水平な多分岐管への偏流に関する研究* (第2報, 偏流の抑制方法についての検討)

江崎 秀 司*¹, 深 野 徹*²
 安 藤 康 博*³, 木之下 博 文*⁴

Tube Side Flow Rate Distribution in a Horizontal Multitube Heat Exchanger (2nd Report, Control of Flow into Branch Tubes)

Shuji ESAKI, Tohru FUKANO,
 Yasuhiro ANDOU and Hirofumi KINOSHITA

An experimental study was made on the methods to control the distribution of flow rate into branch tubes in a multitube heat exchanger. The distribution of flow rate was strongly dependent upon the direction and the dynamic pressure of the water jet from an inlet nozzle. In this experiment, a circular plate or a flat plate with a large circular or rectangular hole was set downstream from the nozzle to modulate the dynamic pressure of the water jet. The results show that the properly determined dimensions and position of the circular or the rectangular plate were useful to render the flow rate distribution uniform. Also, a circular plate with many small holes had a better effect.

Key Words: Thermal Engineering Equipment, Heat Exchanger, Flow Rate Distribution, Turbulent Flow, Absorption Refrigeration, Tube Side Flow, Tube Bundle

1. 結 言

多管式熱交換器の管内側におけるヘッダから各分岐管への分流において、ヘッダ内への給水条件によっては局所的に平均速度より速くなる部分や遅くなる部分があり、管群内で偏った流れが生じる⁽¹⁾⁽²⁾。この偏流は熱交換器の伝熱性能に密接に関係するほか、管内の速度が許容速度を超えると銅管が腐食することも懸念されることから、この偏流の問題は装置の限界設計上十分に検討しておく必要がある。

前報⁽²⁾では、これらの現状をふまえ、多分岐管を有する管群における偏流の実態について調査した。その結果、管群内の偏流は、管群の出入口に取付けてあるヘッダ内の水流の様相すなわち水の全流量を供給する給水管の動圧とヘッダ内への給水方向に主として支配されており、流動条件によっては管群の管内平均流速より80%近くも速くなり、設計上容認できないほど大

きな値となる場合があることなどを見いだした。

本研究では、これら偏流が給水管から噴出したジェットの動圧の管群入口における分布に強く依存するという点に着目して、給水管の下流に位置するヘッダ内に、給水管の動圧を緩衝するための種々な形状の円板もしくはヘッダ側壁から突き出した偏流抑制板を垂直に設置した実験などを行い、偏流を抑制するための方法について検討する。

2. 記 号

A_c : 偏流抑制板の開口面積 m^2
 A_H : ヘッダの流路面積 m^2
 A_N : 給排水管の断面積 m^2
 A_P : 円板の面積 m^2
 A_h : 円板にけられた穴の合計面積 m^2
 D_P : 円板の直径 m
 D_0 : 給排水管の口径 m
 d : 分岐管の内径 m
 d_h : 円板にけた穴の直径 m
 L : 分岐管の長さ m
 L_H : ヘッダの分岐管軸方向長さ m
 L_P : 給水管出口から円板までの距離 m
 Re : レイノルズ数 $\equiv dU_i/\nu$

* 平成2年3月13日 九州支部第43期総会講演会において講演。原稿受付 平成2年9月7日。

*¹ 正員、鹿児島工業高等専門学校(〒899-51 鹿児島県姶良郡牟人町真孝1460-1)。

*² 正員、九州大学工学部(〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)。

*³ 准員、日本電装(株)(〒448 刈谷市昭和町1-1)。

*⁴ 准員、石川島播磨重工業(株)(〒100 東京都千代田区大手町2-2-1)。

U_i : 各分岐管内の流速 m/s

U_0 : 管群の全断面平均管内流速 m/s

η_i : 各分岐管の偏流率 $\equiv (U_i - U_0) \times 100 / U_0$ %

ν : 水の動粘性係数 m^2/s

σ : 偏流率の標準偏差 %

3. 実験

3.1 実験装置 本実験で用いた実験装置は前報⁽²⁾で使用したのと同じである。すなわち、水平な管群は内径 11.71 mm の平滑な銅管をピッチ 25 mm で碁盤目に配列した 10 列 10 段の合計 100 本で構成されており、分岐管の長さは 1250 mm である。

3.2 実験条件 本研究では管群内で生じる偏流の抑制方法を検討することを目的としており、前報で行った条件の一部に限定して以下の条件下で実験を行った。

(1) 断面平均管内流速 U_0 管群の全流路断面で給水流量を除すことによって定義した断面平均管内流速 U_0 は前報同様 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m/s および 2.5 m/s ($4900 < Re < 33900$) の 5 種類とした。

