管群を横切る気泡流の流動特性*

岩城 智香子^{*1}, チョン・カーウィー^{*2}
文字 秀明^{*3}, 松井 剛 [—]*4

Characteristics of Bubbly Cross-Flow over Tube Bundles

Chikako IWAKI^{*5}, Cheong KARHOOL,
Hideaki MONJI and Goichi MATSUI^{*5} Power & Industrial Systems Research & Development Center, Toshiba Corporation,
Shinsugita-cho, Isogo-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 235-8523 Japan

Shell and tube type of heat exchangers are widely used in many applications. Understanding on the cross-flow over tube bundles in a shell is not well established due to the flow complexity and difficulty in measurement, especially in the case of two-phase flow. More detailed and accurate velocity data are needed in order to establish reliable design and optimum performance for tube bundle models. This study was aimed at clarifying the structure of bubbly cross-flow over tube bundles by obtaining detailed velocity data using Particle Image Velocimetry (PIV). Experiments were conducted on two types of model, in-line and staggered tube bundles with pitch-to-diameter ratio of 1.5, containing 20 rows of five 15 mm O.D. tubes in each row. The images of liquid flow and bubbles were distinguished by optical filtering and image processing techniques. The velocities of liquid flow and bubbles were measured successfully and characteristics of the bubbly cross-flow were clarified.

Key Words: Bubbly Cross-Flow, Tube Bundles, PIV, Flow Structure, Optical Filtering

1. 結 言

化学工業、発電プラント、食品工業など様々な分野において重要な役割を果たしている熱交換器の中でも、シェル・チューブ型の熱交換器は最も一般的であり、ケトル式リボイラ、給水加熱器、蒸発器、換気空調器などに幅広く利用されている。シェル・チューブ型の熱交換器設計においては、その伝熱流動特性を把握することが必要不可欠である。特に、管群を横切る流れの圧力損失、管内外の熱伝達係数を評価することなどが重要となる。これらは、工学的には種々の経験的な計算式によって、ある程度評価することが可能であるが、いずれもその使用範囲には制限がある。

管群を横切る流れの実験的な研究は、圧力損失、熱伝達に着目した研究がいくつか報告されている^{[1]~[8]}。

しかしながら、これらの報告は、可視化による流れの定性的な傾向や圧力損失、熱伝達係数の実験式に着目したもので、詳細な流動構造については明らかにされていない。したがって、熱交換器としての性能評価や信頼性のある設計手法を確立するためには、より詳細で正確な流動構造の把握が求められている。

画像処理計測の一つである PIV (Particle Image Velocimetry) はセンサ挿入による流れ場の攪乱がなく、流れ場の 2 次元平面における計測データが瞬時に得られるという利点があるため、管群周りの流れなど、特に障害物のある流れ場の計測には有効である。管群を横切る流れ場に PIV を適用した結果については、液単相の場合はすでに報告されている^[9]。

ところで、熱交換器内の流れは、ケトルリボイラや蒸発器など相変化を伴うものが多く、少なくともその 60% は二相流であるとされている。しかしながら、熱交換器内の流れが二相流の場合の流動構造はよくわかっておらず、工学的に重要なボイド率や流動様式などの評価には、均質流を仮定したモデルや円管内の流動様式が使用されているのが現状である。そこで本研究では、PIV を用いて管群を横切る二相流の流動特性を明らかにすることを目的とする。実機の熱交換器のボ

* 原稿受付 2004 年 9 月 24 日。

^{*1} 正員、(株)東芝電力・社会システム技術開発センター
(〒235-8523 横浜市新杉田町 8)。^{*2} 筑波大学大学院システム情報工学研究科(〒305-8573 つくば市天王台 1-1-1)。^{*3} 正員、筑波大学システム情報工学研究科。^{*4} 正員、近畿大学生物理工学部(〒649-6493 和歌山県那賀郡打田町西三谷 930)。

