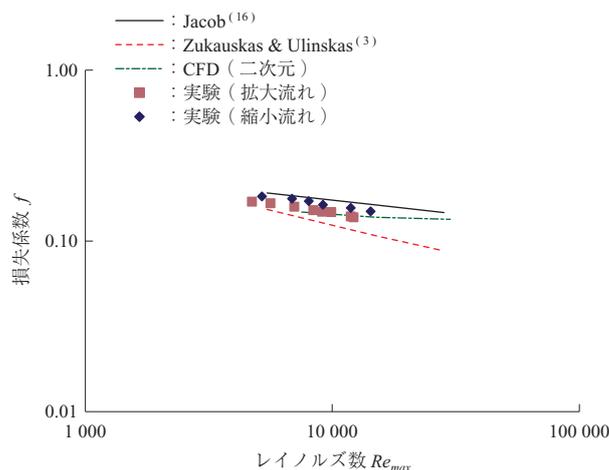
- ΔP : 圧力損失 (Pa)
- ζ : リーク流れの損失係数 (-)
- ρ : 流体密度 (kg/m³)
- U_L : 環状隙間の平均流速 (m/s)

このとき、 ΔP には下段流路と上段流路の平均圧力差 (Pa) を用いた。隙間形状係数が $29 < Z < 55$ の範囲において、実験値は Z によらず比較的まとまりの良い結果となっている。比較のため、Kukral and Stephan⁽¹⁵⁾ による整理式において、その適用範囲 ($0.1 < Z < 30$) の上限付近である $Z = 29$ を与えて求めた結果を実線で示す。今回の実験値は整理式とは必ずしも一致していないが、この整理式から層流項 ($\propto 1/Re$) のみを取り出して表した破線の結果と比べてみると、傾きはほぼ同じとみなせるため、環状隙間の圧力損失特性は層流の特徴をもっているともなしても差し支えないようである。

なお、リーク流れの損失係数 ζ に対してもリーク比 R の影響が小さいことを既報⁽¹⁴⁾ で明らかにしており、第 6 図においてもリーク比 R については区別せずにプロットしている。

3.2 流路の拡大・縮小を伴う管群直交流

第 7 図に、2.2 項で示したセクタ実験装置において、流路断面積が変化する場合の損失係数 f とレイノルズ数 Re_{max} の関係を示す。ここでレイノルズ数は、円柱群コアの中間地点 $r_m = (r_{in} + r_{out})/2$ での円柱間最小隙間基準の流路断面積における平均速度 U_{max} と円柱直径 d で定義した $Re_{max} = U_{max} d / \nu$ を用いている。ただし、 r_{in} は円柱領域の内半径、 r_{out} は円柱領域の外半径を表す。



第 7 図 流路の拡大縮小を伴う管群損失係数
Fig. 7 Re_{max} vs. f of a bank with expansion or contraction

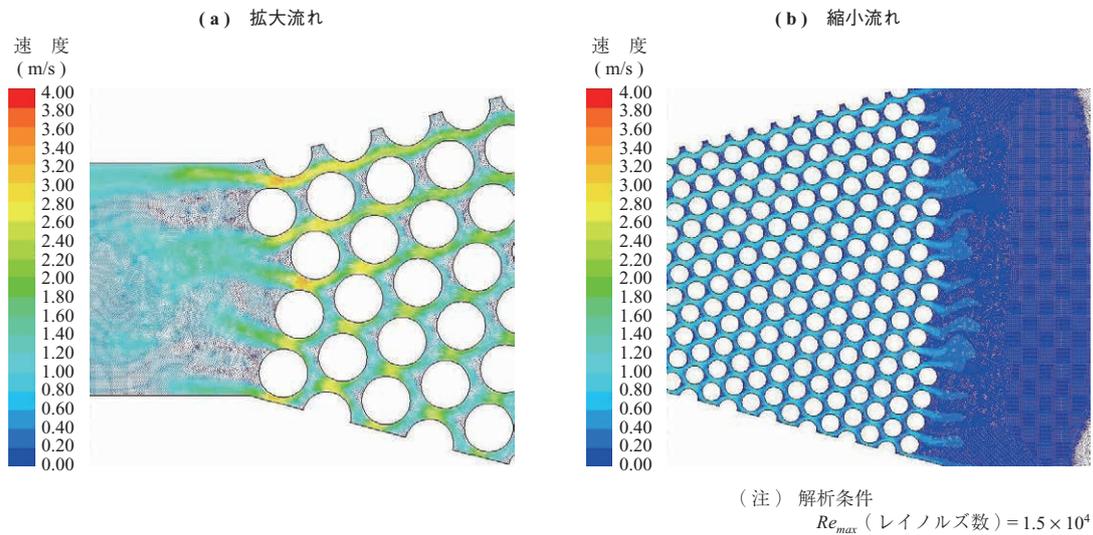
拡大・縮小流れの実験値はともに Jacob⁽¹⁶⁾ の式と Zukauskas and Ulinskas⁽³⁾ の式の間に入り、 Re_{max} で整理できることが分かった。拡大流れと縮小流れの実験値を比較すると、縮小流れの損失係数の方がやや大きいことが見てとれるが、これは流れが加速されたことによって、円柱後流の速度回復が早くなったことが原因であると考えている。また、標準 $k-\epsilon$ モデルを用いた二次元 CFD の結果も併せてプロットしたが、計算結果は実験値と良く一致している。なお、本計算では ANSYS FLUENT 6.3 を使用した。

