

# 熱交換器内の多分岐管路における流動解析\*

生田四郎\*\*, 秋山光庸\*\*\*, 杉山 均\*\*\*

# The Flow Rate Distribution in Branch Passages of Heat Exchanger for Automobile

Shiro Ikuta, Mitsunobu Akiyama and Hitoshi Sugiyama

## ABSTRACT

Inside of the heat exchanger of automobile, first the water flow comes into the inlet chamber and streams into many branch passages. Through these passages, the hot water is cooled by the surrounded air. Then the cooled water merges into the outlet chamber and flow out from the heat exchanger. As the heat exchanger is consisted of bends and tubes, the flow field in the heat exchanger is very complicated because of the presence of flow reversal and separation. Only a few reports are available to date concerning the mal-distribution of the flow rate and the technical remedy to obtain uniform flow distribution. This study aims to predict the flow patterns in a heat exchanger. Flow visualization, velocity measurement and numerical analysis are applied to the water flow in the tube array model. The results in laminar flow region show that the flow rates and patterns in tube array greatly depend on the mutual position of the tube arrays to the flow inlet and outlet of the model. It is shown that the uniform flow distribution in each branch passage can be realized by increasing the volume of the outlet chamber.

Key words : Heat Exchanger, Branch Passages, Flow Visualization, Numerical Analysis, Mal-distribution of the Flow Rate

## 1. はじめに

自動車の熱交換器内の流れは、液体(水)が熱交 換器入口から入口側チャンバーを経て多数の細管 に分流し、そこで外部空気と熱交換を行い、再び 出口チャンバー内で合流し出口より流出する。

熱交換器内の流路は,曲がりや突起を含む複雑 な断面形状をしており,逆流や剝離などが混在す る流れとなっている。熱交換器の効率向上を図る ためには液体を各細管に均一に分配することが要 求されるが,流体を均等に細管群に分配させる手 法や要因を解析した研究報告は数少ない。そこで, 実際の熱交換器内の流れの実体を明らかにするこ とを目的として、2次元の熱交換器モデルにおい て数値計算と可視化実験を行った。この結果、層 流領域においては細管群中の流量配分の差異は出 入口流路の位置関係に依存することが判明した。 また、出口チャンバーの容積を広げることにより 分岐流路毎の流量の均一化が達成されることが明 らかになった。以下にその成果の詳細を述べる。

多分岐管に関する研究は、Ueda-Kubo<sup>1</sup>による 一端が開放型の分流管と合流管について、水流を 用いた実験解析がある。分流管は入口側チャンバ ー(直径35mm)と10本の分岐流路(直径20mm)か ら構成され、各分岐流路の出口は大気に開放され ている。各分岐流路の総断面積に対する入口側チ ャンバーの流れに垂直な面の断面積の比(Ar)は

<sup>\*</sup>原稿受付 1995年10月5日

<sup>\*\*</sup>正会員 カルソニック(株)

<sup>\*\*\*</sup>正会員 字都宮大学工学部

3.26である。入口側チャンバー径とそこを流れる 流速を用いたレイノルズ数が、4.15×10<sup>4</sup>の場合に は、流入口に近い分岐流路に全流量の約7%が流 入し、流入口から最も離れた分岐流路には約13% が流入したと報告している。合流管の場合には流 出口に最も近い分岐流路に約14%が、最も遠い分 岐流路に約8%が流入したと記している。さらに、 レイノルズ数が2×10<sup>4</sup>から10×10<sup>4</sup>の範囲におい て実験を行い、分岐流路内の流量分布は大きく変 化しないとして、実験により求めた分流係数や合 流係数を用いて流量分布や圧力分布の予測式を提 案している。

嵩ら<sup>2</sup>は単一の屈折管の曲げ角を変えて屈折部 の流れを詳細に解析し報告している。また,単一 管が2本に分岐する場合の分岐部の流れについて 数値計算と実験で解析<sup>3)</sup>も行っている。

