

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

衝突噴流冷却の効率向上に関する研究

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2011-11-22 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 角本, 大樹 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/857

修士学位論文

衝突噴流冷却の効率向上に関する研究

平成 13 年度

(2001)

東京商船大学大学院

商船学研究科

商船システム工学専攻

角本 大樹

目次

記号	4
第1章 序論	5
1-1 序	6
1-2 衝突噴流(impinging jet)	7
1-3 衝突噴流冷却 (impinging jet Cooling)	8
第2章 実験装置及び実験方法	9
2-1 実験装置	10
2-2 実験方法	16
第3章 実験結果	18
3-1 水による単相流の実験結果	19
3-2 気液(空気-水)二相流による実験結果	21
第4章 考察	24
4-1 空気容積割合 β による熱伝達率の比較及び検討	25
4-2 ノズルからの噴流の撮影方法	30
4-3 伝熱が良い場合の噴流状態	31
4-4 伝熱が向上する原因	32
4-5 実験 1 の伝熱が向上しない原因	34
4-6 伝熱が悪い場合の噴流状態	35
4-7 伝熱が向上しない原因	37

4 - 8 実験値にバラツキのある原因	38
第5章 結論	39
第6章 謝辞	41
第7章 参考文献	43
付録	45
1.伝熱が良いときの噴流パターン	
2.伝熱が悪いときの噴流パターン	
3.実験値にバラツキがあるときの噴流パターン	

記号

A : ノズル断面積
D : ノズル内径
 d_t/d_x : 銅棒内温度勾配
 f : 摩擦係数
 f_r : 相対ノズル面積
H : ノズルと衝突面積距離
 h : 热伝達率
 j : みかけ速度
 K : 配置補正関数
L : ノズルピッチ
 Nu : ヌッセルト数
P : 壓力
 Pr : プラントル数
Q : 体積流量
 q : 热流束
 Re : レイノルズ数
 T_f : 衝突噴流流体温度
 T_w : 銅面表面温度
U : 平均流速
W : 質量流量
 X_l : 伝熱面からの距離
Y : 伝熱面からのXの距離における銅の温度
 β : 容積流量比
 λ : 热伝導率
 λ_c : 銅の热伝導率 ($\lambda_c = 394 \text{ W/mK}$)
 μ : 粘性係数
 ν : 動粘性係数
 ρ : 密度

添字

L : 液相 (水)
G : 気相 (空気)

第1章 序論

1 - 1 序

本研究では、衝突噴流冷却(Impingement Jet Cooling)をとりあげ、冷却効率の向上を目指した実験を行った。衝突噴流冷却とは、相対的に温度の低い流体を高温部へ衝突させることによって、そのとき得られる高い熱伝達率を利用する冷却方法である。代表的な例として、タービン翼の冷却がよく知られている。衝突噴流冷却はタービン翼冷却以外にも、金属やプラスチックシート等の焼鈍や冷却、エンジン等の高発熱物体の冷却、金属加工等での工作物の冷却等に適用可能である。このため、衝突噴流冷却の効率向上はそれらの分野における応用を考えた場合も重要である。

そこで本研究ではさらなる冷却効率の向上を目指し、二相流体（空気-水）による衝突噴流冷却の実験を行い従来行われている単相衝突噴流冷却との比較をし、その伝熱メカニズムを実験的及び理論的に検討した。

また本研究は伝熱面温度約30°Cで、空気-水の相変化を伴わない強制対流熱伝達率のメカニズムの検討を行った。

1 - 2 衝突噴流 (impinging jet)

噴流が直角に近い角度で固体表面に衝突するとき、これを衝突噴流とよぶ。衝突噴流形態を図1-2-1に示す。

衝突噴流は、(1) 自由噴流領域、(2) 衝突噴流領域、(3) 壁面噴流領域の三領域で構成される。

(1) は自由噴流、(3) は壁面噴流と同一の特性をもつ。(2) は(1)と(3)の移行領域で、流れの方向が急激に変化するので、噴流軸および壁面に沿って大きな圧力こう配が生ずる。よどみ点で圧力は最大となる。

衝突噴流は、ガラス、製紙、繊維、製鉄工業などにおける加熱、冷却、乾燥などに応用される。その利点は、動力源の容量率が比較的少なくてすむこと、流量制御による熱および物質伝達率の調節が容易であること、物体上で局所的に高い熱および物質伝達率が得られること、などである。また、噴流を用いて金属表面のさびやミルのよごれを除去することも行われる。

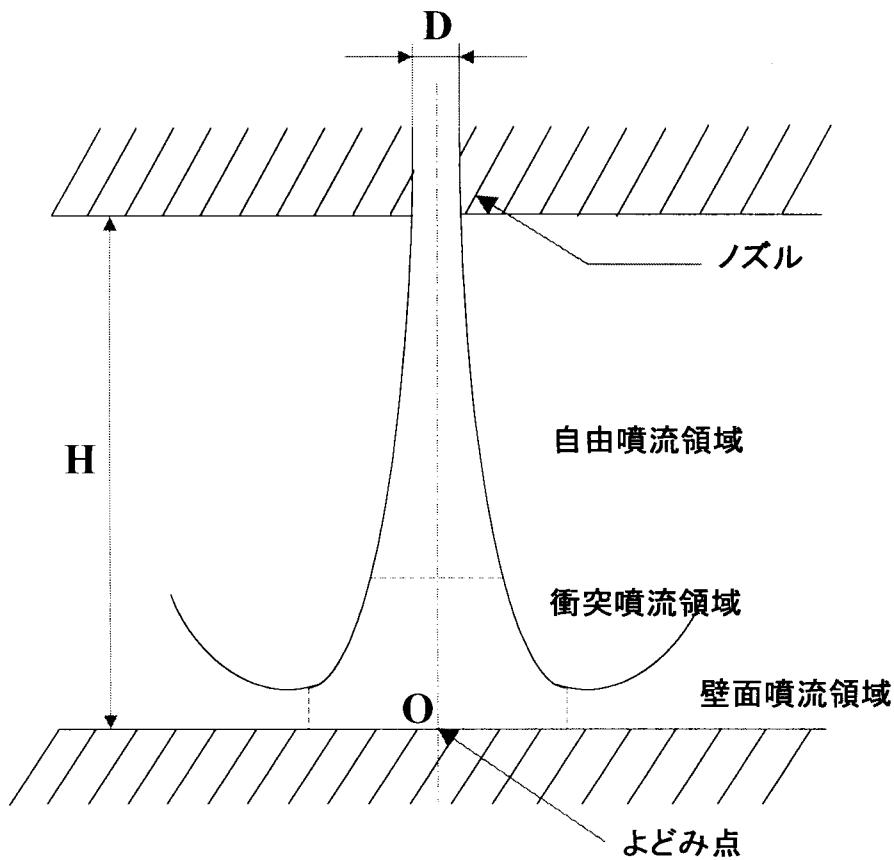


図1-2-1 衝突噴流形態

1 - 3 衝突噴流冷却 (Impingement Jet Cooling)

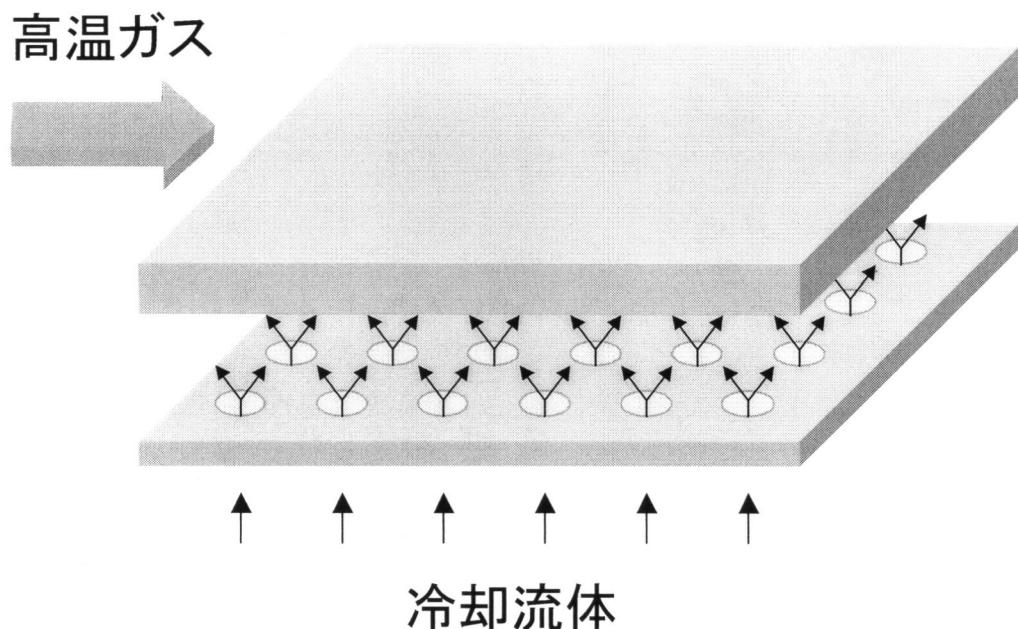


図 1-2-2 衝突噴流冷却の概略図

衝突噴流とは、相対的に温度の低い流体を高熱部に衝突させ冷却する方法である。上の図において、コンプレッサーから抜き出した冷却空気をスリットを通して高温部に衝突させ、均等に冷却する。

第2章 実験装置及び実験方法

2 - 1 実験装置

実験装置の概念図を図2-1-1、実験装置を図2-1-2、図2-1-3、図2-1-5に示す。水は常温の水道水を用い、水の流量計はタービン流量計を使用した。空気は圧縮機より供給し、空気の流量はフロート型流量計を使用した。また水が逆流した場合を想定し、空気流量計に水が進入しないように逆止弁を取り付けた。流入空気流量が増加していくと筒内の圧力変動の影響を受け計測器の目盛が静止できないため、その変動を抑制させる目的で実験装置の筒に流入する空気のラインの間には、減圧弁、絞り、エアチャンバーを取り付けた。

冷却流体の流入方向は、水との接触によるヒーターのショートや伝熱面に水が停滯することを避けるため、また、空気の浮力を考慮し空気と水がよく混合できるように下方から流体を流入する垂直管上方流にした。

流体を流入させる容器は内径40mm、長さ495mmの透明アクリルの筒先に、7本のノズル（内径2mm、ピッチ10mmで千鳥状に配置長さ10mm）を取り付けた。図2-1-7にノズルを示す。ノズル及びノズル先端と伝熱面との距離は可変式にしてある。尚、ノズル入り口は、面を取っていない。本実験は、ノズルから伝熱面までの距離H=8mmで行った。

伝熱面は、直径30mm、長さ200mmの純度99.99%の無酸素銅の上部に埋め込んだカートリッジヒーターにより加熱する。銅棒内の温度分布を測定するため、直径1mmのT型熱電対をそれぞれ伝熱面より、5、40及び80mmのところに丸棒の中心に届くように埋め込んだ。銅棒の側面には断熱材を十分に巻き熱損失を可能な限り少なくする。断熱材の下には、断熱材が濡れることを防ぐため、銅棒が挿入できるように直径30mmの穴を開けた厚さ10mmのテフロンを取り付けた。

また、ノズル入口前の流动状態と伝熱との関係を調べるために3種類の実験装置を用いた。実験1は空気と水を実験装置下部から流入させ、空気と水の出口は同じとしている。実験2は、空気を内径3.5mmの銅管を使用して実験装置の横から上に向けて混入した。水の流入方法は実験1と同様である。実験3は、さらに細かな気泡を作るために水槽に使用されている「丸ストーン」（（株）ミヤザワ製）を実験2で使用した銅管の上部に取り付けた。水の流入方法は実験1と同様である。