(2) 水の給排水方向 図 1 に示すように水の給排水方向は管群軸に同一な場合 (D 方向と表す) と垂直な場合 (S 方向もしくは R 方向) がある。本実験では特に偏流が著しい出入口とも D 方向である場合 (これを以下では DD の場合と呼ぶ) について詳細に調査した。なお、偏流の大きさは DD の場合に比べれば小さいが、その偏流特性が DD の場合と著しく異なる出入口とも S 方向である SS の場合についても合わせて検討した。

(3) 給排水管口径 D_0 給排水管の口径 D_0 は、給水ジェットの高圧をいったんヘッダ内で受け止めるための円板の取付けが容易な 100A (内径 102.3 mm) および 80A (内径 78.1 mm) の 2 種類とした。

(4) 分岐管の長さ L 偏流は分岐管の長さが 2500 mm よりその長さが半分の 1250 mm のほうが大きくなることから、本実験では抑制効果がより明確

となる $L=1250$ mm に限定して行った。

(5) ヘッダの分岐管軸方向長さ L_H ヘッダの分岐管軸方向長さ L_H は、給排水方向が DD の場合 200 mm とした。SS の場合前報では 200 mm としたが、本報では偏流抑制を行うための構造上から 300 mm とした。

本報告では以上述べた前報での実験条件のほかに、偏流を抑制するための種々な形状の偏流抑制円板 (以下では略して円板という) を給水管の下流側に設置した。以下に偏流抑制を目的として本実験で新たに加えた実験条件について述べる。

(6) 円板の直径 D_P 円板は厚さ 4 mm の鉄板を図 2 の実線あるいは円板の直径が小さい場合には破線で示すような形状に加工し、給水管に 3 本の棒を用いて固定した。円板の直径 D_P は 15, 22, 30, 37, 48, 60, 78, 103 mm および 126 mm の 9 種類である。

(7) 給水管出口から円板までの距離 L_P 図 2 に示した給水管出口のヘッダ面から円板までの距離 L_P は 50 mm および 100 mm の 2 種類である。

(8) 多孔円板の形状 給水管の前方に図 3 に示すような多数の穴をあけた多孔円板を設置した。円板の外径は給水管の内径とほぼ同じかそれより大きいものの大小 2 種類である。円板にあけた穴の個数は給水管口径 100A の場合、小円板では 33 個 (図 3 中破線)、大円板では 54 個 (図 3 中実線) である。また、80A の場合、小円板では 17 個 (図 3 中一点鎖線)、大円板としては上記 100A 用小円板を共用した。なお、穴の直径 d_h は 8, 9, 10, 11, 12, 13 mm および 14 mm の 7 種類である。

(9) 偏流抑制板の形状 管群の周辺部で流速が速くなるような偏流の抑制方法として、図 4 に斜線を付して示すようにヘッダの側壁から板状の突起 (以下ではこれを偏流抑制板という) を設定した。給水管断面が丸で、管群側断面が四角の形状であることを考慮

図 1 水の給排水方向

図 2 円板の取付図

して、この偏流抑制板の中心部の形状 (図4中 A_c 部) は、円形と正方形の2種類である。ヘッダ寸法 250 mm×250 mm に対して四角穴抑制板の穴の一边の寸法は 230, 210, 185 mm および 160 mm, 丸穴抑制板の穴の直径は 237, 210, 180 mm および 150 mm のそれぞれ4種類である。

4. 実験結果

図5は図の上部に示した記号 1.5-DD-100A-1250-200の実験条件, すなわち管群内の平均流速が1.5 m/s, 給排水方向がDD, 給水管口径が100A, 分岐管の長さが1250 mm およびヘッダの分岐管軸方向長さが200 mm の条件下における偏流率の分布特性を示したものである (以下の図中の実験条件表記法もこれに準ずる)。図5の斜軸は段数, 横軸は列数, 縦軸には管群の全断面平均管内流速 U_0 を基準値として, それぞれの管で測定された流速 U_i との差を百分率で表した偏流率 η_i [$\equiv (U_i - U_0) \times 100 / U_0$] を矢印で示す。上向きの矢印は平均流速 U_0 より速く, 下向きの矢印は

遅いことを意味し, 長さはその大きさを示している。DD の場合, 図5のようにヘッダ内への給水ジェットの動圧を直接受ける管群中心部近傍で管内の速度が著しく速くなり, 周辺部で遅くなる。この偏流を抑制するための一つの試みとして, 給水ジェットの動圧をヘッダ内でいったん受け止めるために, 給水管と同じ直径の円板を給水管が溶接されているヘッダ面から下流側へ50 mm の位置に流れに垂直に設置した場合について前報で報告した。その結果では, 図6に示すように円板の挿入によって, 逆に管群周辺部における分岐管内流速がいちばん速くなるなど, ヘッダ内の水流の様相によって分岐特性が大きく変わることを指摘した。そこで, 以下では①この管群周辺部で速くなる流速をもう一度抑制するために, 円板の下流に偏流抑制板を設置する方法, ②給水の動圧を直接最適に抑制する方法, の2とおりの検討結果について述べる。