江崎ら"は箱形の管群型熱交換器のチャンバー 容積と、給水管口径、分岐管の長さについて実験 解析を行っている。管群内の流量分布はレイノル ズ数4.5×10<sup>3</sup>から3.39×10<sup>4</sup>の範囲内において多 少変動し、レイノルズ数が高くなると各分岐流路 毎の流量の差異は大きくなる傾向にある。給水口 の取り付け位置は流量分布に大きく影響するが、 排水口のそれはあまり影響しない。分岐流路の長 さが短いほどチャンバー内の流れの不均一による 乱れの影響を受けて偏流が生じると報告している (Ar=0.086~1.3)。

Bajura-Jones<sup>5</sup>は実験から求めた分流係数と合 流係数を用いて、1次元の運動量輸送方程式を解 いて、2次元の形状モデルを対象に、実験値との 検証を報告している( $Ar=0.5\sim1.75$ ,  $Re=6\times$ 10<sup>4</sup>~8×10<sup>4</sup>)。

Datta-Majumdar<sup>6)</sup>は Bajura-Jones<sup>5)</sup>の予測手 法を拡張し,不均等配置の分岐管の予測式を提案 している。

江崎ら<sup>4)</sup>の実験モデルとBajura-Jones<sup>5)</sup>やDatta -Majumdar<sup>6)</sup>の計算モデルはいずれも熱交換器を モデルとしたもので,分岐流路の総断面積と入口 チャンバーの流れに垂直な面の断面積の比(*Ar*) が比較的小さいモデルを対象に研究されている。

近年,自動車用熱交換器の小型化等により入口 チャンバーの断面積が小さくなり,各分岐流路の 総断面積と入口チャンバーの流れ方向に垂直な面の断面積の比(Ar)が大きくなる傾向にある。

さらに,出入ロチャンバー間の距離が短くなっている。このため,分岐流路内の分流特性が悪化していることが予想されるが<sup>4)</sup>,このようなモデルを対象に詳細な解析を行った報告はない。

そこで、本研究は各分岐流路の流量分布の均一 化を目的として、分岐流路の総断面積と入口チャ ンバーの流れ方向に垂直な面の断面積の比(Ar) が5.0と大きい形状を対象に,層流域で流れの可視 化と数値計算による各分岐流路の流量分布の解析 を行った。

#### 2. 解析手法

#### 2.1 数值計算方法

支配方程式は 2 次元の連続の式(1)と非定常の Navier-Stokes方程式(2)を用いた。 連続の式

生机・ノエレ

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \tag{1}$$

運動方程式

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial X} + \nu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2}\right)$$
$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial Y} + \nu \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2}\right)$$
(2)

U: velocity in X direction	$\nu$ : kinematic viscosity
V: velocity in Y direction	g: acceleration of gravity
P: pressure	X: length in X direction
t: time	Y: length in Y direction
$\rho$ : density	

方程式の離散化にはコントロールボリューム法を 用いた。対流項の差分スキームには、QUICK(三次 精度の風上差分)を用いた。計算格子は均等間隔 のスタッガード格子を,圧力の解法にはSIMPLE 法を用いた。計算解法は非定常であるので,計算 初期には非定常解が得られるが,さらに計算を続 けて安定した定常解を求めその結果を表示した。

**Fig.1**に計算に用いた格子図と速度境界条件を 示す。解析に用いた格子数はX軸160点, Y軸100 点,計16000点とした。



(Outlet chamber width 20mm) Fig. 2 Two-dimensional configuration

#### 2.2 実験装置

熱交換器の2次元モデルの形状がFig.2に示さ れている。この2次元モデルは透明のアクリル製 で縦200mm,横190mmの矩形断面に10本の分岐 流路が設けられ、その深さは500mmである。入口 の流路幅は20mmで,それに続く入口チャンバー の幅も20mmで一定、各分岐流路の幅は10mm一 定である。各分岐流路の総断面積と入口チャンバ ーの流れ方向に垂直な面の断面積の比(Ar)は5.0 である。実験装置の全体については著者ら<sup>7</sup>の報 告に詳述した。