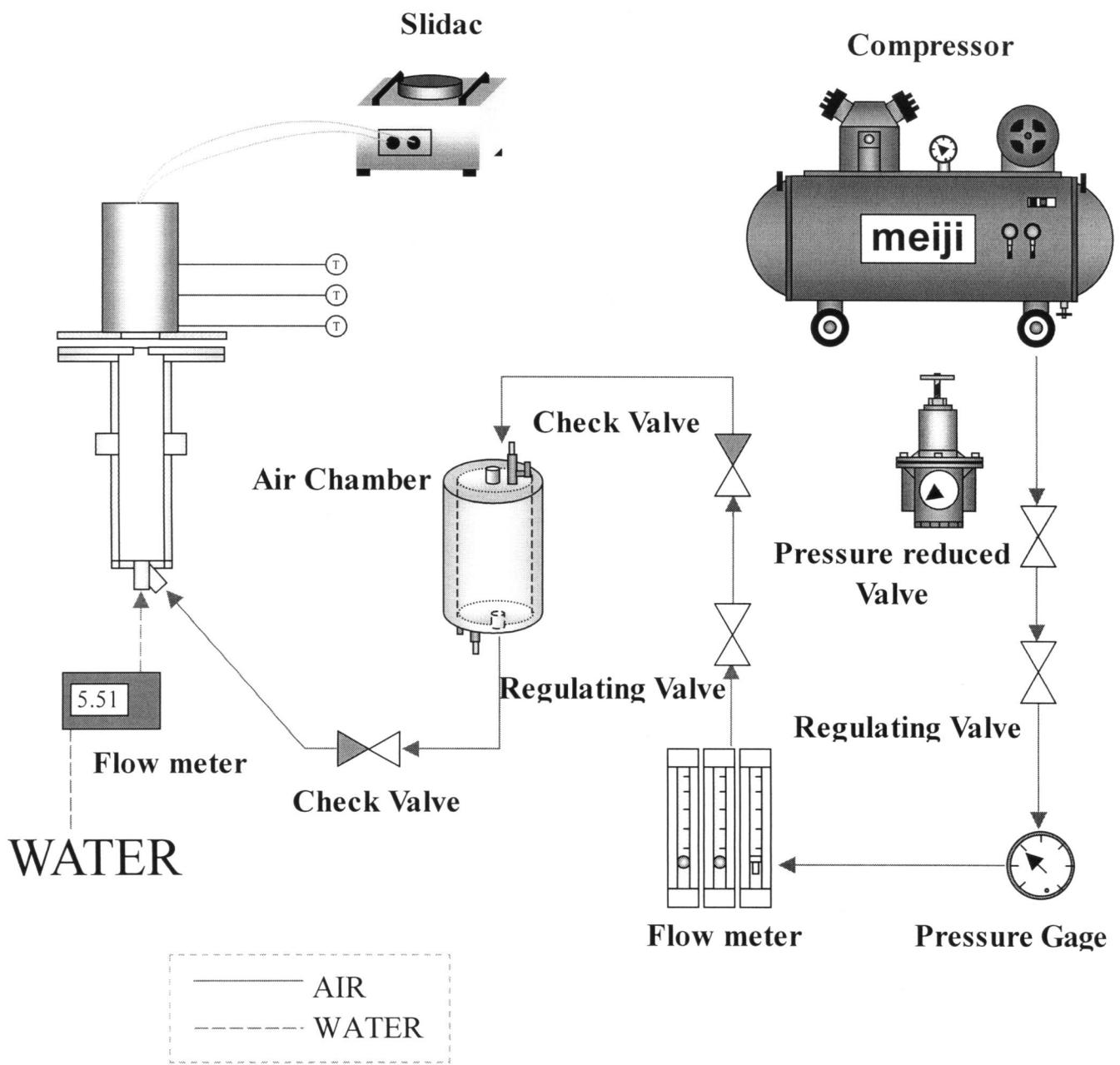


図 2-1-1 実験装置概念図

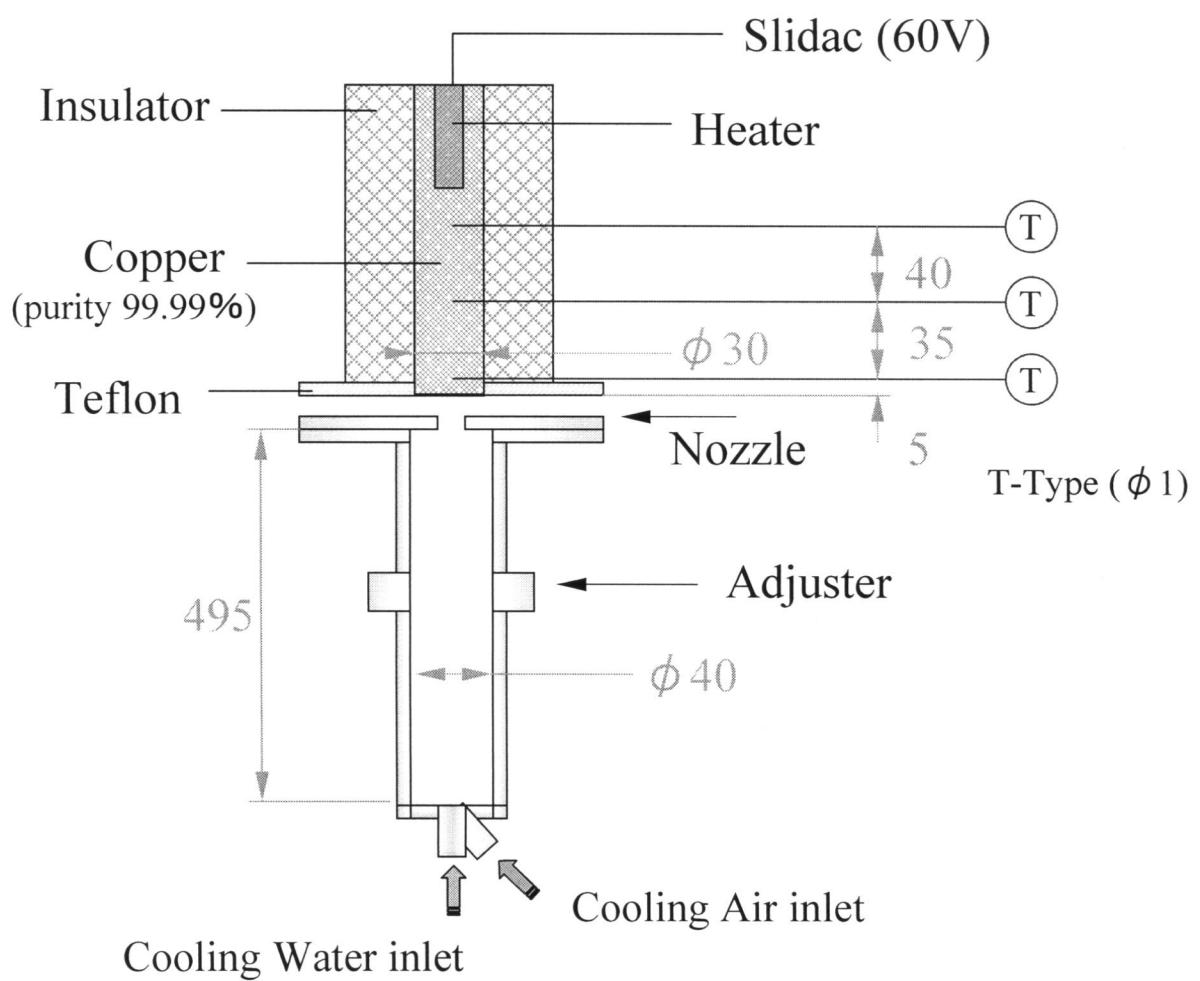
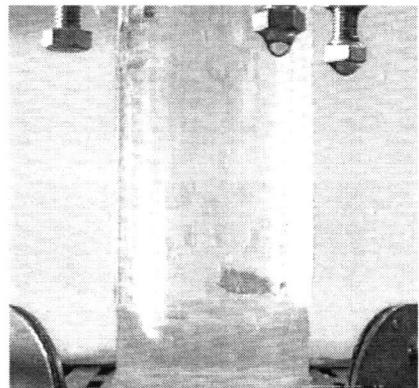


図 2－1－2 実験装置（実験 1）



$\beta = 0.03$
 空気流量 0.2 Nl/min
 水流量 7.01 l/min

—気泡の大きさ—
 3~8mm ($\beta = 0.01 \sim 0.09$)

空気と水を実験装置下部から流入させ、空気と水の出口は同じとしている。

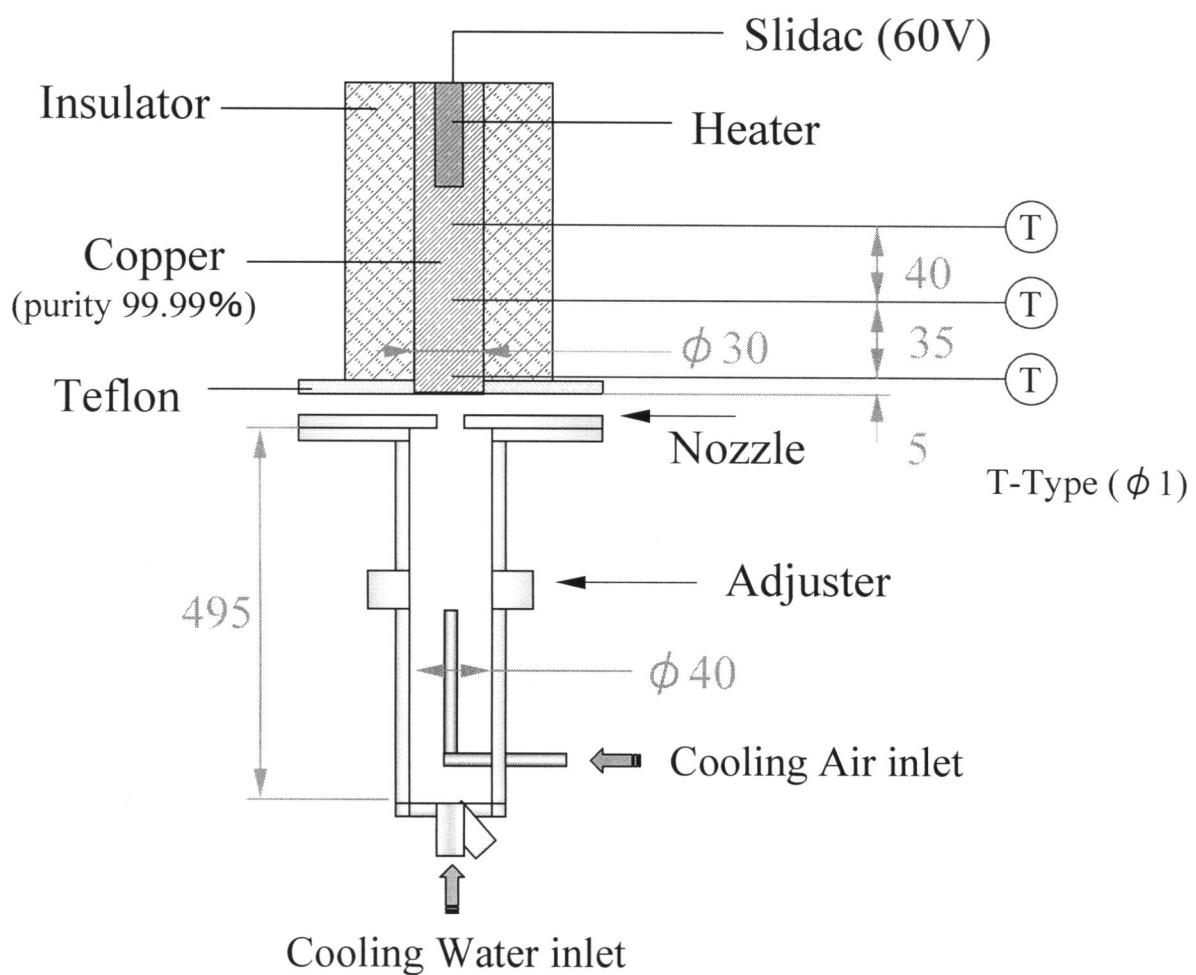


図 2－1－3 実験装置（実験 2）

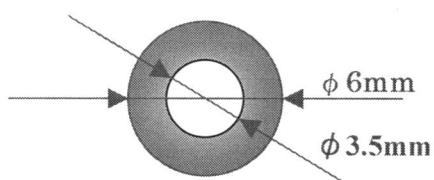
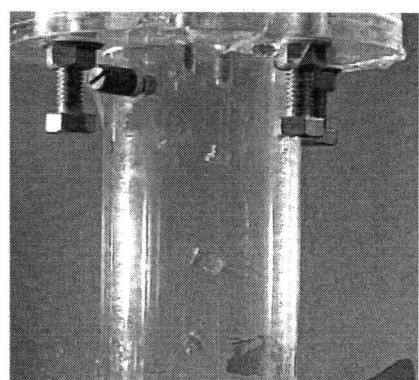


図 2－1－4 空気出口部（実験 2）

—気泡の大きさ—

約8mm ($\beta = 0.01 \sim 0.05$)