第 8 図に拡大流れ (- (a))、縮小流れ (- (b)) における管群出口付近の速度分布を示す。解析条件は $Re_{max} = 1.5 \times 10^4$ とした。熊谷ら⁽⁴⁾ は拡大流れの場合に、管群出口において速度分布に偏りが見られたと報告しているが、本研究で実施した計算ではそのような偏りは観察されない結果となった。

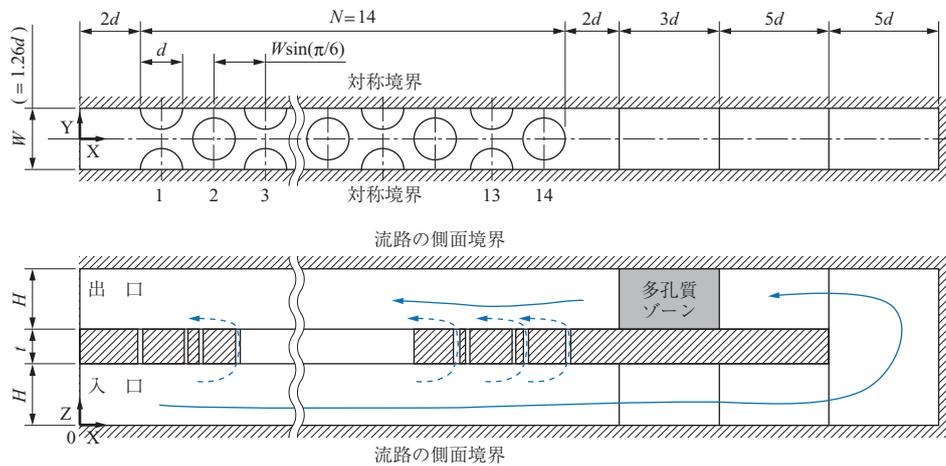
4. 数値解析

4.1 解析モデルと手法

本項では、流れ場の構造を詳しく把握するため、2.1 項のバッフルリーク実験系を模擬して実施した数値解析の説明をする。第 9 図に解析領域を示す。解析対象とした円柱群の流れ方向段数は実験と同じ $N = 14$ 段、これと直交する方向には円柱 1 ピッチ分 ($p = 1.26$) とした。このとき円柱とバッフル孔の中心軸は一致させている。流路の側面境界 ($y = \pm W/2$) には半割円柱が配置され、半割円柱以外の境界面は対称境界として扱う。下段流路の入口では一様流入、上段流路の出口を圧力境界として計算した。下段流路から上段流路へ折り返す中間部には、計算の都合上、多孔質ゾーンを設け、実験装置の中間配管における圧力損