## 2.3 実験手法

実験解析は流れの観察と数値計算の検証を目的 に、系内の流動様式の写真観察と分岐流路内にお ける速度分布計測を行った。可視化手法は水素気 泡をトレーサーに用いた流跡法によった。水素気 泡発生のための電極には30µmのタングステン線 を用いた。光源はハロゲンランプで、ファイバー ケーブルにて120mm幅の平行光線としたシート 光を用いた。なお、観察面はモデル中央平面より 100mm上方(上面より下方150mm)にて行った。 流路の幅が狭く観察面が深いため各部を個別に撮 影し,2個のチャンバーと10本の流路部の合成写 真で表現した。

分岐流路内のY方向の流速分布の計測は可視 化観察面と同一面深さ位置で、レーザードップラ 一流速計(アルゴンイオンレーザー、プローブ先端 から計測点まで112mm、交差角14度、測定容積径 0.1mm、長さ2.3mm)を用いて、流路内を1mm間 隔で計測した。計測に用いたシーディング粒子は ナイロン12(平均粒子径6μm)である。

### 3. 結果と考察

# 3.1 出口チャンバー幅20mm場合の分岐流路の 流量分布の解析

出ロチャンバー幅20mmのモデルについての可 視化写真と, 流速測定結果を**Fig.3** (a) (b)と**Fig.4** に示す。レイノルズ数は入口流路内の平均流速と 入口流路幅を用いて求めた。

Fig.3 (a)に示すように、入口チャンバー内に流 入した流れは、分岐流路開口部にその方向を曲げ て、入口側から1本目の分岐流路にその大部分が 流入する。残りの流れは残りの分岐流路の入口に 沿って流れ、おのおのの分岐流路に分流しながら 10番目の流路まで到達する。そこでは、流れは入 ロチャンバー部の最後部壁面に衝突し10番目の分 岐流路に流入する流れと、壁面に沿って反転逆流 する流れに分かれる。後者はチャンバー内に孤立 渦流を形成している(Fig.3 (b)参照)。



入口チャンバーから第1分岐流路に流入する流

Re = 500 (Outlet chamber width 20mm)(a) Flow pattern by hydrogen-bubble (b) Flow image method

Fig. 3 Streak lines

-35-



れは、分岐流路の壁面に対して約90度の相対角度 で流入し、流入流速が大きいので、分岐流路入口 部で他の分岐流路に比較して一番大きな剝離泡域 が観察できる。その後、流れは分岐流路内の両壁 面に交互に接触するように蛇行を呈した後、壁面 に沿って減衰し、発達した流れに近づき、分岐流 路出口より出口チャンバーへと流出する。

2番目の分岐流路の場合,流路の方向と流入方 向との角度差は,1番目の分岐流路の場合とほぼ 同等であるが,流入速度が1番目の流路の場合よ り遅くなるので剝離泡域は少し小さくなる傾向に ある。3番目以後10番目までの分岐流路入口近傍 の剝離泡域は除々に小さくなっている。単一曲が り管における剝離泡の大きさは低レイノルズ数領 域ではレイノルズ数に比例すると報告されてい る<sup>2)</sup>。本実験のごとき多分岐管でも流れの様子が 似ていれば分岐管毎のレイノルズ数に比例して剝 離泡域が変化すると言えよう。

出ロチャンバー内の流れは10番目の分岐流路を 出た流れが出ロチャンバーの内壁面に沿い,9番 目の流路からの流れはその内側に,1番目の流路 まで順にその内側に層を成して流れている。この 層状の流れは出ロチャンバーの流出口付近で加速 し,流出する。以上が比較的低流量の場合のモデ ル内の流れの模様である。