$\beta = 0.02$

空気流量 0.06 Nl/min

水流量 3.0 l/min

空気を内径 3.5mm の銅管を使用して実験装置の横から上に向けて混入した。水の流入方法は実験 1 と同様である。

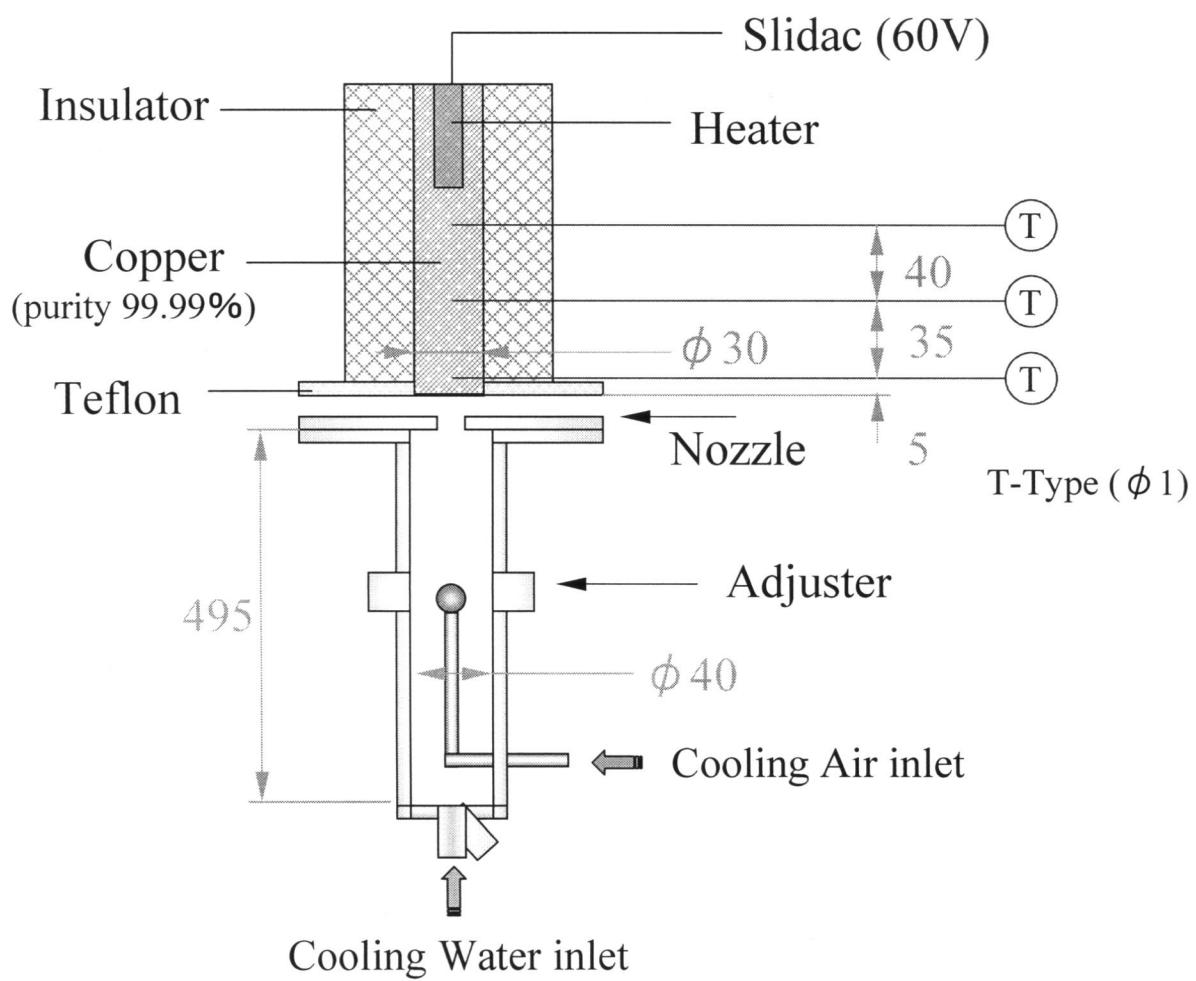


図 2－1－5 実験装置（実験 3）

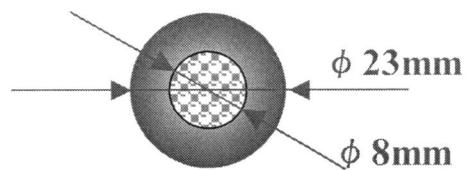
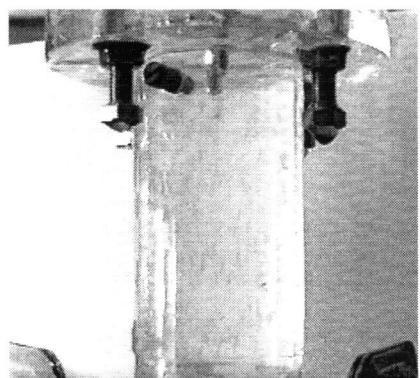


図 2－1－6 空気出口部（実験 3）



—気泡の大きさ—

約2mm($\beta = 0.01 \sim 0.08$)

$\beta = 0.02$

空気流量0.06 Nl/min

水流量6.0 l/min

細かな気泡を作るために水槽に使用されている「丸ストーン」（（株）ミヤザワ製）を実験 2 で
使用した銅管の上部に取り付けた。

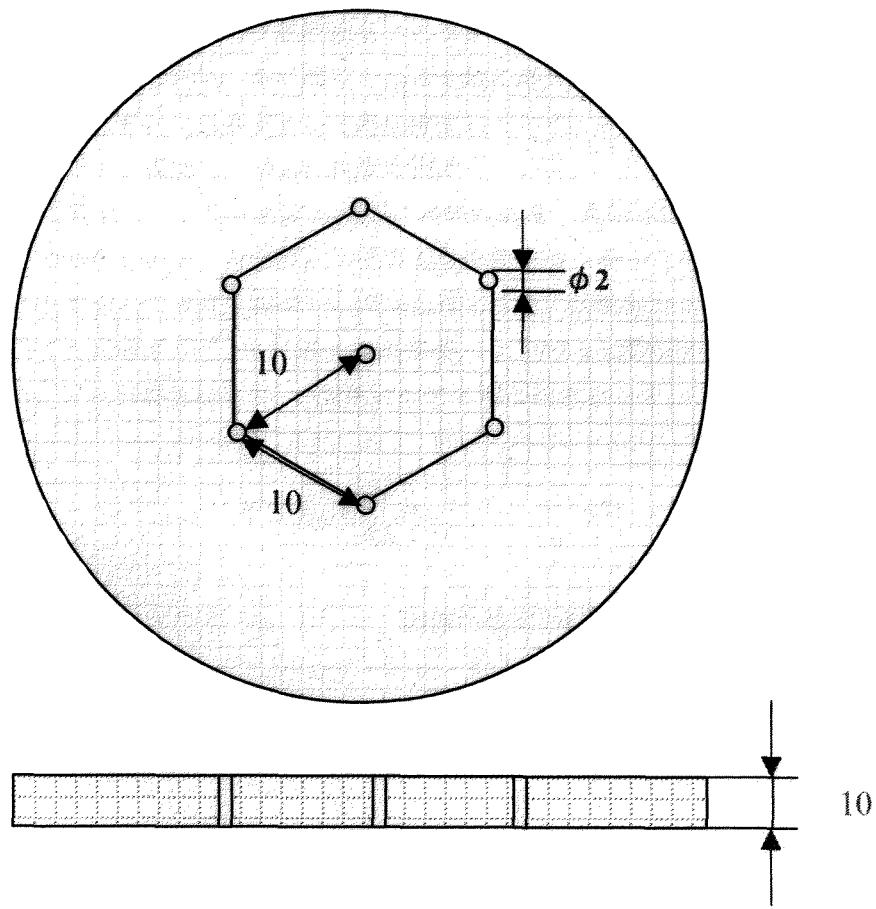


図 2-1-7 ノズル形状

2 - 2 実験方法

実験方法は、まず鏡面仕上げした伝熱面をアセトンを染み込ませた脱脂面で拭き洗浄する。ノズルと伝熱面の位置をあわせ空気、水の順序で流体を筒に混入し、スライダックの電圧を60Vに設定し、銅棒内温度が定常になるのをまってから測定していく。水、空気の流体の量を変化させるごとに定常になるまで十分に待ち、銅棒内温度を測定していく。

図2-2-1に示すように測定温度は縦軸に銅棒内温度、横軸に伝熱面表面からの距離をとる。十分温度が安定するのを待ち、銅棒内の3点の温度を測定し、最小二乗法によって温度勾配、Y切片を求める。そのY切片の温度を銅棒の伝熱面温度とする。伝熱面からの距離における銅の温度を示す直線を式(1)に表す。 T_w は伝熱面表面温度、 dT/dx は銅棒内温度勾配、 x_1 は伝熱面からの距離である。Yは伝熱面から x_1 の距離における銅の温度を示す。

$$Y = T_w + \frac{dT}{dx} x_1 \quad (1)$$

伝熱面熱流束は、フーリエの式(2)により、銅棒内温度勾配に銅の熱伝導率をかけることにより求められる。 λ_c は銅の伝導率($\lambda_c = 394$ (W/m · K))である。

$$q = \lambda_c \frac{dT}{dx} \times 10^3 \quad (2)$$

また、伝熱面表面から流体に伝わる熱伝達率hは、下記の式(3)で与えられる。

$$h = \frac{q}{(T_w - T_f)} \quad (3)$$

T_f は、衝突噴流水温度である。

単相流の衝突噴流の熱伝達率は、数多く行われており経験式も確立している。Martin⁽¹⁾は、水及び空気流体を用い、滑らかなノズルを配列した実験に関し、次の経験式(4)を提示している。

$$\left(\frac{Nu}{Pr^{0.42}} \right)_{ARN} = K \sqrt{f} \frac{1 - 2.2\sqrt{f}}{1 + 0.2(H/D - 6)\sqrt{f}} Re^{2/3} \quad (4)$$

$$f = \frac{\pi}{2/\sqrt{3}} \left(\frac{D}{L} \right)^2 \quad K = \left[1 + \left(\frac{H/D}{0.6/\sqrt{f}} \right)^6 \right]^{-0.05}$$

尚、適用範囲を以下に示す。

$$2000 < Re < 100000$$

$$0.004 < f < 0.04$$

$$2 < H/D < 12$$

D	: ノズル内径	Nu	: ヌッセルト数 ($= hD/\lambda$)
f	: 相対ノズル面積	Pr	: プラントル数
H	: ノズルと衝突面積距離	Re	: レイノルズ数 ($= UD/\nu$)
h	: 热伝達率	U	: 流速
K	: 配置補正関数	λ	: 热伝導率
L	: ノズルピッチ	ν	: 動粘性係数

本実験では、空気一水による二相流の実験は、以下の範囲で行った。

実験 1 : $2600 < Re_{jL} < 10100$ 、 $1.5 < j_L$ (m/s) < 5.3 、 $0.07 < j_G$ (m/s) < 16.1 、 $0.02 < \beta < 0.91$

実験 2 : $3100 < Re_{jL} < 12800$ 、 $1.5 < j_L$ (m/s) < 5.3 、 $0.05 < j_G$ (m/s) < 22.8 、 $0.01 < \beta < 0.93$

実験 3 : $2900 < Re_{jL} < 10600$ 、 $1.5 < j_L$ (m/s) < 5.3 、 $0.05 < j_G$ (m/s) < 4.8 、 $0.01 < \beta < 0.75$

尚、 $Re_{jL} = j_L D / \nu_L$ である。 j_L は水みかけ流速、 j_G は空気みかけ流速である。 ν_L 水の動粘性係数を示す。

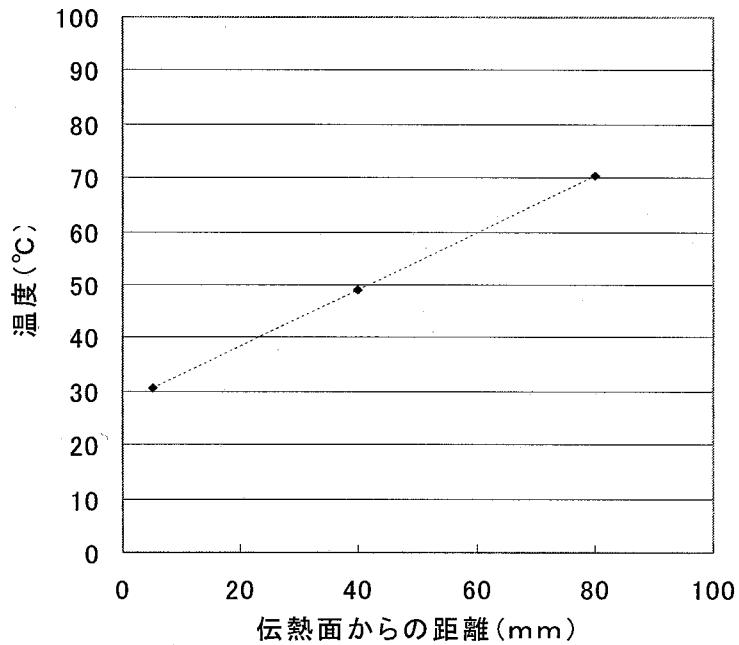


図 2-2-1 銅棒内温度分布

第3章 実験結果

3 - 1 水による単相流の実験結果

実験装置の正確性及び衝突噴流の経験式を確認するために、水単相流の実験を行った。その結果を図3-1-1、図3-1-2に示す。グラフの横軸に $Re_{j,L}$ をとり、縦軸に $Nu_L/Pr_L^{0.42}$ をとる。ノズルと伝熱面との距離は8 mmとした。プロット点は実験値、直線は式(4)のMartinの経験式による予測値である。グラフより、実験値と予測値は一致している。また、再現性も確認できた。これらのことから、水による衝突噴流実験の熱伝達率は、Martinの経験式(4)から求められることが確認できた。

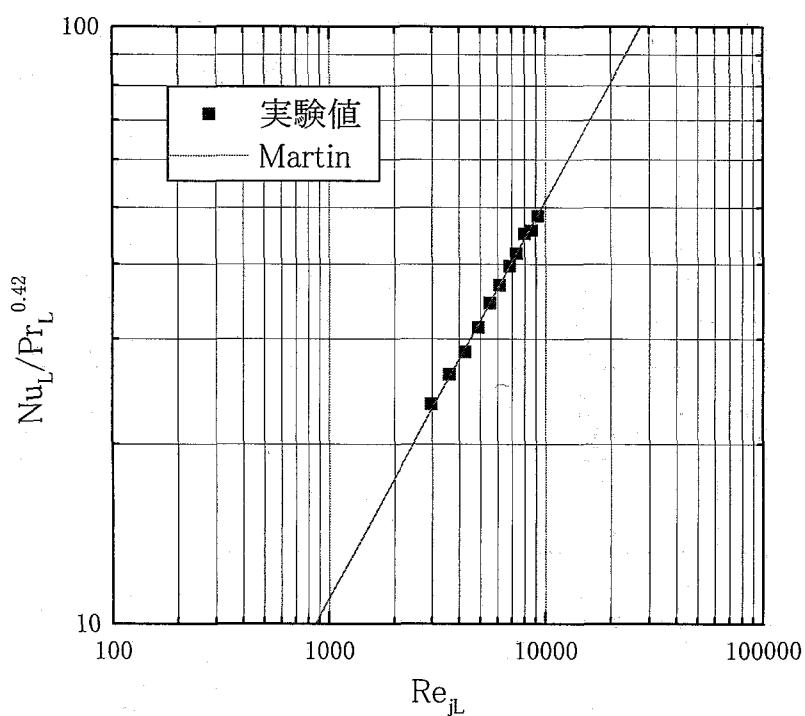


図 3-1-1 水単相流実験

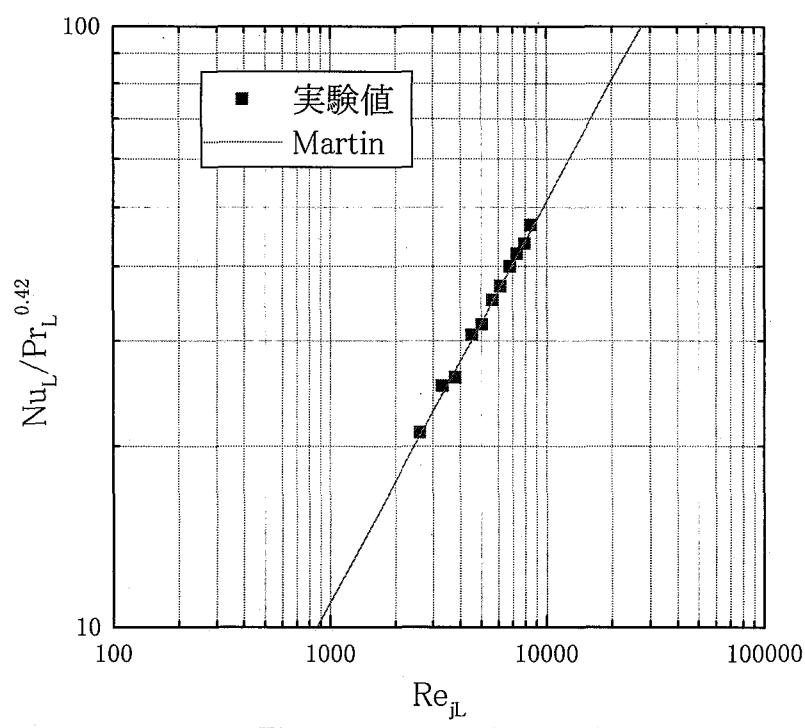


図 3-1-2 水単相流実験

3-2 気液（空気、水）二相流の実験結果

今実験では空気の混入方法を変えて3種類の流動状態をつくり、その流動状態と伝熱との関係を検討した。それぞれの実験データの伝熱面表面温度、銅棒内温度勾配、熱流束の最高値と最小値を下記の表にしめす。