E-mail: chikako.iwaki@toshiba.co.jp

イド率は広範囲であるが、ここでは PIV による計測が可能である低ボイド率の流れを対象とした。

2. 試験装置および計測方法

2・1 可視化試験体および試験装置 試験体の配列は実機の管群の一部を切り出した形状を模擬しており、寸法は実機の値を参考にして定めた。最も代表的な形状として、図 1 に示すように正方配列と千鳥配列の 2 体を製作した。いずれも管径 $d = 15\text{mm}$ 、ピッチと管径との比 $p/d = 1.5$ で、1 段 5 本で 20 段の配列とした。壁の影響を排除するため、両端の管は半分壁に

Fig. 1 Test section

Fig. 2 Schematic diagram of test loop

Table 1 Experimental conditions

Liquid flow rate [m^3/h]	0.60 – 6.48
Liquid superficial velocity j_L [m/s]	0.037 – 0.4
Gas flow rate [l/min]	0.5 – 2.0
Gas superficial velocity j_G [m/s]	$1.8 \times 10^{-3} - 7.4 \times 10^{-3}$
Quality	$3.4 \times 10^{-6} - 1.4 \times 10^{-4}$
Pressure	Atmospheric pressure
Temperature [$^{\circ}\text{C}$]	25 – 28

Fig. 3 PIV measurement system

埋め込む構造とした。流路は $90\text{mm} \times 50\text{mm}$ の矩形形状のチャンネルで、レーザーで内部の流れを可視化するためにアクリル製材で製作した。また管群にはパイレックスガラス棒を用いた。試験体は、図 2 に示すようなポンプ駆動式の循環ループに取り付けられ、試験体下部に取り付けた $10\mu\text{m}$ 孔の焼結金属から窒素ガスを吹き込み、試験体に流入する流れが気泡流となるようにした。液体と窒素ガスの流量を計測し、気液の流量をそれぞれ変えて実験を行った。実験条件を表 1 に示す。

2・2 計測方法 液相と気泡のそれぞれの流速に対して、PIV を用いて可視化計測を行った。計測系を図 3 に示す。レーザー光をシート状にして試験体側部より照射し、試験部を流れる流体中のトレーサ粒子からの散乱光の画像を CCD カメラによって取得する。試験体の内部の流れは z 方向の分布がなくほぼ二次元流と見なせるため、 x - y 平面の z 座標中心位置にシートレーザーを照射した。レーザーには YaG レーザを用い、これをパルス照射して CCD カメラによる撮影時刻をレーザーシートの発光タイミングと合わせ、所定の短い時間間隔で得た 2 枚の画像データを基に、相互相関法を用いて速度ベクトルを得た。レーザーおよび

CCD カメラはそれぞれ計測ステージに設置し、高さを調節して試験体の各断面の計測を行った。

管群などのような構造物を含む流路内の流れを可視化するには、構造物と周囲流体との間で屈折率が異なる場合、可視化に必要なスリット光が媒体の境界面において屈折し不均一照明となり、PIV による画像解析が不正確となる^[10]。本研究ではこの問題を解決するために、管群をパイレックスガラス棒で模擬し、作動流体としてパイレックスガラス棒と等しい屈折率をもつ液体として、濃度 56.9wt% の NaI 水溶液を用いることにより試験体での屈折率を一致させ、流れ場全体の可視化を行えるようにした。またトレーサ粒子として、有機蛍光物質 Rhodamine B, ($C_{28}H_{31}ClN_2O_3$) を塗布した直径 10 μm の真球状微粒子ポリマーを混入した。

トレーサを混入した NaI 水溶液にレーザシートを照射すると、気泡は YAG レーザの波長 532nm の光を反射し、トレーサ粒子は 580nm をピークとする波長で発光する。そこで、液相速度を得るためには気泡からの散乱光をカットする長波長透過フィルタ、また気相速度を得るためにはトレーサ粒子からの蛍光をカットする短波長透過フィルタを使用して、それぞれ画像を取得した。

Fig. 4 Flow chart of the process to separate gas-liquid images.