Fig.4に,各分岐流路の流速分布を示す。いずれ のレイノルズ数においても1番目の分岐流路内の 流速が最も早く,分岐流路2番目のそれは1番目 の約80%となり,最も遅い10番目の分岐流路の流

-:6-



速は23%程度に低下している。

この流速分布を流量分布に換算してFig.5に示 す。流量比(Φ)は各分岐流路毎の流量を全流入流 量で割った値である。各流量は分岐流路の1番目 に最も多く全流量の約30%が,2番目は約20%が, 3番目から10番目にかけては10%以下に分布して いることが判る。図中には、白地のマークで示し た計算結果が実験結果とほぼ同様な流量分布を示 している。出入口流路がこのような配置となって いる場合には、1番目の分岐流路の流量は最も多 いことが解る。この傾向は文献<sup>5)</sup>でも報告されて いる。

Fig.6に、レイノルズ数500の場合の計算結果を 速度ベクトル図で示す。計算による速度ベクトル 図と可視化実験により求められた流れ模様(Fig. 3)は、入口チャンバー内の渦流領域や、分岐流路 の入口部の剝離泡域の存在や、出口チャンバー内 の層状の流れ等の全般にわたりほぼ一致している。







つぎに、数値計算による圧力分布図をFig.7に示 す。圧力は平均流入速度の2乗と密度との積で無 次元化され示されている。圧力の最も高い領域は 入口流路の入口付近で、最も低い領域は出口チャ ンバーの出口流路と分岐流路1番目全域と2番目 の入口付近である。注目すべき点は、出口チャン バー内の流出口付近の最も低圧領域と分岐流路1 番目の流路内の圧力が同一レベルとなっているこ とである。このため、この分岐流路内の圧力は他 の分岐流路に比較して最も低いので、入口側チャ ンバー内に流入した主流は, 1番目の分岐流路に 流入すると推察される。この低圧領域の発生は出 ロチャンバー内の流速の加速による静圧の低下で あり、この低圧領域と分岐流路の間の距離が少な いと分岐流路内の圧力が影響を受ける。この距離 を大きくすることが分岐流路内の圧力の低下を防 止し、過度な流入を減少させると思われる。



Fig.8に、流れ関数の計算結果を示す。図では流

*Re*=500 (Outlet chamber width 20mm) **Fig. 8** Contours of stream function

れ関数を40等分して示した。入口チャンバー内に おいて、渦流領域が分岐流路1番目からチャンバ ーの末端まで見られる。各分岐流路入口部には剝 離泡域が存在している。この剝離泡域の長さは分 岐流路1番目で最も長く、以下分岐流路の番号が 大きくなるにつれその長さは徐々に減少している。

3.2 流出口の位置が流量分布に及ぼす影響

流量分布の不均一な原因は出口チャンバーの流 出口付近の低圧部と分岐流路の出口が近接してい るために生じると推察した。流出口の位置が換わ ると出口チャンバー内の流れの方向が変化するた め,分岐流路内の流量分布に大きな影響を及ぼす ことが予想される。

そこで、流出口の位置を換えて、各分岐流路の 流量分布について数値計算を行った。入口チャン バーの流入口の位置と出口チャンバーの流出口の 位置の組み合わせは数多くあるので、最も一般的 な左右と中央の場合において流出口の位置のみを 換えて数値計算により検討した。なお、各分岐流 路の長さは前モデル(Fig.2)より入口部と出口部 においておのおの10mm短く設定してある。

Fig.9に,解析に用いた2次元モデル形状の概要 を示す。流出口の位置が出口チャンバーの右側に ある場合のモデルを,リバースフロータイプ(R) とし,流出口が左側にある場合のモデルをパラレ ルフロータイプ(P)とし,流出口が出口チャンバ ーの中央にある場合のモデルをミックスフロータ イプ(M)として示した。