<実験1>

\backslash	伝熱面表面温度 (°C)	銅棒内温度勾配	熱流束 (kW/m ²)	$Re_{j,L}$	$Nu_L/Pr_L^{0.42}$
最高値	29.3	0.6	237.4	10162	59.7
最小値	14.8	0.46	182.4	2617	22.4

<実験2>

\backslash	伝熱面表面温度 (°C)	銅棒内温度勾配	熱流束 (kW/m ²)	$Re_{j,L}$	$Nu_L/Pr_L^{0.42}$
最高値	38.4	0.6	234.8	12850	74.6
最小値	22.7	0.48	187.5	3120	26.3

<実験3>

\backslash	伝熱面表面温度 (°C)	銅棒内温度勾配	熱流束 (kW/m ²)	$Re_{j,L}$	$Nu_L/Pr_L^{0.42}$
最高値	30.2	0.6	238.5	10620	55.0
最小値	19.0	0.48	189.6	2925	23.5

次に図3-2-1、図3-2-2、図3-2-3に実験1、2、3それぞれの全実験データを表した結果を示す。また、図3-2-4に実験1、2、3の実験結果をまとめたグラフを示す。

グラフの横軸に $Re_{j,L}$ をとり、縦軸に $Nu_L/Pr_L^{0.42}$ をとった。ノズルと伝熱面距離は8mmとした。これらの結果から空気の混入により、実験値は予測値を上回っているのがわかる。

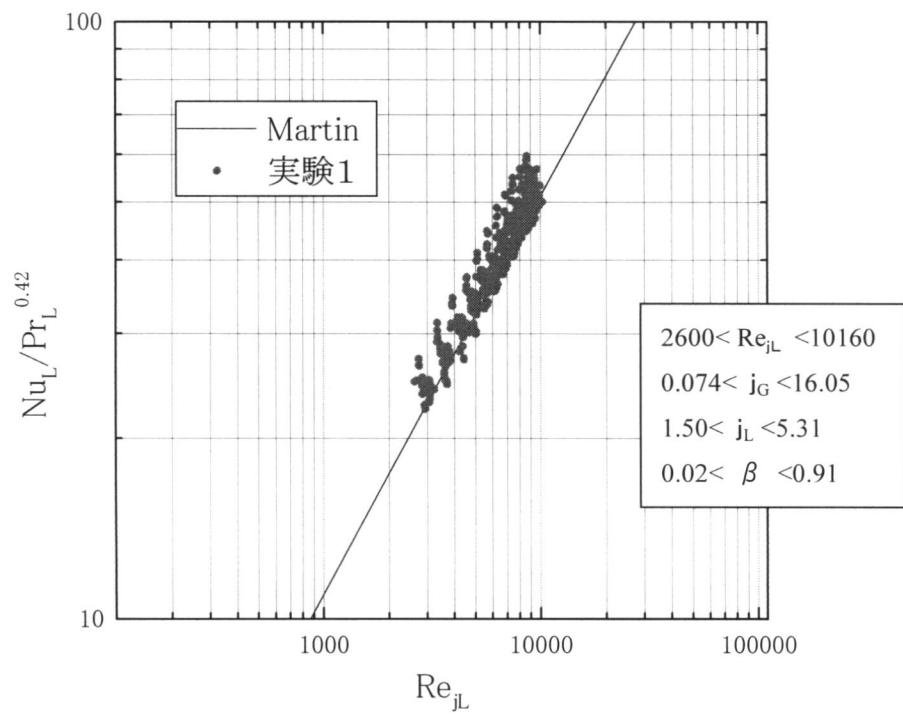


図 3－2－1 二相実験（実験 1）

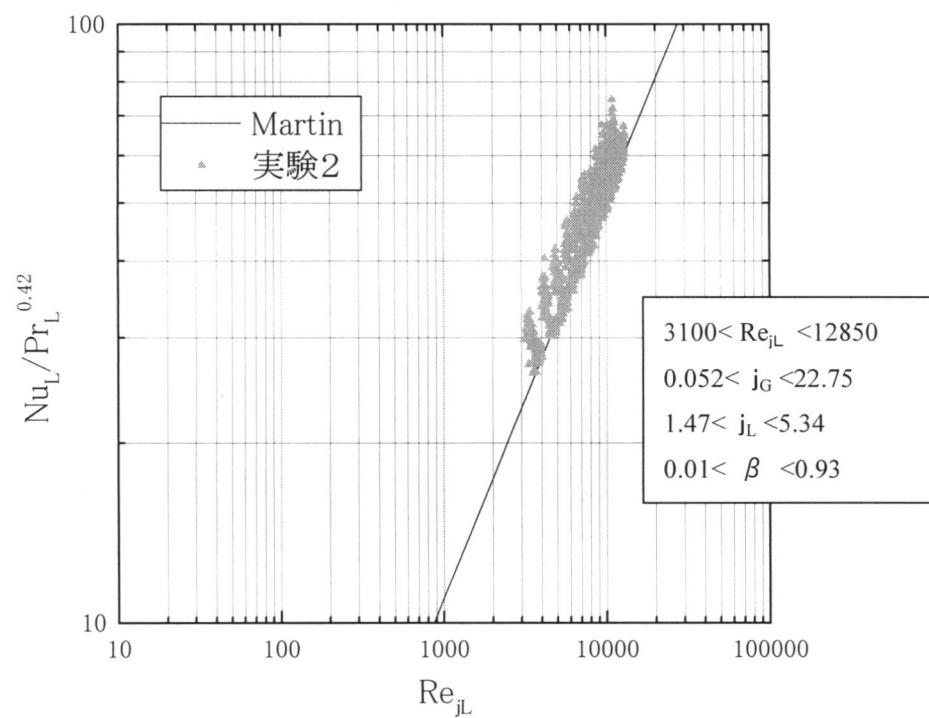


図 3－2－2 二相実験（実験 2）

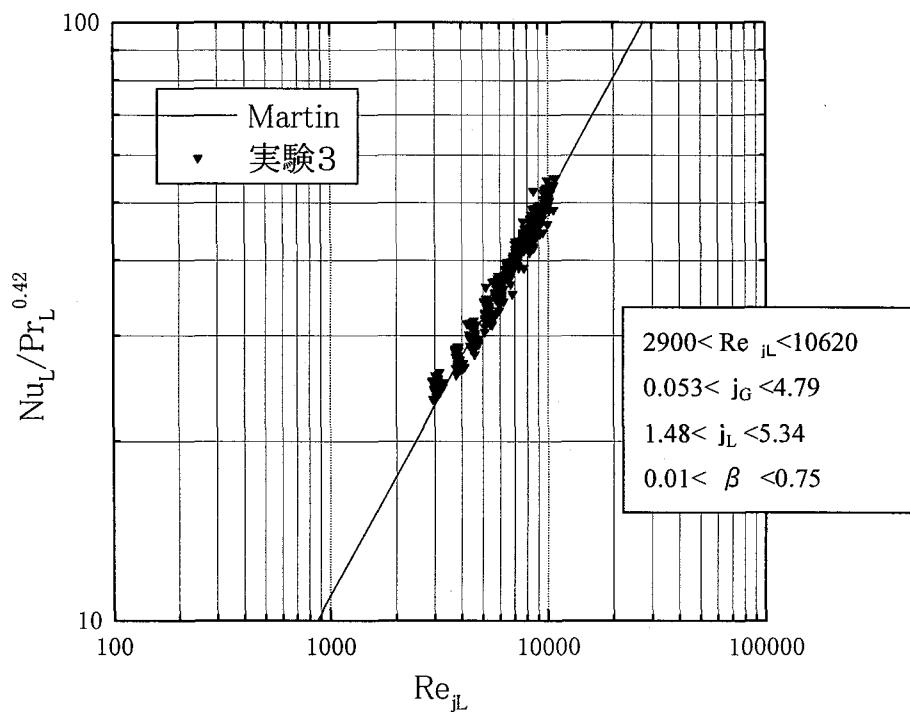


図 3－2－3 二相実験（実験 3）

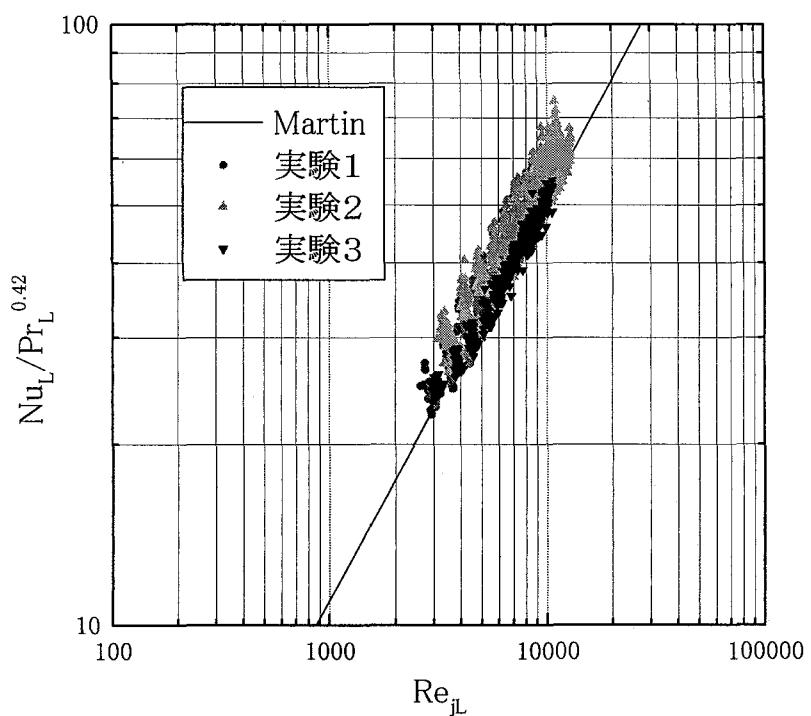


図 3－2－4 全二相実験（実験 1、2、3）

第4章 考察

4 - 1 空気容積割合 β による熱伝達率の比較及び検討

熱伝達率の向上を表す方法として、容積流量比 β を基に検討していく。容積流量比の定義は以下の式である。

$$\beta = \frac{j_G}{j_G + j_L} = \frac{Q_G}{Q_G + Q_L} \quad (5)$$

$$j_G = \frac{W_G v_G}{A} = \frac{Q_G}{A} \quad (6)$$

$$j_L = \frac{W_L v_L}{A} = \frac{Q_L}{A} \quad (7)$$

j_G は空気みかけ流速、 j_L は水みかけ流速である。 W_G は空気質量流量 (kg/s)、 W_L は水質量流量 (kg/s) である。 v_G は空気比容積 (m^3/kg)、 v_L は水比容積 (m^3/kg) である。 Q_G は空気体積流量 (m^3/s)、 Q_L は空気体積流量 (m^3/s)、 A はノズル面積である。

伝熱の促進を具体的に示すため β を基に 3 つの熱伝達率 h 、 h_{jL} 、 h_j を定義し熱伝達率比 h/h_{jL} および h_j/h_{jL} を示す。

h は、二相流実験で得られた熱伝達率であり、 h_{jL} は、二相流体において空気の存在を無視し、水みかけ流速 j_L のみを用いて Martin の経験式より予測した熱伝達率である。また h_j は、水および空気を合わせた二相流体のみかけ流速 ($j = j_L + j_G$) を用いて Martin の経験式より予測した熱伝達率である。これは空気流体部を水流体が流れていると想定した熱伝達率である。尚、物性値の P_r 、 λ 、 ν は、水の物性値を用いた。 h_{jL} 、 h_j のそれぞれ求める式は下記に示す。

$$h_{jL} = K\sqrt{f} \frac{1-2.2\sqrt{f}}{1+0.2(H/D-6)\sqrt{f}} Re_{jL}^{2/3} Pr_L^{0.42} \lambda_L / D \\ = K\sqrt{f} \frac{1-2.2\sqrt{f}}{1+0.2(H/D-6)\sqrt{f}} \left(\frac{j_L D}{v_L} \right)^{2/3} Pr_L^{0.42} \lambda_L / D \quad (8)$$

$$h_j = K\sqrt{f} \frac{1-2.2\sqrt{f}}{1+0.2(H/D-6)\sqrt{f}} Re_j^{2/3} Pr_L^{0.42} \lambda_L / D \\ = K\sqrt{f} \frac{1-2.2\sqrt{f}}{1+0.2(H/D-6)\sqrt{f}} \left(\frac{(j_L + j_G)D}{v_L} \right)^{2/3} Pr_L^{0.42} \lambda_L / D \quad (9)$$