得られたそれぞれの画像から、粒子径と気泡径の大きさの違いにより判別して液相については気泡を、気相についてはトレーサ粒子を除去する処理を行って、気液の速度分布を得た。

2・3 画像処理方法 上述の光学的な手法では、気泡とトレーサ粒子を完全には分離しきれないため、画像解析の誤差を大きくする可能性がある。そこで、気液の画像を光学的に分離した後、さらに画像処理をによって分離した。得られた画像の解析から、トレーサ粒子からの発光は1ピクセル(約0.095mm)以下であることに着目し、粒子の大きさによってトレーサ粒子か気泡かを判別する。

液相流速を得るために気泡を除去する処理の流れを図4に示す。長波長透過フィルタを通して CCD カメラで撮影した画像では、トレーサ粒子はある輝度以上であり粒子は小さい。したがって、この画像から輝度が連続して大きい画像を気泡とみなして消去する。まず、画像を縦横に1ピクセルずつ調べ、着目したピクセルの輝度 $I(i,j)$ がある輝度のしきい値 I_{T1} 以上である場合、隣接する8ピクセルの差を計算し、その差が I_{T2} 以下であるものが2つ以上で連続している場合に、それを気泡と見なしバックグラウンドの輝度 I_{B0} に変更する。しかしながら、この処理だけでは計測面以外のレーザの反射によって写る輝度の小さい気泡や、気泡の輪郭が残る。そこで次に、ある輝度 I_{T3} 以上のトレーサ粒子のみを残すために、輝度がしきい値 I_{T3} 以下であるものを消去する。

一方、気相流速を得るためには、短波長透過フィルタを通して得られた画像から小さいトレーサ粒子を除去する必要がある。トレーサ粒子の大きさが1ピクセル以下であることを利用して判別を行う。画像を液相の場合と同様に1ピクセルずつ輝度を調べ、着目するセル輝度 $I(i,j)$ とその両隣のピクセルの輝度 $I(i-1,j)$ と $I(i+1,j)$ との差をとり、どちらもある輝度 I_{T4} 以上である場合は、トレーサ粒子であるとしてバックグラウンドの輝度 I_{B0} に変更する。

Fig. 5 The original image of two phase flow and its separation results.

Table 2 Factors of uncertainty in PIV measurement.

Parameter	Error category	Elemental error source	Absolute bias limit (B_i)	Absolute precision index (S_i)	Absolute sensitivity coefficient (θ_i)
α	Calibration	Image length	0.7 pix	—	0.008 mm/pix ²
		Physical location	0.0122 mm	—	0.089
		Lens distortion	0.056 pix	—	0.008 mm/pix ²
		CCD chip distortion	0.006 pix	—	0.008 mm/pix ²
		Inorthogonality of optical axes	0.035 rad	—	0.006 mm/pix
		Location of laser sheet illumination	0.5 mm	—	0.04 1/pix
ΔX	Data acquisition	Temporal/spatial fluctuation of laser intensity	0.028 mm	—	11.2 pix/mm
		CCD chip distortion	0.006 pix	—	1
		Inorthogonality of optical axes	0.035 rad	—	0.174 pix
	Data processing	Sub-pixel accuracy (detection of particles displacement)	0.017 pix	0.033 pix	1
		Smoothing by reference matrix	0.073 pix	—	1
		Error vector	—	0.727 mm/s	0.037 mm·pix
Δt	Data acquisition	Trigger pulse	2E-9 s	2E-9 s	1
		Timing of laser illumination	5E-10 s	5E-10 s	1
Δu	Measurement principle	Fluid traceability (acceleration response)	3.734E-10 mm/s	—	1
		Fluid traceability (gravitational subsidence)	0.008 mm/s	—	1
		Particles projection	0.196 mm/s	—	1

上述の処理によって得られた液相の画像の例を図 5 に示す。長波長透過フィルタを通して得られた画像には、粒子が大きく輝度の明るい気泡、粒子が大きく暗い気泡、粒子が小さく明るいトレーサ粒子の 3 種類が含まれている。画像処理によって、明るい気泡と暗い気泡が除去され、トレーサ粒子のみの画像が得られていることがわかる。