第 8 図 速度分布
Fig. 8 Velocity magnitude obtained by CFD



第 9 図 解析領域
Fig. 9 Top and cross-sectional views of numerical domain

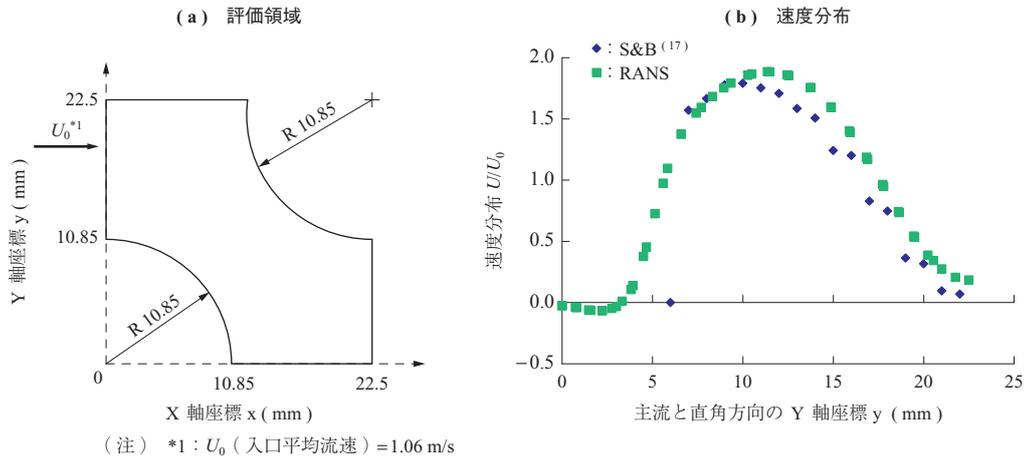
失値から、単位長さ当たりの抵抗係数として与えている。この多孔質ゾーンは、上段流路への折り返しに伴う速度分布の非一様性を解消し、上段の円柱群領域手前での整流の役割を果たしている。

本解析では、レイノルズ応力を $k-\epsilon$ モデルで定式化しているが、狭い環状隙間でのリーク流れが層流とみなせることを考慮して、壁近傍の扱いには Enhanced Wall Treatment (EWT) に基づく二層モデルを適用している。非圧縮・定熱物性を仮定し、汎用コード ANSYS FLUENT 14.0 を用いて有限体積法に基づく定常 RANS 解析を行った。総セル数は約 250 万個、管近傍における y^+ は 1 以下とした。対流・拡散項の離散化に QUICK スキームを採用し、速度場と圧力場のカップリングには SIMPLE 法を用いている。

4.2 解析結果と考察

解析の実施に先立って、過去に本研究と比較的良好似た系で取得された実験値をベンチマークとして、解析モデルの妥当性を検証しておく。この分野における従来の解析^{(8)~(13)}にならって、リークのない二次元管群直交流を対象とした Simonin and Barcouda (S&B)⁽¹⁷⁾の実験条件 ($U_0 = 1.06$ m/s, $Re = 18\,000$, $d = 21.7$ mm) と測定結果を用いる。第 10 図に主流方向の X 軸座標 $x = 11$ mm における速度分布 U/U_0 の比較結果を示す。本解析結果は S&B の実験値と良く一致していることから、本研究での EWT を用いた $k-\epsilon$ モデル の採用は十分な精度を与え得るものとみなした。