本来、空気は水より熱伝導率が著しく低いため、水の単相流と同じ流速での二相流による熱伝達率は劣化することが予想される。そこで、実験値 h と水のみかけ速度を用いて定義した h_{jL} との比 (h/h_{jL}) と、二相流のみかけ流速を用いて定義した h_j と h_{jL} との比 (h_j/h_{jL}) との比較を行った。尚、 h_j/h_{jL} は、式 (10) に示すように β の関数によって表される。その比較をそれぞれ、図 4-1-1 (実験 1)、図 4-1-2 (実験 2)、図 4-1-3 (実験 3) に示す。また、図 4-1-4 に実験 1、2、3 の比較を示す。

$$\frac{h_j}{h_{jL}} = \frac{\frac{K\sqrt{f}}{1+0.2(H/D-6)\sqrt{f}} Re_j^{2/3}}{\frac{K\sqrt{f}}{1+0.2(H/D-6)\sqrt{f}} Re_{jL}^{2/3}} = \left(\frac{j_G + j_L}{j_L} \right)^{2/3} = \left(\frac{1}{1-\beta} \right)^{2/3} \quad (10)$$

実験 2、3において水と空気を合わせたみかけ流速を用いた熱伝達率 (h_j/h_{jL}) は、 β の小さい領域ではバラツキが多く不安定であるが実験値を過小評価し、 β の大きな領域では過大評価した。

また、図 4-1-5 は (h/h_{jL}) と (h_j/h_{jL}) の比 h/h_{jL} と β との関係を表したグラフである。このグラフから、 $\beta < 0.1$ の領域の一部で伝熱の向上が見られるが、それ以降 β が大きくなるにつれて安定した伝熱の減少傾向を示した。また、空気を混入することで流速が上がるが、伝熱はあまり良くならないという結果が分かった。

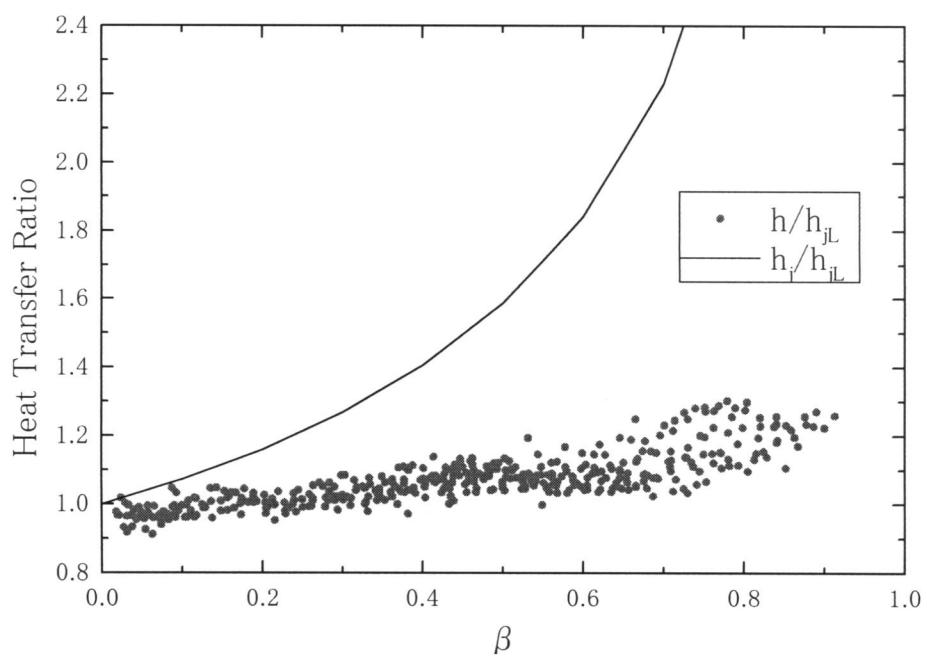


図 4-1-1 热伝達率比と β (実験 1)

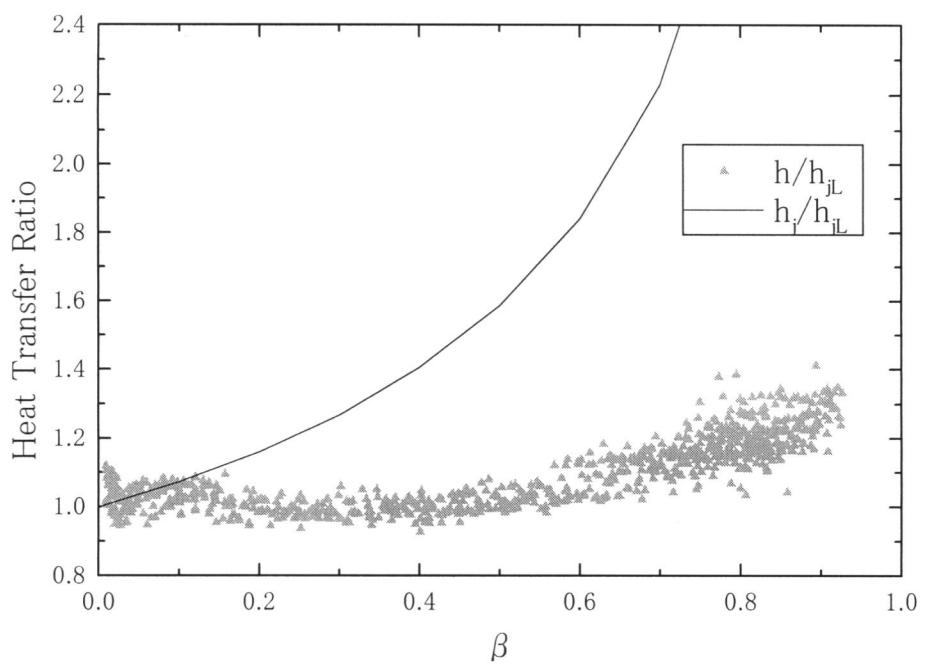


図 4-1-2 热伝達率比と β (実験 2)

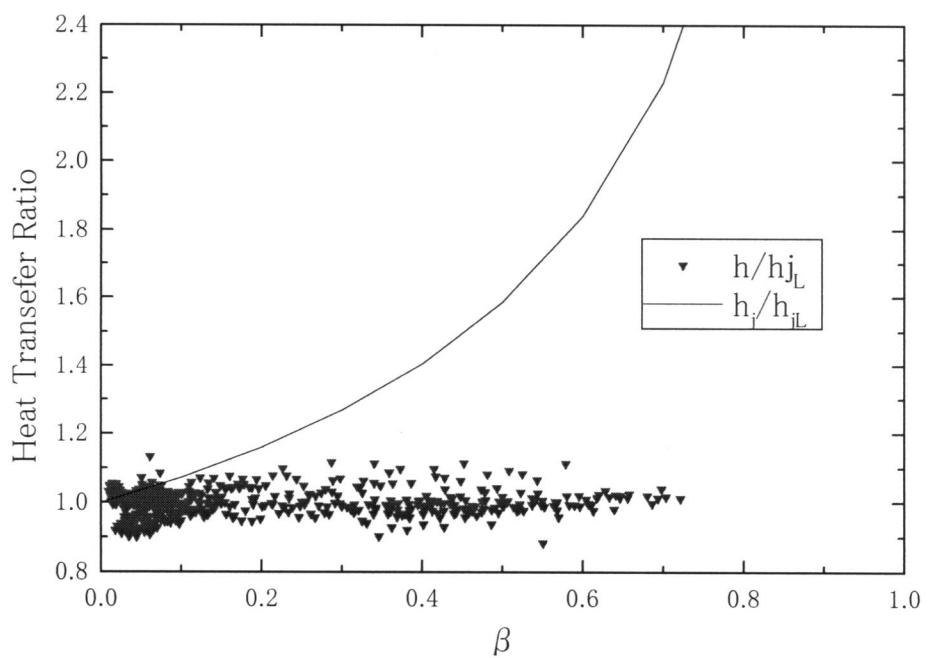


図 4－1－3 热伝達率比と β (実験 3)

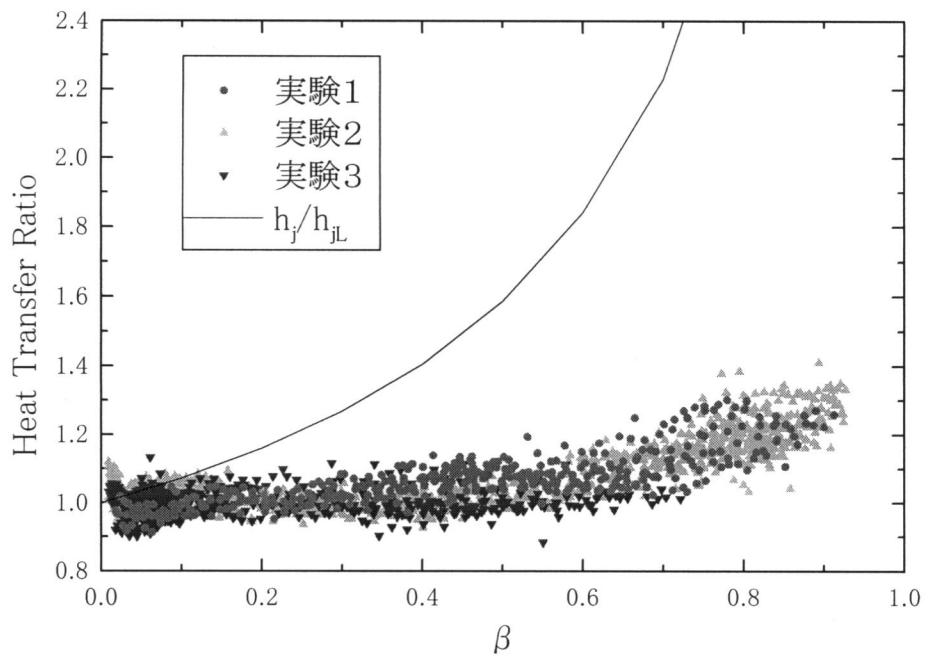


図 4－1－4 热伝達率比と β (実験 1、2、3)

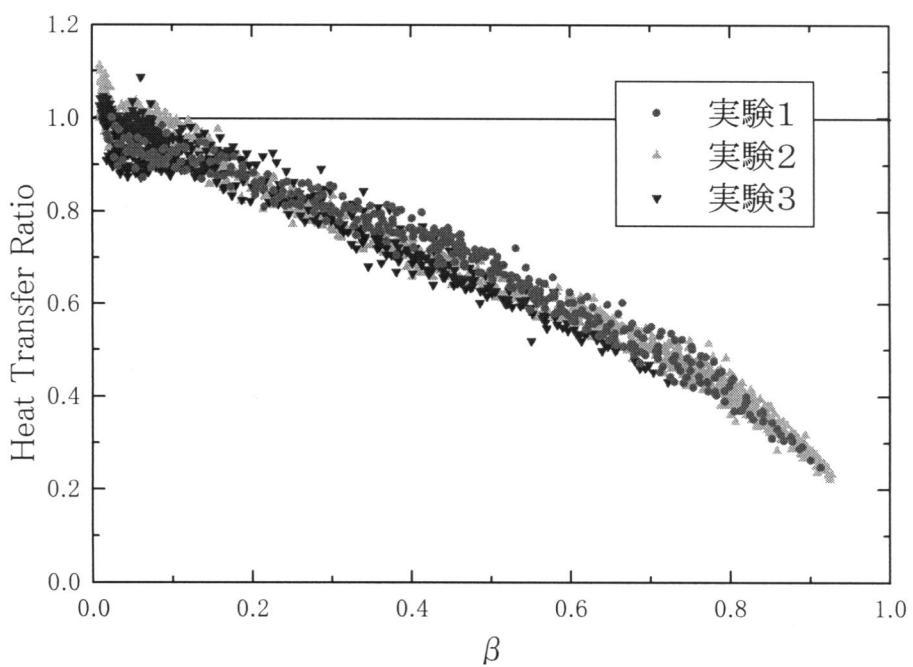


図4－1－5 热伝達率比 (h / h_j) と β

4-2 ノズルからの噴流の撮影方法

固体に接した気体や液体の粒子は、物体表面との分子間力で物体表面に密着し、静止している。伝熱面とこれに接する流体との間で熱伝達があるが、壁面近傍には流体温度が壁面に垂直方向に急激に変化する領域があり、壁面から十分離れると一様温度になる。この温度が急激に変化する領域を温度境界層という。この温度境界層が薄いほど熱伝達率は大きいとされている。

本実験は、結果に示したように伝熱面表面温度はそれほど高くないため、流体の相変化はなく、強制対流のみの熱伝達である。そこで伝熱面に衝突する流体の状態が重要になる。

図4-2-1に示すように、伝熱面における衝突噴流領域および壁面噴流領域を観測するため、透明なガラス板を伝熱面に見立て上部より8mmビデオカメラおよび高速度ビデオカメラで撮影した。なお、撮影はガラス板をノズルから8mmの高さに固定して行った。ノズル入口前の管内状態の撮影も側面より行った。