- 37 ---



Re = 500 (Both chambers width 30mm) Fig. 10 Flow rate ratio distribution

Fig.10に、各モデルの分岐流路の流量分布を流 量比(Φ)で示す。リバースフロータイプ(R)では 2番目の分岐流路に全流量の40%が流入し、均一 分布は得られていないことは前報"にその詳細を 報告した。出口流量の位置を左側に置いたパラレ ルフロータイプ(P)では、分岐流路10番目に全流 量の27%が流入し、10番から1番にかけて徐々に 減少し、2、1番目の分岐流路では停滞か逆流が 観察される。ミックスフロータイプ(M)では、主 流は分岐流路4、5番目の分岐流路に最も多く流 入し、1、2番目の分岐流路では流れは停滞して いるか、逆流している。このように出口チャンバ ーの流出口に近接した分岐流路の流量が多くなっ ている。いずれのモデルも均一な流量分布ではな いことが明らかである。

# 3.3 出ロチャンバー容積を拡大した場合の 流量分布の解析

分岐流路の流量分布の均一化についてDatta-Majumdar<sup>6)</sup>らは分岐流路の幅を縮小することに よりある程度は改善できることを示唆している。

この方法は流路の抵抗の増大化を引き起こし, 液体(水)の輸送動力の増強が必要となる。

江崎ら<sup>4</sup>は全分岐流路断面積と入口チャ、ンバー の流れに垂直な面の断面積の比(Ar)が比較的小 さい領域(Ar=1.75~0.086)で,かつ,乱流域(4.9 ×10<sup>3</sup>~3.39×10<sup>4</sup>)においては,流量分布の偏りは 入口チャンバー内における動圧の静圧復帰量に比 例し,入口チャンバー内の流れの制御が偏流防止 に不可欠であるとしている。本モデルでは層流域 で,全分岐流路断面積と入口チャンバーの流れに 垂直な面の断面積の比(Ar)が5.0と比較的大きい ので、出口チャンバーの流出口付近の低圧部の影 響が大きいと予想される。そこで、出口チャンバ ーの容積を大きくしたモデルについて検討する。

**Fig.11**に,出口チェンバーの容積を前モデル (Fig.2)の2倍に拡大したモデルを示す。

**Fig.12**に,数値計算により得られた速度ベクト ル図を示す。各分岐流路入口の速度ベクトルの矢 印の大きさはほぼ等しく,流入速度が均等に近づ いたことを示している。

Fig.13に各分岐流路内の速度をレーザードップ ラー流速計にて測定した結果を示す。流入速度は レイノルズ数で500,1000である。各分岐流路の速 度分布はほぼ等しく,前モデルの測定結果(Fig.4) と比較すれば大幅に改善されている。

Fig.14に分岐流路内の流速分布から流量を算出 し,各分岐流路毎の流量を全流入流量で無次元化 した流量比(Φ)で示す。各分岐流路毎の流量は多 少流量分布に差異があるが,前モデルの場合(Fig.





Fig. 13 Velocity distribution in branch passages



5)と比べれば格段に均一化していることは明らか である。

**Fig.15**に,水素気泡による流れの可視化写真を 示す。モデル内の流れは以下の点を除き前モデル の可視化写真(Fig.3)とほぼ同様である。

入口チャンバー内の渦流領域が小さくなってい る。また,各分岐流路入口部の剝離泡領域の大き さがほぼ等しくなっていることは,各分岐流路内 の速度が均一に近づいたことを示している。この 結果は後述の流れ関数の数値計算の結果ともよく 一致している。Fig.16に本モデルについての数値 計算による圧力分布図を示す。分岐流路入口の左 側壁面の先端部の高圧部は主流がそこに衝突して 生じたものであり,各分岐流路の入口に見られる。 これは主流が入口チャンバーの深部まで到達して いることを示している。前モデル(Fig.7)の場合に はこの高圧部は分岐流路1番目から6番目の間に