2・4 不確かさ評価 PIV 計測の際は、a) 校正に伴う誤差、b) データ収集に伴う誤差、c) データ処理に伴う誤差、d) 計測原理に伴う誤差が生じる^[11]（詳しくは表 2 に示す）。誤差の伝播は偏り誤差と偶然誤差に分けられ、それぞれ正確度 B (Bias limit) と精密度 S (Precision index) を指標として表される。正確度は偏り誤差の上限を示すものである。不確かさ解析においては、誤差要因からこの正確度と精密度を算出し、これらの二乗和をとることで不確かさを評価する。複数の偏り誤差がある場合の正確度は、それぞれの正確度を求めた上で、誤差の伝播メカニズムにしたがって次式で評価する^[12]

$$B = \sum_{i=1}^N (B_i \theta_i)^2 \quad (1)$$

$$S = \sum_{i=1}^N (S_i \theta_i)^2 \quad (2)$$

ここで、 B_i は要因 i の単位をもった正確度、 S_i は要因 i の単位をもった精密度、 θ_i はその感度係数である。

2 時刻の画像の時間間隔を Δt [s]、粒子の画像上での変位量を ΔY [pixel]、撮影された画像の変換係数を α [m/pixel]、物理空間での流体速度を u [m/s] とすると、次の関係式が成立する。

$$u = \alpha \frac{\Delta Y}{\Delta t} + \varepsilon \quad (3)$$

ここで、 ε [m/s] は PIV 計測に伴う誤差である。 u の不確かさを評価する場合、 Δt 、 ΔY 、 α に起因する誤差および計測原理に起因する誤差伝播を計算する必要がある。感度係数 θ_i は式(3)をそれぞれのパラメータで微分することにより得られるが、各要因の感度係数を求め、式(1),(2)によって各誤差を総括することにより、最終的に速度の精密度、正確度および不確かさが得られる。誤差要因となるレンズひずみ、光軸非直交性、照明の不均一、トレーサの追従性等を考慮して正確度と精密度をそれぞれ算出し総括した結果、本計測における速度の誤差は 8.6% となった。

3. 試験結果および考察

3・1 可視化試験体および試験装置 発光間隔 5 ms のストロボを用いて正方配列の流動様式を観察した結果を図 6 に示す。正方配列では、気相流速 $j_g = 1.85 \times 10^{-3}$ m/s、液相流速 $j_l = 3.7 \times 10^{-2}$ m/s (図 6a) のとき、気泡は管の間の主流領域を上昇し、管の後流域に気泡は分布しない。このときの気泡径は 2-3 mm で、気泡の挙動は浮力の効果が支配的である。液相流速が $j_l = 1.0 \times 10^{-1}$ m/s (図 6b) になると、気泡径が 1-2 mm と小さくなると同時に、気泡の挙動は乱れの増加にともなって横方向に大きくなり、上段の管に頻りに衝突しクロスフローとなる。さらに液相流速が大きき $j_l = 3.0 \times 10^{-1}$ m/s (図 6c) では、気泡はさらに小径化して管の後流に引き込まれ渦領域に気泡がトラップされて主流領域よりも管上部で気泡が多く分布する。

Fig. 6 Flow pattern visualized by 5ms strobe light.

一方、千鳥配列では、気相流速 $j_G=1.85 \times 10^{-3}$ m/s、液相流速 $j_L=3.7 \times 10^{-2}$ m/s (図 6d) のときは、気泡は管壁に沿って上昇し側面で管壁から離脱して上段の管の下面に付着するという挙動によって、正分配列と同様に液単相領域が形成される。液相流速が $j_L=1.0 \times 10^{-1}$ m/s (図 6e) になると、気泡は管壁から離脱した後、後上部に引き込まれて単相領域は小さくなる。さらに液相流