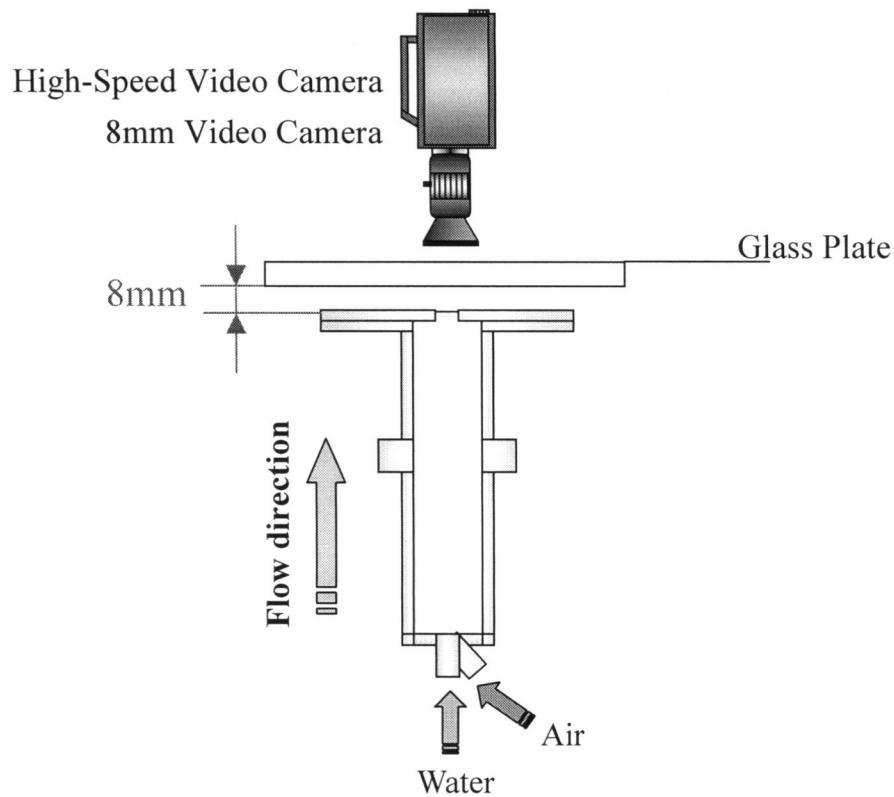
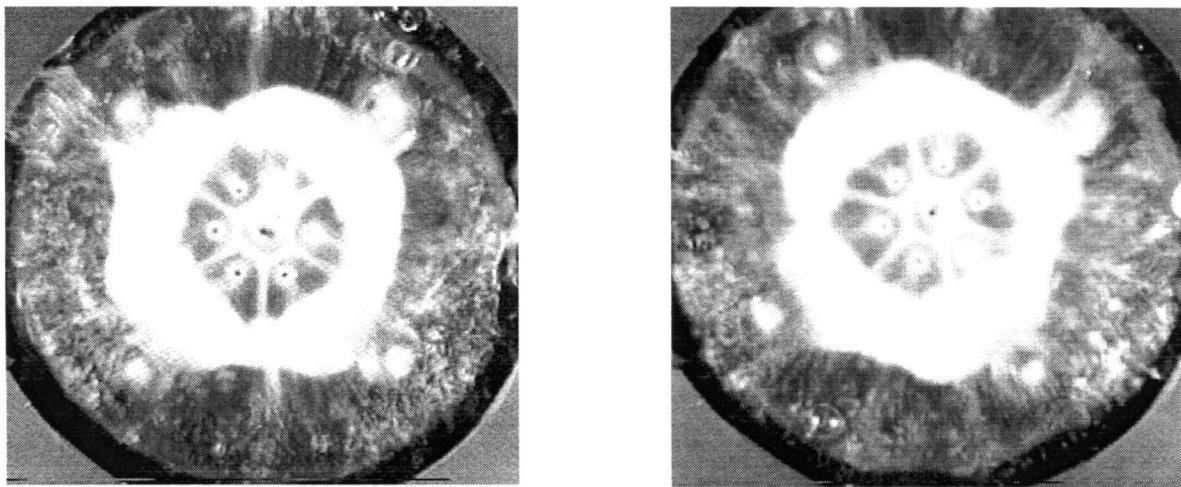


図4-2-1 ノズルから出る噴流の撮影方法

4-3 伝熱が良い場合の噴流状態

実験2、3の伝熱の良い場合のノズルから噴出する噴流の状態を図4-3-1に示す。これらの写真から分かるように伝熱面付近に空気の停滞は見られない。また、気泡は1～数個のノズルを通して、水が途切れ全てのノズルから空気のみが噴出するということはなかった。気泡が噴出することで水壁に乱れが生じた。



実験2
 $\beta = 0.02$
 空気流量0.1 Nl/min
 水流量5.51 l/min

実験3
 $\beta = 0.02$
 空気流量0.12 Nl/min
 水流量6.48 l/min

図4-3-1 伝熱が良い場合の噴流状態

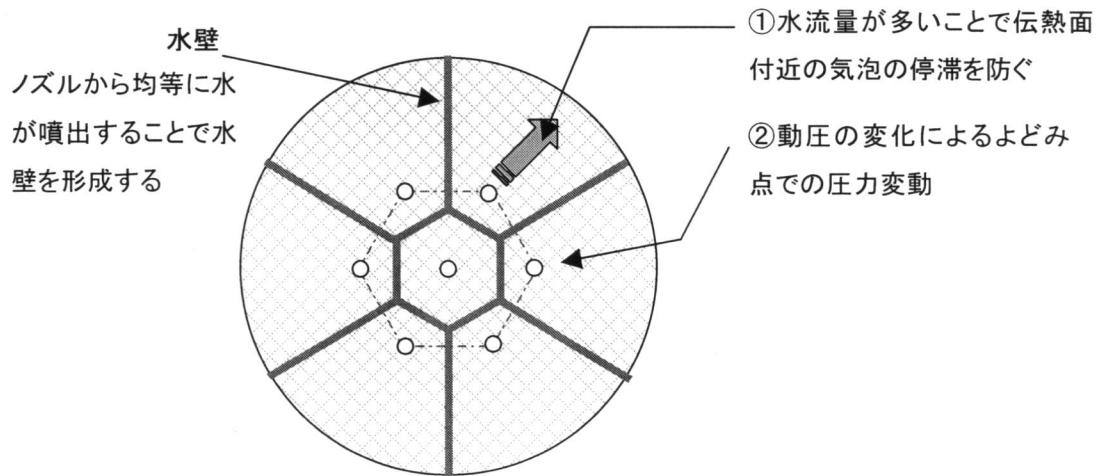


図4-3-2 伝熱が良い場合の噴流状態の特徴

4-4 伝熱が向上する原因

β が小さな領域で伝熱が向上する理由として、よどみ点での圧力変動が考えられる。ベルヌーイの式より、よどみ点の圧力 P_0 は

$$P_0 = P_\infty + \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 \quad (11)$$

で表せる。つまり、ノズルから気泡が噴射されることにより動圧を表す項である $\frac{1}{2} \rho V_\infty^2$ が変化し、

結果、よどみ点の圧力も変動する。このように、よどみ点での圧力変動が伝熱面に接する境界層の波動を引き起こすことによって温度境界層がかく乱され伝熱が向上すると考えられる。

また、気泡流や粒子流などの分散性混相流中の乱れは、液体中の"乱流"がもつ本来の乱れのほかに気泡や粒子の並進運動や体積運動・回転運動によって誘起される擬似乱れの成分を伴う。液体中の気泡は、液体に比べ密度が小さいこと、体積変化や変形が起こること、表面から渦度の生成が起こりにくいこと、熱伝導率が小さいことなどによって、様々な現象をもたらす。例えば気泡の周囲の液体に外力を付加すると、気泡は軽いため、液体より早く加速したり、螺旋運動を伴って上昇したり、気泡どうしが水平に並んでボイド波を形成したり。また粒子では、液体よりも比重が大きいこと、回転運動により大きな揚力を受けること、粒子どうしの衝突により分散することなどによって、粒子流特有の流れを示す。例えば粒子の慣性力により流れが持続したり、壁面にぶつかってエロージョンを起こしたりする。また、自由表面で気泡が破裂するとき、液体中を浮上するだけの場合に比べて瞬間に大きな運動エネルギーおよび渦度が生成される。それらの影響が、熱伝達率を上昇させた原因と考えられる。

また、水流量が多い場合に伝熱の向上が見られることがあった。これは、水流量が多いことで伝熱面付近の気泡の停滞を防ぐためと考えられる。

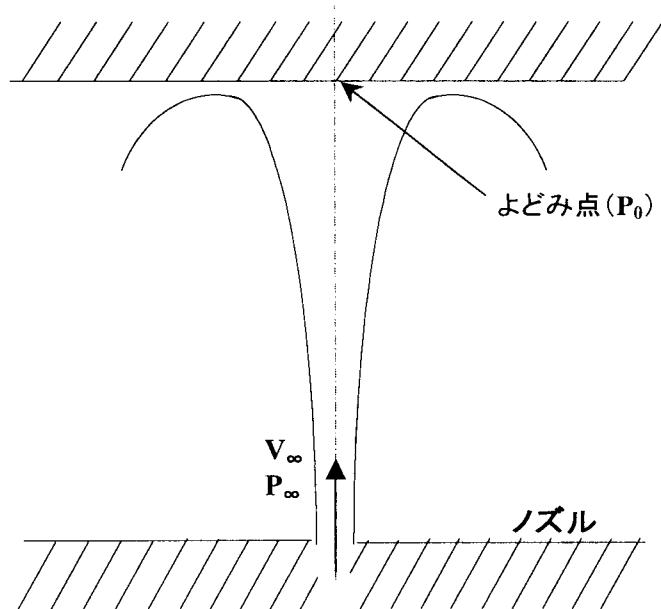


図 4-4-1 よどみ点の圧力変動

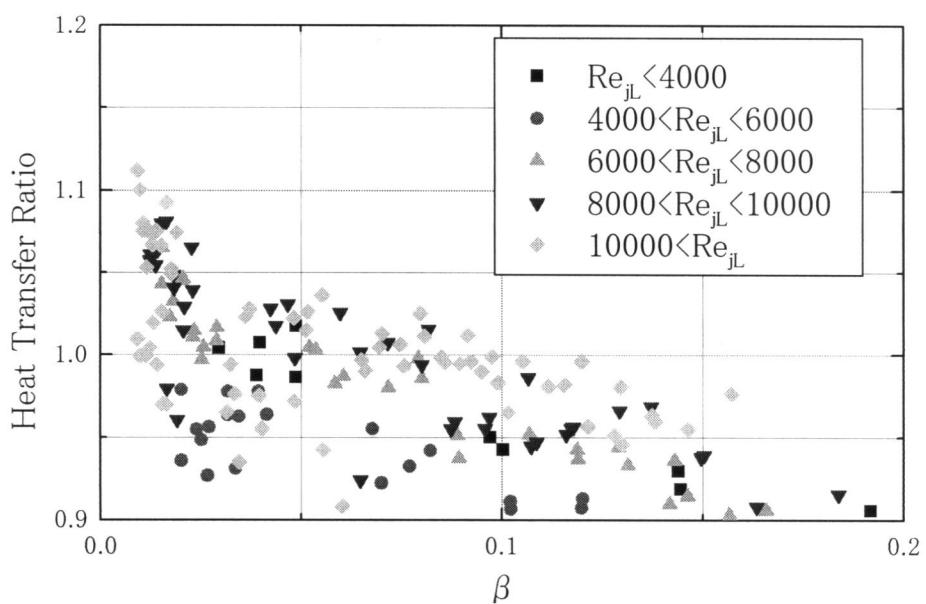


図4-4-2 Re別熱伝達率と β の関係のグラフ（実験2）

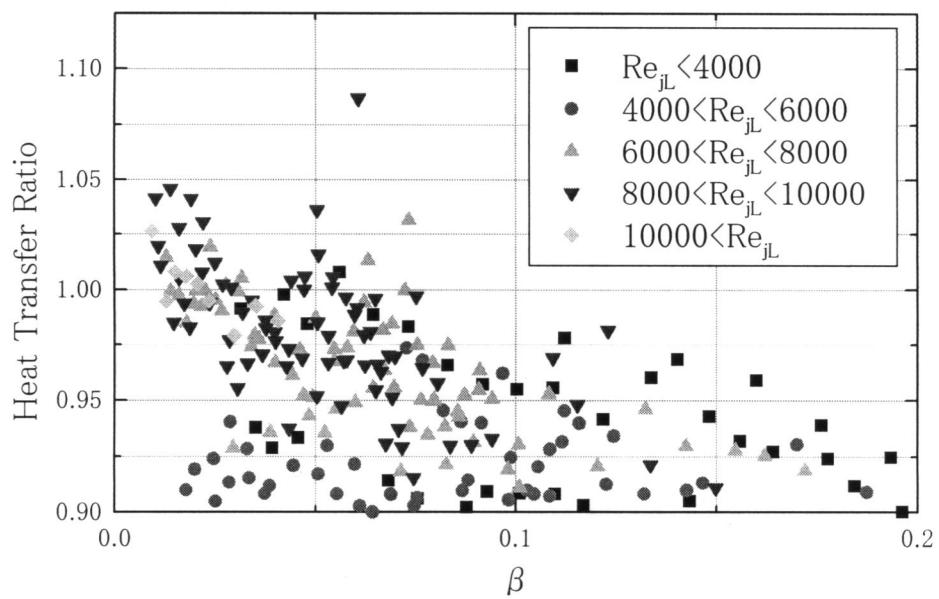


図4-4-3 Re別熱伝達率と β の関係のグラフ（実験3）

4-5 実験1の伝熱が向上しない原因

実験2、3の β が小さな領域で伝熱の向上が見られたが、実験1では β の小さな領域においても伝熱の向上が見られなかった。その原因としてノズル前の管内での二相流の流動状態に違いがあるためと考えられる。