Fig. 15 Flow pattern by hydrogen-bubble method



*Re*=500 (Outlet chamber width 40mm) **Fig. 16** Pressure contour lines

観られるのみである。

出口チャンバーの流出口付近の最も低い低圧の 領域は小さく,各分岐流路の出口部分に波及して いない。このため、1番目の分岐流路への流入が 抑えられ、極端な流入が防止されている。すなわ ち、出口チャンバー容積を大きくすることで各分 岐流路への流量が均一化されたと言える。

Fig.17に,流れ関数についての計算結果を示す。 入口チャンバー内において,渦流領域は分岐流路 2番目から末端まで存在している。前モデルの場 合(Fig.8)より短く,その幅も狭い。このことは入 ロチャンバーに流入した主流が入口チャンバーの 奥まで到達し各分岐流路に流入していることと関 連している。また,各分岐流路の剝離泡域はほぼ 同等であることからも各分岐流路に均等に分流し ていることを示している。

**Fig.18**に、出口チャンバーの容積が小さいモデルと大きいモデルとの流量分布の比較を示す。出



*Re*=500 (Outlet chamber width 40mm) **Fig. 17** Stream function contours



Fig. 18 Effect of outlet chamber width

ロチャンバーの容積が拡大されたモデル(○印)の 流量分布は,容積の小さい前モデル(□印)に比べ 改善されていることが,実験と計算結果で明らか となった。数値計算の結果はいずれのモデルの場 合にも,実験結果と良く一致している。これによ り層流域において,計算により分岐流路内の流量 分布の推定が可能となった。

#### 4. まとめ

熱交換器内の分岐流路内の流量分布の解析を行い,層流域内において,その流量分布の偏りと防止方法について下記の結論を得た。全分岐流路の 断面積と入口チャンバーの流れに垂直な面の断面 積との比(Ar)が5.0と大きく,かつ,層流域におい て,

- 出口チャンバーの容積が小さい場合は、多分 岐管内の流量分布は出口チャンバーの流出口に 近い分岐流路に最も多く、離れた分岐流路には 少ないことが判明した。
- 2)この現象が生じる原因は、分岐流路内の圧力が出口チャンバー内の流出口付近の低圧領域の影響を受け、この領域に近接した分岐流路の圧力が低下し、他の分岐流路より低くなるために入口チャンバー内の主流の流入を促すことと判明した。
- 3)出ロチャンバーの容積の拡大をすることが、 出ロチャンバーの流出口に近い分岐流路の流量 の偏りを防止できることを明らかにした。
- 4)数値計算による分岐流路内の流れの予測は、 実験値とよく一致し、効果的な手段であること を示した。

研究に助言をいただきました二宮助手と,可視 化実験に応援をいただいた浦井技官に感謝の意を 表します。

#### 参考文献

- T. Ueda and T. Kubo : On the Characteristcs of Divided Flow and Confluent Flow in Headers, Bulletin of JSME Vol. 12, No. 52 (1969) 802-809
- a、藤井、高橋:屈折管内の流れに関する研究、空気調和・ 衛生工学会論文集、No.10(1979)11-21
- Suu: Dividing Flow Mechanisms in Pipe Junctions, Trans. SHASE, No.11 (1979) 51-62
- 4) 江崎,深野,重光,松下,戸田:水平な多分岐管への偏流に 関する研究,日本機械学会論文集(B編),56巻528号(1990) 2247-2256
- R. A. Bajura and E. H. Jones, Jr : Flow Distribution Manifolds, Trans. ASME, Journal of Fluids Engineering, (Dec. 1976) 654-666
- 6) A. B. Datta and A. K. Majumdar : Flow Distribution in Parallel and R everse Flow Manifolds, INT. J. HEAT and FLUID FLOW, Vol. 2, No.4, (1980) 253-262
- 7) 生田,秋山,杉山:熱交換器内の流動解析,可視化情報シン ポジウム講演論文集, Vol. 13, Suppl. No. 1 (1993) 191-194