次に、第 9 図に示したリークを伴う系での解析結果を説明する。第 1 表に解析条件を示す。隙間形状係数が

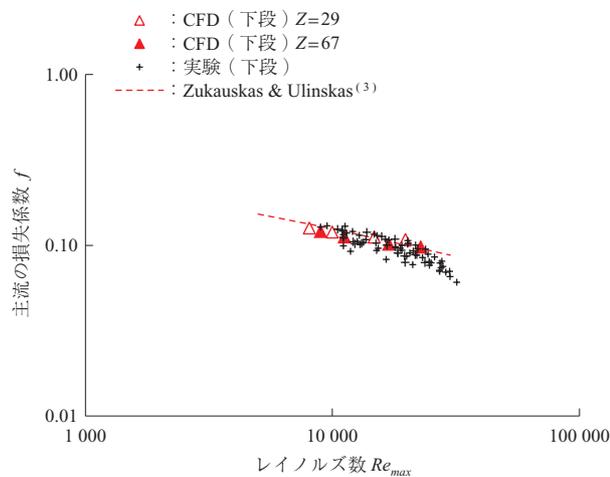


第 10 図 速度分布の比較
Fig. 10 Comparison with S&B's experimental data

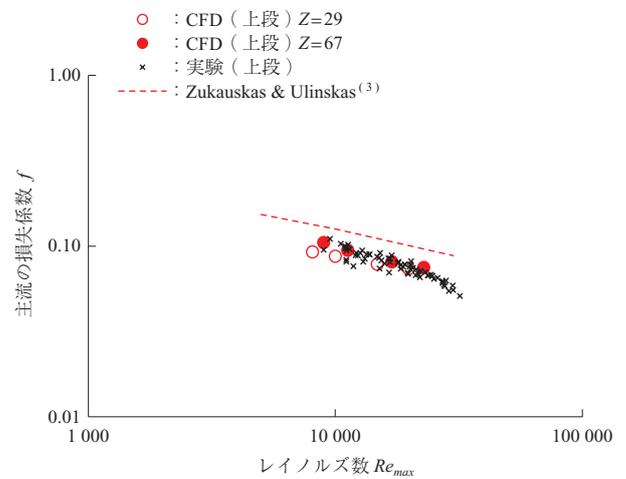
第 1 表 解析条件
Table 1 Analytical Conditions

ケース	隙間形状係数 Z (-)	入口流速 (m/s)	レイノルズ数 Re_{max}
1	29	0.08	8.08×10^3
2		0.10	1.00×10^4
3		0.15	1.48×10^4
4		0.20	1.98×10^4
5	67	0.08	8.97×10^3
6		0.10	1.12×10^4
7		0.15	1.70×10^4
8		0.20	2.28×10^4

$Z=29$ と 67 の場合について、それぞれ 4 種類の入口流速を一様に与えて計算した。第 11 図および第 12 図は、それぞれ、リークを伴う円柱直交方向（主流）の損失係数 f の実験値を示した第 4 図および第 5 図の結果に、それぞれ下段流路と上段流路での解析結果をプロットしたものである。双方とも、解析結果と実験値は良く一致し、また、上段流路の損失係数が下段流路の損失係数を下回ると



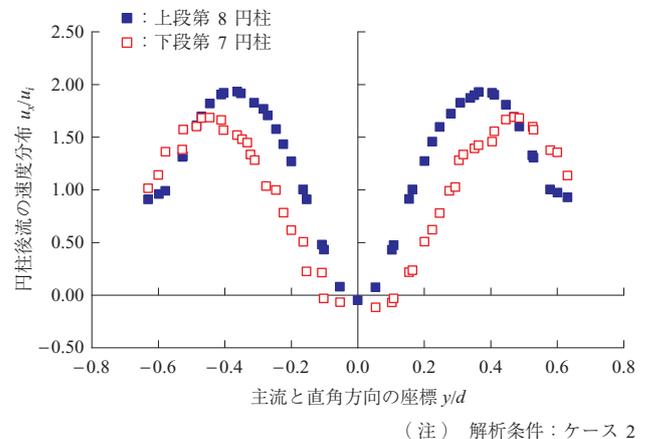
第 11 図 下段流路の損失係数
Fig. 11 Re_{max} vs. f in lower section



第 12 図 上段流路の損失係数
Fig. 12 Re_{max} vs. f in upper section

いう実験値の傾向も良く捉えていることが分かる。

第 13 図にケース 2 における円柱背後の速度分布を示す。下段流路と上段流路の双方の流れについて、流れ方向には着目円柱と下流側に最も近い円柱との軸間中心位置を



第 13 図 円柱背後の速度分布
Fig. 13 x -Velocity distribution behind a tube

とり、高さ方向には流路の中心位置をとった。比較対象とした円柱は、下段流路の流入側から数えて7本目、上段流路の入口側からは8本目の同一円柱としている。流速はそれぞれの流路の上流側に最も近い円柱の最小隙間での平均流速 u_i で無次元化している。それぞれの速度分布から、上段側（リーク流れの流入側）の方が下段側（リーク流れの流出側）よりも速度回復が早いことが分かる。また、上段側の流速がピークとなる位置が Y 座標の中心側に寄るという結果は、円柱背後の死水領域の矮小化を意味している。上段流路における圧力抵抗の減少は、簡易モデルによる考察から円柱前縁への到達速度が小さいためと前述しているが、本解析結果では前記に加えて、円柱背後においても死水領域の矮小化が少なからぬ影響を与えていることを示唆するものである。

5. 結 言

対向流を形成する上下二段の管群流路において、主流である管群直交流の流動特性に及ぼす管-バッフル孔隙間からのリーク流れの影響、および、リーク流れ自体の流動特性を実験と数値解析の両面から調べるとともに、流路断面の拡大あるいは縮小が管群直交流の流動特性に及ぼす影響についても考察を試み、以下の結論を得た。