4.1 偏流抑制板の効果 偏流抑制板は図4で給水管の内径とほぼ同じ直径の円板を $L_p = 50$ mm に固定し, その円板のさらに下流 50 mm すなわちヘッダの分岐管軸方向長さ L_H の中間の位置に設置した。図7は U_0 が1.5 m/s の場合の実験結果を示したもので, 縦軸は次式で定義される各分岐管の偏流率 η_i の

図3 多孔円板の形状

図4 偏流抑制板の取付図

図5 偏流率 η_i の分布特性 (円板なし)

図6 偏流率 η_i の分布特性 (円板あり)

標準偏差 σ であり、横軸はヘッド面積 A_H に対する偏流抑制板の開口面積 A_c の比である。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} \eta_i^2} \dots \dots \dots (1)$$

図7中の○, ●, □および■印は給排水方向がDDの場合であり、そのうち○と●印は流体が通過する偏流抑制板の中心部の形状が丸の場合、□と■印は四角の場合の結果である。図7からわかるように、偏流抑制板の流路形状としては給水管口径が100Aおよび80Aとも丸よりも四角のほうが偏流の抑制効果は高く、100Aの場合には A_c/A_H の値が0.7近傍で、80Aの場合には0.6近傍で最小値を示す。図8は一例として100Aにおいて σ の値が最小となる場合、すなわち偏流抑制板の中心部の形状が四角で、 A_c/A_H が0.706の場合の結果を示したもので図6と対応している。偏流抑制板を入れることによって管群周辺部の流速が抑制されて、良好な結果となっていることがわかる。また、図7中の■および□印はSSの場合についての結果である。SSの場合、偏流抑制を行わなければ、図9のように管群の第1列めおよび第10列めの管群周辺部が他の管列に比べて速くなるが、DDで用いた四角

の偏流抑制板を用いることによって偏流が抑制され、100Aおよび80Aとも A_c/A_H が0.7~0.8で σ は最小となる。このときの偏流の様子は図10に示すとおりで図9に比べて、管群周辺部での偏流が十分に抑制されている。

上述のように偏流抑制板の使用によって管群入口の流れは一様化するが、構造上多少複雑となる。そこで、DDの場合については円板だけを用いることにし、その最適形状について検討する。

4.2 円板の直径および設置位置の効果

図11および図12は円板の直径および設置位置が、偏流に与える影響を検討した結果である。図11, 12の縦軸は標準偏差 σ であり、横軸は給水管の断面積 A_N に対する円板の面積 A_P の比である。なお、円板の直径が給水管口径より小さい場合には、幅5mmの円板支持部を3方向に設けているが、この面積は A_P に含めていない。

図11は $L_P=50$ mm の場合の結果であるが、図11からわかるように、 A_P を小さくしていくと σ はわずかに増大したのち、しだいに減少し、両口径の場合とも直径が37mmの円板を用いた場合に相当する100Aでは A_P/A_N が約0.13、80Aでは約0.23で最小値をとったのち、再び増加して横軸の零すなわち円板がない状態の値まで増大する。図12の円板の位置が100mmの場合も同様に最小値が存在するが、 σ の値は全体的に大きくなり、円板による偏流の抑制効果は

図7 偏流抑制板の効果

図9 偏流率 η_i の分布特性 (偏流抑制板なし)

図8 偏流率 η_i の分布特性

図10 偏流率 η_i の分布特性 (偏流抑制板あり)

50 mm の場合ほど顕著ではない。

図 13 は 100 A において偏流の抑制を何もしない図 5 の場合に対して、もっとも良好な偏流抑制効果を示した L_P が 50 mm, 円板の直径 D_P が 37 mm の場合 ($A_P/A_N=0.131$) の結果を示したものであり、管群中心部での偏流が良好に抑制されていることがわかる。

これら図 11 に示す結果は円板通過後管群入口に至るまでの距離が長いほうが、流れが一様化することを示す。また、 σ の最小値を与える条件が上述のように円板直径がいずれも 37 mm の場合であることから、その相似性は A_P/A_N ではなく、 A_P/A_H すなわちヘッド面積に対する円板の大きさの比であるようにみうけ

図 11 円板の直径の効果 ($L_P=50$ mm のとき)

図 12 円板の直径の効果 ($L_P=100$ mm のとき)