実験2、3では気泡は管中心部をスムーズに流動しノズルから噴射されるが、実験1において、気泡は管内の広い範囲で流動し管内の外側を流動する気泡がノズル手前で停滞する。そのためには気泡の通過するノズル数が実験2、3よりも多く、かく乱効果よりも空気による伝熱低下の効果が大きくなるため伝熱が促進されないと考えられる。

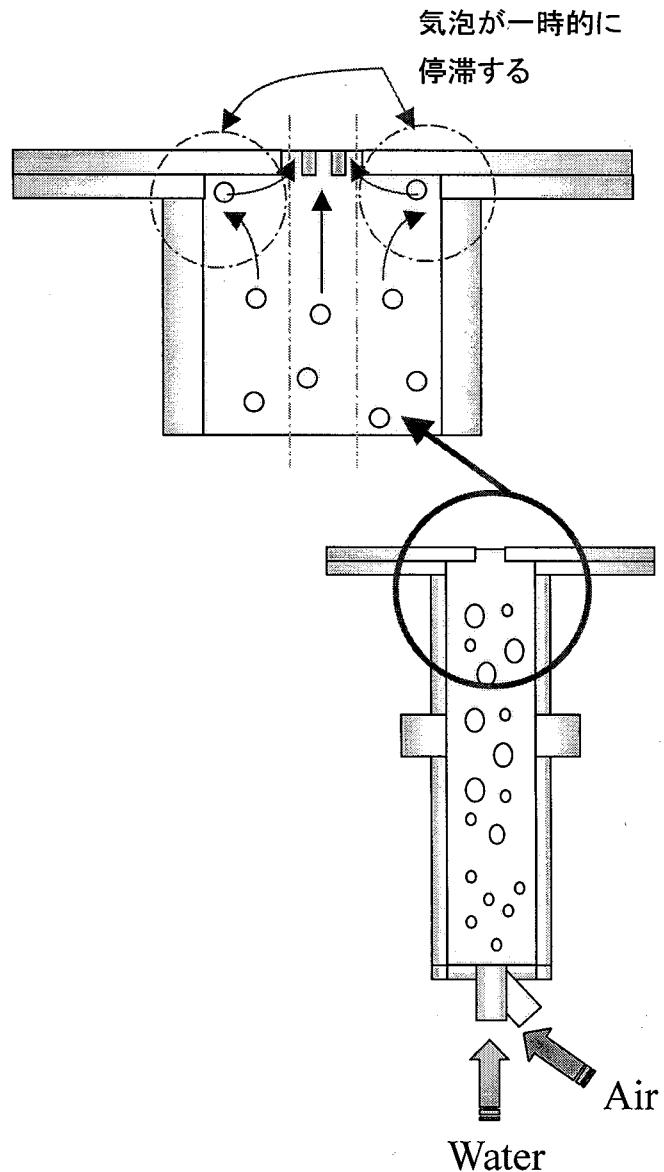


図4-5-1 ノズル入口付近の流動状態（実験1）

4-6 伝熱が悪い場合の噴流状態

伝熱の悪い場合の噴流の状態を図4-6-1、図4-6-2、図4-6-3に示す。伝熱が悪くなる原因として、以下のことが考えられる。

1. 伝熱面付近に気泡が停滞する（図4-6-1）
2. 伝熱面よりも外側の気泡が合体することで伝熱面付近に引き寄せられる（図4-6-2）
3. 空気流量が増えることで、空気のみが伝熱面に衝突する時間が長くなる。（図4-6-3）

これらの原因により、伝熱が悪くなつたと考えられる。

また、図4-6-4に対応するグラフを示す。

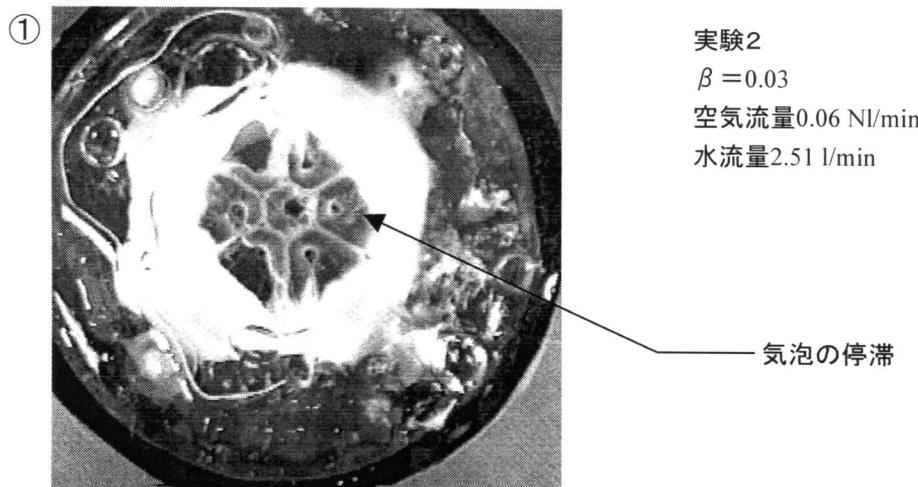


図4-6-1 伝熱面付近に気泡が停滞する様子

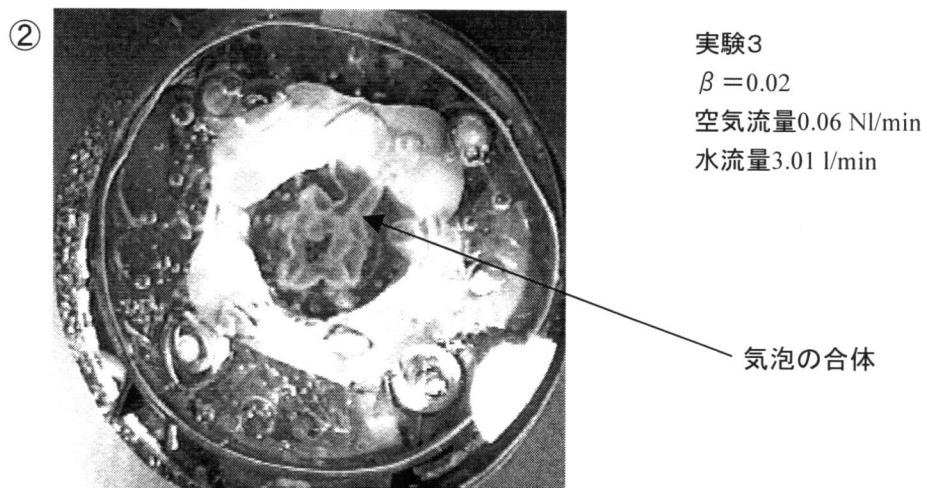


図4-6-2 気泡が伝熱面付近に引き寄せられる様子

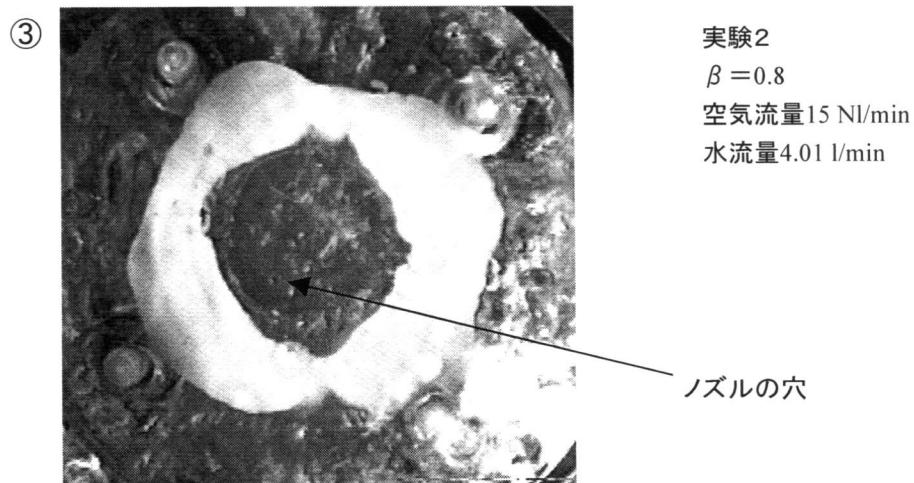


図4-6-3 空気のみが伝熱面に衝突する様子

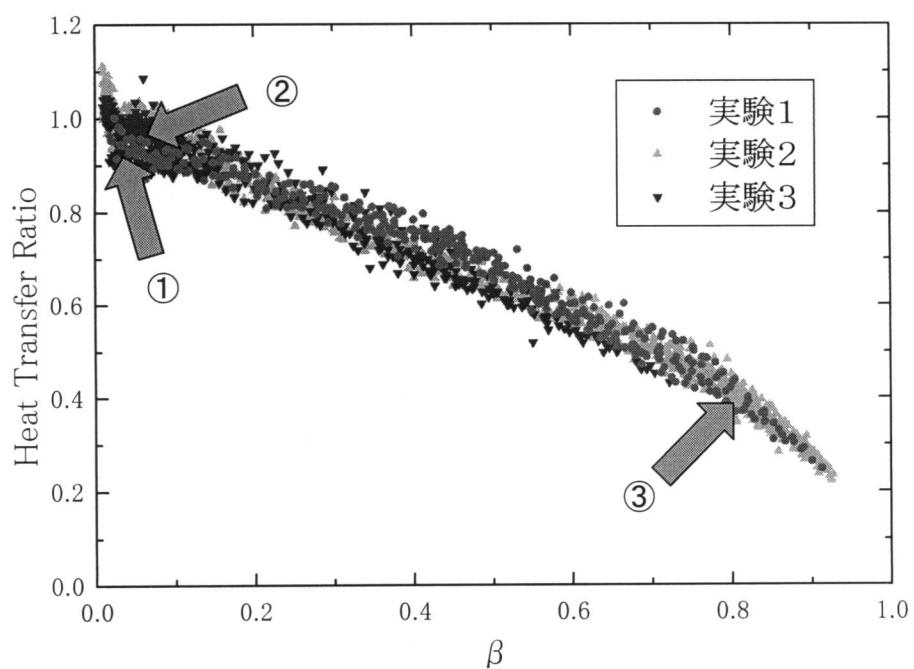


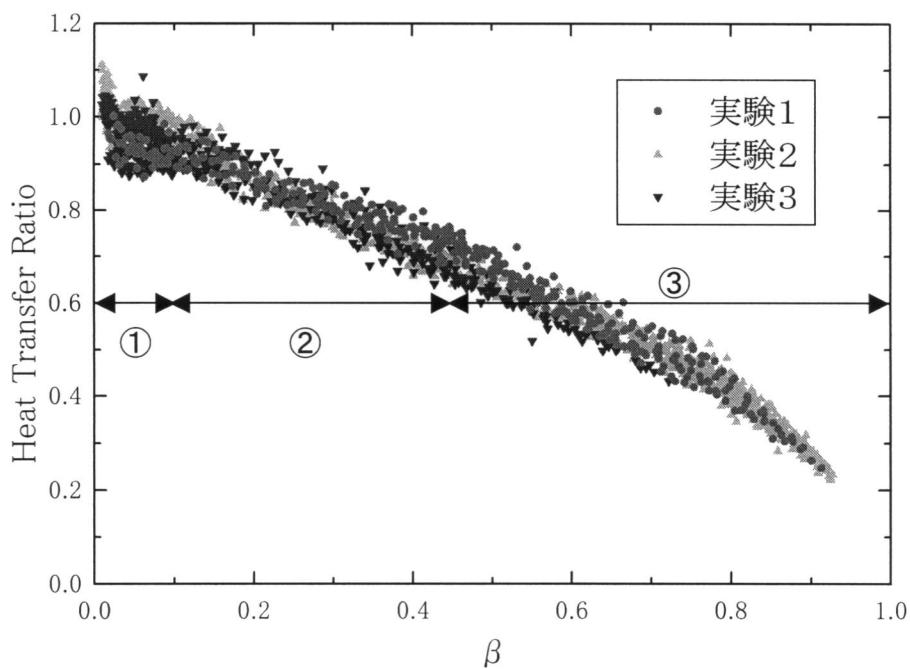
図4-6-4 噴流の様子と伝熱の関係

4-7 伝熱が向上しない原因

実験1、2、3を通して、容積流量比 β が増加するにしたがい熱伝達率比 h/h_j が下がることが分かった。これは、空気流量が増えることでノズルからの噴流が間欠流となるためであると考えられる。つまり、空気による熱伝達が支配的になるために伝熱が低下すると考えられる。

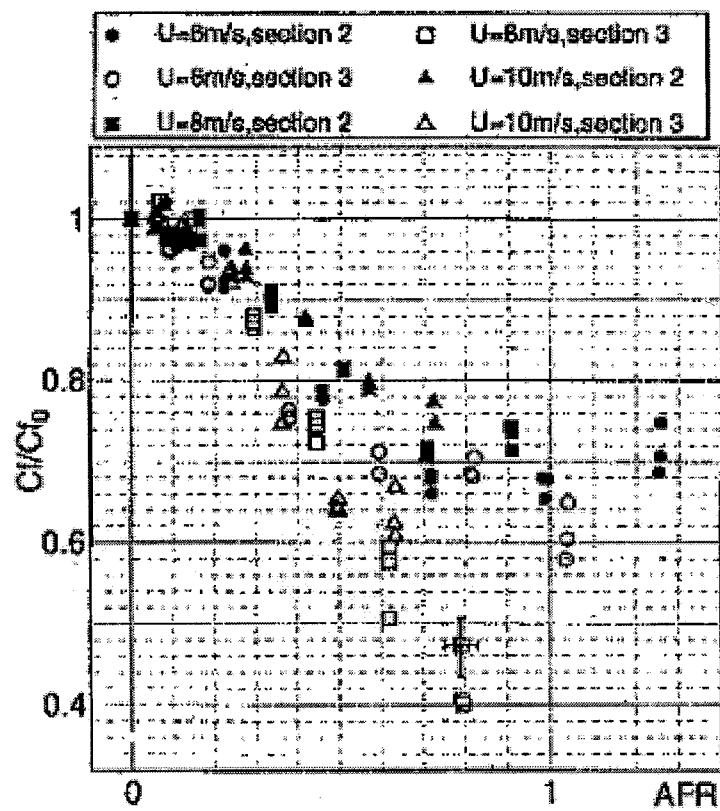
これは、KATO⁽²⁾による船体抵抗の低減に関する実験と類似した傾向を示している。ここでは、実験データをもとに微小な気泡と表面摩擦の関係を説明しており、実際に β が大きくなるにつれて表面摩擦が低減される効果が確認されている。それらによると、微小な気泡を乱流境界層に混入することで境界層内の乱れに影響を与え、そのことにより摩擦抵抗が低減するとされている。これによれば、 β が大きくなるにつれて気泡による温度境界層のかく乱効果が低減し、また、空気量が増えることによる伝熱の低下が考えられる。