束が $j_L=3.0 \times 10^{-1}$ m/s (図 6f) と大きくなると、気泡は管の直上部にも流入し気泡分布が全領域に均一化する。正分配列のように管上部で気泡が循環することはなく、流れの分岐と合流によって、正分配列に比べてより均質に近い分布となっている。

3・2 速度分布 PIV 計測によって得られた正分配列の気液の速度ベクトルを図 7 に、千鳥配列の速度ベクトルを図 8 に示す。気相速度は前述の流動様式とほぼ一致する結果が得られた。すなわち、正分配列の場合は、液相流速 $j_L < 1.0 \times 10^{-1}$ m/s のとき、気泡は管の間の主流領域に主に分布するが、液相流速 $j_L > 3.0 \times 10^{-1}$ m/s になると管の後流領域に引き込まれる。このとき、気泡は管を横切るクロスフローとなるが、管の一段毎に流れの向きが変わり、主流にも蛇行がみられる。また千鳥配列では、液相流速 $j_L < 1.0 \times 10^{-1}$ m/s のとき、気泡は常に管壁に沿って上昇し、管の後流には単相領域が形成されているが、液相流速 $j_L > 3.0 \times 10^{-1}$ m/s では管の後流に気泡が引き込まれ、単相領域が消失している。

図 9 に正分配列の気液の y 方向速度成分を示す。横軸は試験体の中心を 0 とし、管径で無次元化して示した。気相流速 $j_G=3.70 \times 10^{-3}$ m/s、液相流速 $j_L=3.7 \times 10^{-2}$ m/s のとき (Fig. 9(a))、管上部の領域は極めて流速の小さい液相で満たされ、気泡の速度は 0 である。主流領域での気液速度の差は大きく、気液の速度比は 2.0 以上である。液相流速 $j_L=1.0 \times 10^{-1}$ m/s では、管上部で気

Fig. 7 Velocity vector fields of each phase in the inline array obtained by PIV.

Fig. 8 Velocity vector fields of each phase in the staggered array obtained by PIV.

泡速度は負から正へと変化しており循環していること。液相流速 $j_L = 3.0 \times 10^{-1}$ m/s で、管上部の循環領域は大きくなり、この影響で主流の発達が抑制される。主流域の速度比は循環領域に比べてなお大きく、このためボイドの分布が主流よりも管の上部で大きくなると考えられる。

同様に、千鳥配列の y 方向速度成分を図 10 に示す。気相流速 $j_G = 3.70 \times 10^{-3}$ m/s においては、二相それぞれの速度分布は正分配列に比べて平坦で、管上部の単相領域は正分配列より小さい。液相流速 $j_L = 1.0 \times 10^{-1}$ m/s では、管上部の後流が発達しこの領域での二相の速度差は小さいが、流体の分岐領域ではなお大きい。液相流速 $j_L = 3.0 \times 10^{-1}$ m/s では、後流域で気泡の逆流がみられ、二相の速度差はより小さく、流路断面を通じてほぼ一様となっている。

3・3 乱流強度 図 11 は、液相流速 $j_L = 1.0 \times 10^{-1}$ m/s, 3.0×10^{-1} m/s の場合に、二相流の乱流強度を単相の結果⁹⁾と比較したものである。データは流動状態が安定する 5 段目と 6 段目の管の中間断面でのものである。液相流速の増加に伴って乱流強度は増大しており、前述のような気泡分布の変化に影響を与えていると考

えられる。単相流に比べて二相流では乱流強度が増大するが、正分配列では後流域に比べて主流領域で乱流強度が大きくなるのに対し、千鳥配列では断面全体にわたって大きくなっていることがわかる。単相から二相に変化した場合の乱流強度の増加割合は、正分配列の方が大きい。たとえば、液相流速 $j_L = 1.0 \times 10^{-1}$ m/s のとき、正分配列の単相の場合の平均乱流強度は千鳥配列の 0.57 倍であるが、二相流の場合は 0.87 倍で、二相流の場合の形状による乱流強度の差は、単相に比べて小さい。また、液相流速 $j_L = 3.0 \times 10^{-1}$ m/s のときの正分配列の千鳥配列に対する乱流強度の比は 0.95 で、流速が大きいほど形状の依存性が小さいと言える。