られるが、これについては今後さらに検討する必要がある。

4.3 多孔を有する円板の効果 給水管の内径と同一直径の円板に多数の穴をあけ、給水を完全にはせき止めない場合についても検討した。円板は給水管出口から 50 mm 下流に設定した。図 14 がその結果で、横軸は円板の面積 A_P に対する円板にけられた穴の合計面積 A_h の比である。したがって、横軸の零の値は給水管と同じ直径の穴のない円板を設置した場合に、1.0 は円板を設置しない場合を意味する。中間の七つの点が横軸の値の小さいほうから円板にけられた穴の径が 8, 9, 10, 11, 12, 13 mm および 14 mm のデータである。図 14 から明らかなように、100A および 80A の場合とも穴の直径すなわち円板を通過する水の流量によってもっとも偏流が少なくなることを意味する σ の最小値が存在する。本実験における 100A の場合、 σ の値は $\phi 11$ の穴をあけた A_h/A_P が 0.355 で最小値を

図 13 偏流率 η_i の分布特性

図 14 多孔円板の効果

図 15 偏流率 η_i の分布特性 (穴径 $\phi 11$ の場合)

示し、80A の場合も、同じ $\phi 11$ の穴をあけた $A_h/A_p = 0.338$ で最小となった。多孔円板の直径が給水管の内径より大きい場合の σ が最小となる穴径は 100A の場合は同様に $\phi 11$ のときであったが、80A の場合は少し小さい $\phi 9$ のときとなり、 σ の値は小円板に比べて全体的に小さくなる傾向がある。

図 15 は何も偏流の抑制をしない図 5 の結果に対して、 σ が最小値を示した給水管の内径より大きな直径の円板に $\phi 11$ の穴をあけた場合の結果である。図 15 からわかるように、管群の中心部および周辺部とも偏流は抑制され、全体的に良好な分布特性となっていることがわかる。

最後に、多孔円板による偏流抑制の際に観察された興味深い現象について記す。図 16 は 100A の供試管内径と同じ直径の多孔円板を用いた場合の結果で、100 本の分岐管のうち管群の中心部を含む第 6 段めの第 1 列めから 10 列めまでの 10 本の偏流率を示したものである。図 16 からわかるように、穴径が $\phi 8$ から $\phi 11$ まで増加するにしたがって、管群中心部で穴を通過する流量が増える結果、管群中心部の流速はしだいに増加するが、 $\phi 12$ (○印) では急に中心部の流速が低下し、 $\phi 8$ の穴の場合よりも小さくなる傾向を示す。しかし、 $\phi 13$ および $\phi 14$ になると再度中心部が $\phi 11$ のときより速くなる。このように $\phi 12$ の穴でのみ起こる特異な現象は、円板の大きさを 100A および 80A に対してそれぞれ 2 種類、合計 4 種類行った中で 100A の 2 種類および 80A の給水管内径と同じ直径の 3 種類の円板で同じように生じ、しかもいずれの場合も $\phi 12$ の穴をあけた場合にのみ見られるものであり、再現性のある現象である。この理由については続報で議論の予定である。

5. 結 言

多管式熱交換器における水平分岐管内側の偏流を抑

図 16 多孔円板に穴あけの影響

制するために、ヘッダの壁面に突起を設置する場合と円板を給水管出口に設置する場合の 2 種類の実験を行った。得られた主な結果は次のとおりである。

(1) 本実験範囲において給排水方向が DD の場合には、給水管出口直後に円板を設置することにより、あるいは SS の場合のように、分岐管群内の流速が管群周辺部で速くなる偏流特性をもつ場合には、ヘッダの側壁から板状の突起を出した偏流抑制板によって管群周辺部での偏流を抑えることができる。

(2) 給水管出口に適切な円板を適切な場所に取付けることにより、偏流率の標準偏差 σ を約 60% 減少することができた。

(3) 多孔円板を用いて偏流を抑制する場合、 σ が最小となる最適な穴径および円板の大きさが存在し、この方法によって標準偏差 σ の値は何も抑制しない場合に比べて 80% 以上減少した。本研究で行った種々の方法のうちではこの方法がもっとも良好な抑制効果を示した。しかしながら、穴径を変化させた偏流特性の傾向の推移において、ある特定の穴径で他と著しく異なる傾向を示す特異な現象が見られ、注意を要する。

終わりに、本実験の遂行に際して多大のご助力をいただいた戸田可祝教授 (鹿児島高専) および松田成夫技官 (鹿児島高専) に深甚なる謝意を表す。

文 献

- (1) March, P. A., *Trans. ASME*, 3-101 (1979), 490.
- (2) 江崎・ほか 4 名, *機論*, 56-528, B (1990), 2247.