- (1) バッフルリークを伴う管群直交流の損失係数 f は、分岐側で Zukauskas and Ulinskas⁽³⁾ の相関式と一致し、合流側ではそれよりも小さな値をとる。合流側の損失係数 f が小さくなるのは、円柱前縁への到達速度が小さいことと、円柱後流域の矮小化に起因することが示唆された。
- (2) リーク流れの損失係数 ζ は、隙間形状係数が $29 < Z < 55$ の範囲では、 Z に大きく依存しない。
- (3) 流路断面の拡大・縮小を伴う管群直交流の損失係数は、管群領域内の最小隙間基準平均流速に基づく Re_{max} で整理できる。

参 考 文 献

- (1) W.M. Kays and A.L. London : Compact Heat Exchangers McGraw-Hill 2nd Edition (1964)
- (2) A. Zukauskas : Advances in Heat Transfer Academic Press Vol. 8 (1972. 10) pp. 93 - 160
- (3) A. Zukauskas and R. Ulinskas : Heat Transfer Design Handbook Hemisphere Publishing

- (1983) Sec. 2. 2. 4
- (4) 熊谷博道, 猶原信幸 : FBR 用中間熱交換器の熱流動解析コードの開発 - 伝熱管群の流動抵抗について - 電力中央研究所報告 T90058 (1991年6月) pp. 1 - 31
- (5) K. J. Bell and O. P. Bergelin : Flow Through Annular Orifices Transaction of the ASME Vol. 79 (1957. 4) pp. 593 - 601
- (6) F. W. Sullivan and O. P. Bergelin : AIChE Chemical Engineering Progress Symposium Series Vol. 52 No. 18 (1956) pp. 85 - 94
- (7) O. P. Bergelin, K. J. Bell and M. D. Leighton : Heat Transfer and Fluid Friction During Flow Across Banks of Tubes - VI The Effect of Internal Leakages Within Segmentally Baffled Exchangers Transaction ASME Vol. 80 (1958. 1) pp. 53 - 60
- (8) S. Benhamadouche and D. Laurance : LES, coarse LES, and transient RANS comparisons on the flow across a tube bundle International Journal of Heat and Fluid Flow Vol. 24 (2003. 10) pp. 470 - 479
- (9) P. Rollet-Miet, D. Laurance and J. Ferziger : LES and RANS of turbulent flow in tube bundles International Journal of Heat and Fluid Flow Vol. 20 (1999. 6) pp. 241 - 254
- (10) R. W. Johnson : Modeling strategies for unsteady turbulent flows in the lower plenum of the VHTR Nuclear Engineering and Design Vol. 238 (2008. 3) pp. 482 - 491
- (11) R. Artit and T. Akira : Benchmark Simulation of Turbulent Flow through a Staggered Tube Bundle to Support CFD as a Reactor Design Tool Part I: SRANS CFD Simulation Journal of Nuclear Science and Technology Vol. 45 No. 12 (2008) pp. 1 293 - 1 304
- (12) R. Artit and T. Akira : Benchmark Simulation of Turbulent Flow through a Staggered Tube Bundle to Support CFD as a Reactor Design Tool Part II: URANS CFD Simulation Journal of Nuclear Science and Technology Vol. 45 No. 12 (2008) pp. 1 305 - 1 315
- (13) L. Xiaowei, W. Xinxin and H. Shuyan : Numerical

- Investigation of the Turbulent Cross Flow and Heat Transfer in a Wall Bounded Tube Bundle International Journal of Thermal Sciences Vol. 75 (2014) pp. 127 – 139
- (14) 藤原浩介, 水野昌幸: リークを伴う管群直交流の流動特性 第51回日本伝熱シンポジウム講演論文集 CD-ROM (2014年5月) H213
- (15) R. Kukral and K. Stephan: The Effect of Internal Leakage on Steady – State and Transient Behaviour of Shell-and-Tube Heat Exchangers Proceedings of the 10th International Heat Transfer Conference (1994.8) pp. 393 – 398
- (16) J. P. Holman: Heat Transfer McGraw-Hill 8th Edition (1997) p. 313
- (17) O. Simonin and M. Barcouda: Measurements and prediction of turbulent flow entering a staggered tube bundle Proceedings of the 4th International Symposium on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics (1988) (オンライン) 入手先 <<http://cfd.mace.manchester.ac.uk/>> (参照 2015-10-06)