乱流強度の大きさから、対流熱伝達率は正分配列に比べて千鳥配列で大きいと推定される。しかしながら、沸騰二相流においては、Chen 型の相関式で示されるように、熱伝達メカニズムは対流熱伝達と核沸騰熱伝達の二つの熱伝達メカニズムに支配される。二つのメカニズムの相対的な大きさについては、Chan and Shoukri (1987) が、低熱流速の場合は二相対流熱伝達の効果が支配的で、高熱流速の場合は核沸騰熱伝達が支配的であると報告している^[3]。核沸騰は対流によって

Fig. 9 Velocity distributions of liquid and gas phases behind 1st row of tubes in in-line array.

Fig. 10 Velocity distributions of liquid and gas phases behind 1st row of tubes in staggered array.

Fig.11 Turbulence intensity

Fig.12 Slip ratio obtained at $j_G = 1.85 \times 10^3$ m/s.

抑制されるため、熱伝達特性の評価については別途温度分布の計測が必要である。

さらに、前述のような気泡の分布や速度分布の相違は、局所的な熱伝達率に大きく影響すると推定される。

3・4 スリップ比 PIVによって得られた気液速度のスリップ比, $S(=u_G/u_L)$ を、1段目から4段目までの断面平均を計算し、全体積流速 $j_T (=j_G+j_L)$ に対する依存性について表したものが、図 12 である。全体積

流速が大きくなるにつれて、スリップ比は小さくなり均質流に近づく。これは、前述のように気泡の小径化と液相の乱れの増大が要因と考えられる。また、スリップ比は管群の入口における値に対して管群の中で低下しており、特に全体積流速 j_T が小さいほどこの傾向が大きい。全体積流速 $j_T = 3.0 \times 10^{-1}$ m/s 以上では、入口と管群内でのスリップ比の差は非常に小さくなるが、これは前述のように、全体積流速 j_T が小さいほど管群による乱れ増大の効果が大きいとと考えられる。

管群配列による相違については、全体積流速 j_T が小さいときに正正方配列の方がスリップ比は大きい傾向がある。正正方配列では流路の特徴により主流を上昇する気泡の割合が多い、一方、千鳥配列では、単相での計測結果から¹⁰⁾も明らかなように、交互に配置された管によって分岐と合流が繰り返される結果、流れ場全体にわたって液相の乱れが促進され、スリップ比が小さくなると推定される。しかしながら、全体積流速 $j_T = 3.0 \times 10^{-1}$ m/s 以上では配列によるスリップ比の差は小さく、これは前述のように配列による乱流強度の差が小さくなるためと考えられる。

3・5 ボイド率 PIVによって得られた画像データ平均ボイド率を算出してクオリティに対して整理し、従来のボイド率相関式と比較したものを図 13 に示す。ここで、Zuber-Findlay のドリフトフラックスモデル式において使用される係数には、発達した矩形流路における気泡流の式を用いた。実験で得られたボイド率は、クオリティが小さいときは均質流モデルに近いが、クオリティの増加とともに均質流モデルより小さくなっている。均質流モデルに比べて、Thom や Zivi の相関式はこの範囲では均質流モデルに比べてかなりボイド率を小さく評価するため、低クオリティでは実験値を

Fig.13 Variation of the void fraction with quality.

Fig.14 Variation of the void fraction with total superficial flux.

大きく過小評価するが、クオリティが 10^{-4} ではよく一致している。一方、ドリフトフラックスモデルの式は全体的に実験値を過小評価するが、クオリティに対するボイド率の傾向を比較的良好に表していると言える。

同データを全体積流速 j_T について整理したものを図 14 に示す。全体積流速 j_T が大きいほどボイド率は均質流に近づくことが明らかである。以上のことから、管群を上昇する気泡流では、全体積流速が $j_T = 0.3 \text{ m/s}$ 以上ではほぼ均質流と見なせるが、 0.1 m/s 以下では均質流の仮定は成立しなくなると言える。

4. 結 言

PIV を管群を上昇する気泡流に適用し、得られた詳細流動構造の特徴を下記にまとめる。

- (1) 管群を上昇する気泡流の可視化画像を、光学的手法と画像処理手法を用いて気液分離することにより、それぞれの速度分布を得ることができた。
- (2) 正方配列の場合、液相流速 $j_L < 1.0 \times 10^{-1} \text{ m/s}$ では、気泡の運動は浮力が支配的で、管壁によって形成される主流領域を浮上するが、液相流速 $j_L > 3.0 \times 10^{-1} \text{ m/s}$ では、液相の乱れの増加と気泡の小径化により、気泡は管の後流に引き込まれて循環し、高ボイド領域を形成する。
- (3) 千鳥配列の場合は、液相流速 $j_L < 1.0 \times 10^{-1} \text{ m/s}$ では、気泡は管壁に沿って上昇し、管上部には液単相領域が形成されるが、液相流速 $j_L > 3.0 \times 10^{-1} \text{ m/s}$ では、気泡は管の後流域へ引き込まれて液単相領域が消失

する。しかしながら、気泡は正方配列のように管上部で循環することなく全領域にほぼ均一に分布する。

- (4) 低流速では均質流の仮定は成り立たないが、全体積流速 $j_T > 3.0 \times 10^{-1} \text{ m/s}$ ではほぼ均質流とみなせる。

このとき、管群の配列による気泡の分布は異なるものの、平均的なボイド率は両者でほぼ等しい。

文 献

- (1) I.D.R. Grant, D. Chisholm, Two-phase Flow in the Shell-Side of a Segmentally Baffled Shell-and-Tube Heat Exchanger. *J. Heat Transfer* 101 (1979) 38-42
- (2) M. Kondo, K.I. Nakajima, Experimental Investigation of Air-Water Two-Phase Upflow across Horizontal Tube Bundles. *Bulletin of the JSME*, Vol.23, No.177 (1980) 385-393
- (3) R. Urbrich, D. Mewes, Relation between Gas Void Fraction in Upward and Downward Flow. *Multiphase Transport and Particulate Phenomena 2* (1994) 79-94
- (4) G.R. Noghrehkar et al., Investigation of Two-Phase Flow Regimes in Tube Bundles under Cross-Flow Conditions. *Int. J. Multiphase Flow* 25 (1999) 857-874
- (5) D.S. Schrage et al., Two-Phase Pressure Drop in Vertical Cross-Flow Across a Horizontal Tube Bundle. *AIChE J.* 34 (1988) 107-115
- (6) R. Dowlati et al., Pitch-to-Diameter Effect on Two-Phase Flow Across an In-Line Tube Bundle. *AIChE J.* Vol.36 (1990) 765-772
- (7) R. Dowlati et al., Hydrodynamics of Two-Phase Flow across Horizontal In-Line and Staggered Rod Bundles. *Trans. ASME J. Fluids Engineering* Vol.114 No.3, 450-456.
- (8) R. Dowlati et al., Void Fraction Prediction in Two-Phase Flow across a Tube Bundle. *Trans. AIChE J.* 38(1992)619-622
- (9) Iwaki C. et al., PIV Measurement of the Vertical Cross-Flow Structure over Tube Bundle. *Experiments in Fluids* 37(2004) 350-363
- (10) Matsui G et al., Flow Characteristics in Channel with Local Blockage Packed with Spheres. *Proc. of Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics ExHFT-5(2001)* 1675-1682
- (11) Particle Image Velocimetry Handbook (In Japanese). Japan Visualization Society of Japan (2002)
- (12) ASME Performance Test Codes, Supplement on Instruments and Apparatus, Part1- Measurement Uncertainty. *ANSI/ASME PTC 19.1*(1985)
- (13) A.M.C. Chan, M. Shoukri, Boiling Characteristic of Small Multitube Bundles. *Transactions of the ASME*