また、ビデオ撮影による観察の結果、 $\beta < 0.1$ 付近の領域では気泡の停滞による伝熱の悪化が支配的であり、徐々に空気が増えるに従い気泡の停滞による伝熱の低下とノズルからの噴流が間欠流になることによる伝熱の低下が起こる。そして、 $0.5 < \beta$ の領域では気泡停滞は見られなくなり、空気のみが噴射されることによる伝熱の悪化が支配的となっていることが分かった。



- ①：気泡の停滞による伝熱の低下
- ②：気泡の停滞による伝熱の低下と噴流が間欠流になることによる伝熱の低下
- ③：噴流が間欠流になる（水、空気が交互に噴射される）ことによる伝熱の低下

図4-7-1 気泡による伝熱の低下と熱伝達率



Reduction of local skin friction
against Air Flow Rate (AFR)

図 4－7－2 KATO の船体抵抗の低減に関する実験

4-8 実験値にバラツキのある原因

同じ β の値であっても効率が良い場合や悪い場合がある。このように実験値にバラツキが生じる原因のひとつとして、次のことが分かった。

まず、図 4-8-1 の左の写真にあるように比較的効率の良い領域ではノズルから噴出する気体部分の停滞が見られない。これは水流量が多いため気体部分が水によって外側にはじき出されるためである。

反対に効率があまり良くない領域（図 4-8-1 の右の写真）では、伝熱面付近に気泡が停滞していたり、伝熱面よりも外側にある気泡が段々と成長しやがて伝熱面付近へと引き込まれるといった現象が見られた。この原因是、水流量が少ないためにノズルから噴出した気泡を外側にはじき出す力が少ないと想定される。

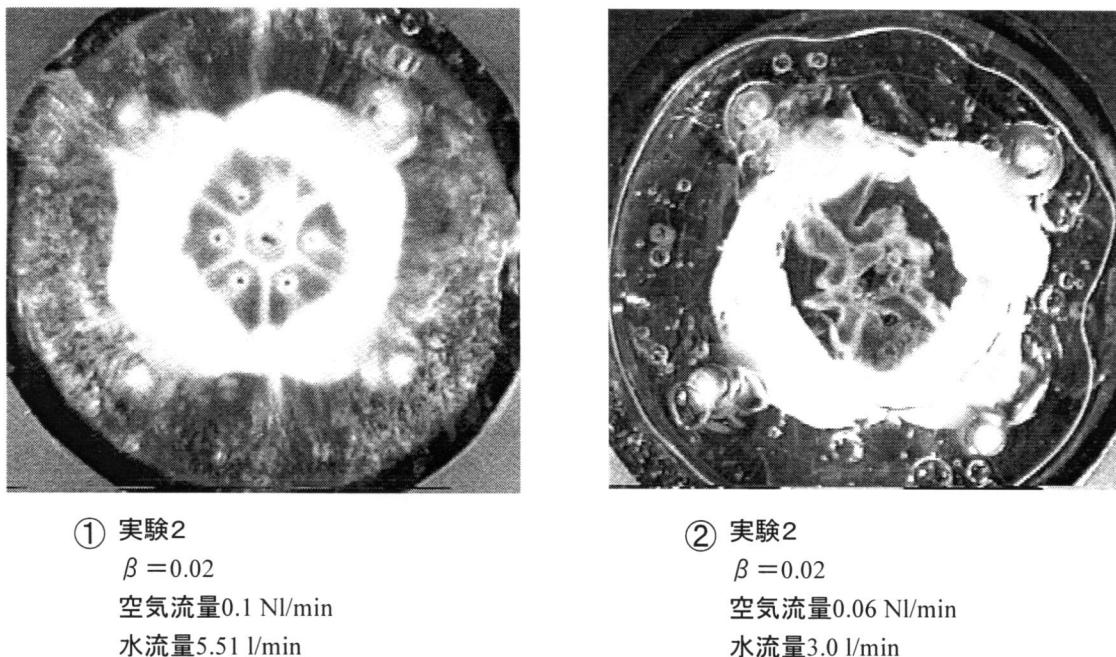


図 4-8-1 噴流の様子

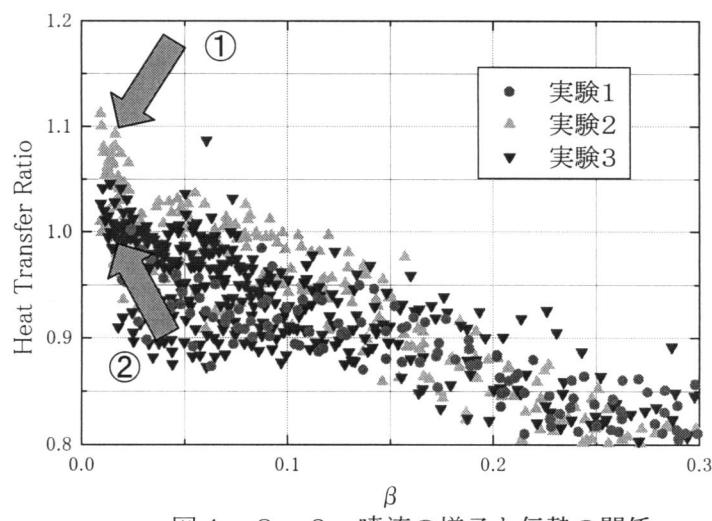


図 4-8-2 噴流の様子と伝熱の関係

第5章 結論

結論

空気の混入方法を変えて3通りの二相衝突噴流実験を行い、以下のことが明らかになった。

1. 気相容積流量比 β が上昇するにつれ、 h/h_{jL} が上昇する。
2. 実験2の $\beta < 0.1$ 、実験3の $\beta < 0.07$ の領域において、バラツキが多く不安定であるが h/h_{jL} が h_j/h_{jL} より高い値を示したが、実験1においては h/h_{jL} が h_j/h_{jL} を超える値を示さなかった。このことにより、空気の混入方法と伝熱の向上に密接な関係があることが分かった。
3. 気相容積流量比 β が上昇するにつれ、 h/h_j が安定した減少傾向になること分かった。このことから、空気を混入することで流速が上がるが、伝熱はあまり良くならないということが分かった。
4. 同じ β であっても実験値にバラツキが生じる原因のひとつが明らかになった。

第6章 謝辞

本研究の進行にあたり、終始御指導頂きました刑部真弘教授、土師生也助手、堀木幸代助手、また、実験装置の作成および実験の進行にあたり、協力していただきました伊東次衛技官に心より感謝の意を表します。

第 6 章 参考文献

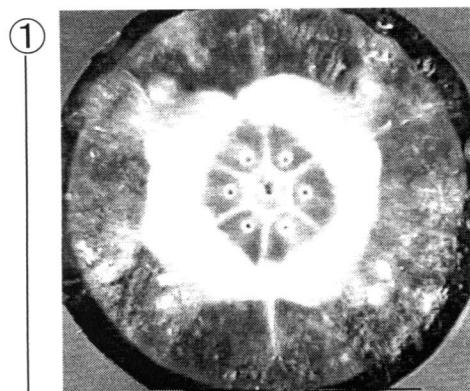
参考文献

- (1) HOLGER MARTIN "Heat and Mass Transfer between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces"
- (2) H. Kato, "Skin Friction Reduction by Microbubbles" Symposium on Smart Control of Turbulence, Proceedings of Symposium on Smart Control of Turbulence, pp.58-72, (1999)
- (3) 高橋, 角川, 川島, 児玉, "平底模型船を用いたマイクロバブルによる摩擦抵抗低減実験", 第31回乱流シンポジウム, 東京, (1999)
- (4) G. Hetsroni, M. Gurevich, R. Rozenblit, L.P. Yarin, G. Ziskind "Effect of particle motion on the wall's thermal structure and on heat transfer" International Journal of Multiphase Flow 27 (2001), pp393-413
- (5) 日本機械学会編, 気液二相流ハンドブック、コロナ社出版、(1989)
- (6) 日本機械学会編, 流体工学 機械工学便覧 A5, 丸善出版、(1986)
- (7) Kakumoto, T., ほか 3 名, Proc. of IMECE 2001

第7章 付録

付録

—伝熱が良いときの噴流パターン—

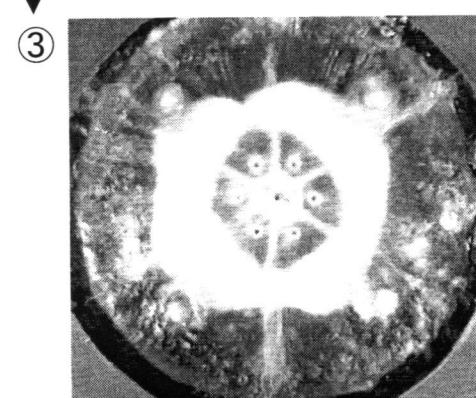
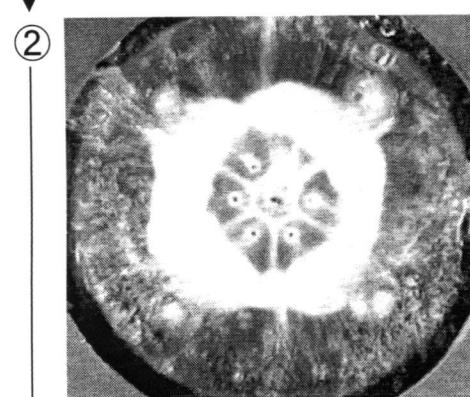


実験2

$$\beta = 0.02$$

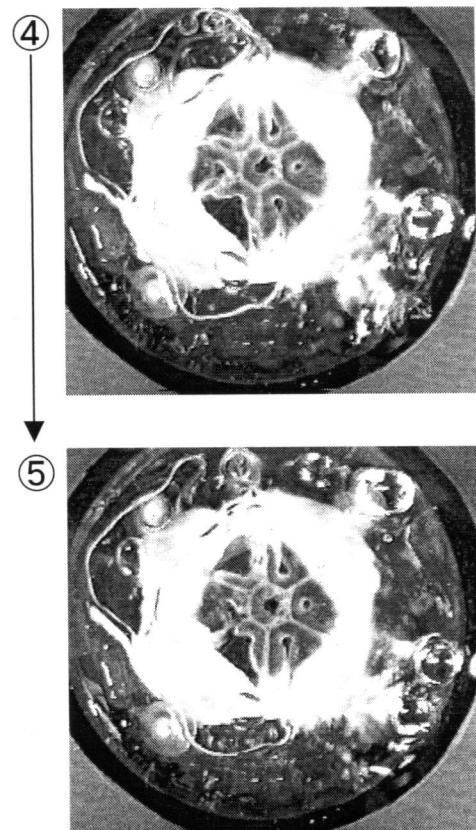
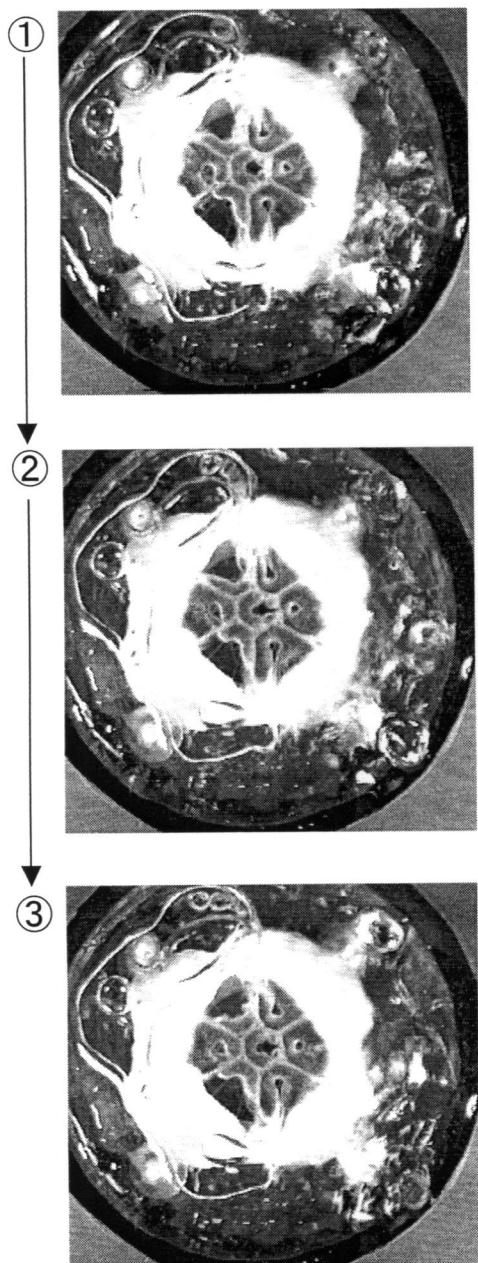
空気流量 0.1 Nl/min

水流量 5.51 l/min



—伝熱が悪いときの噴流パターン—

i) 気泡が停滞する様子



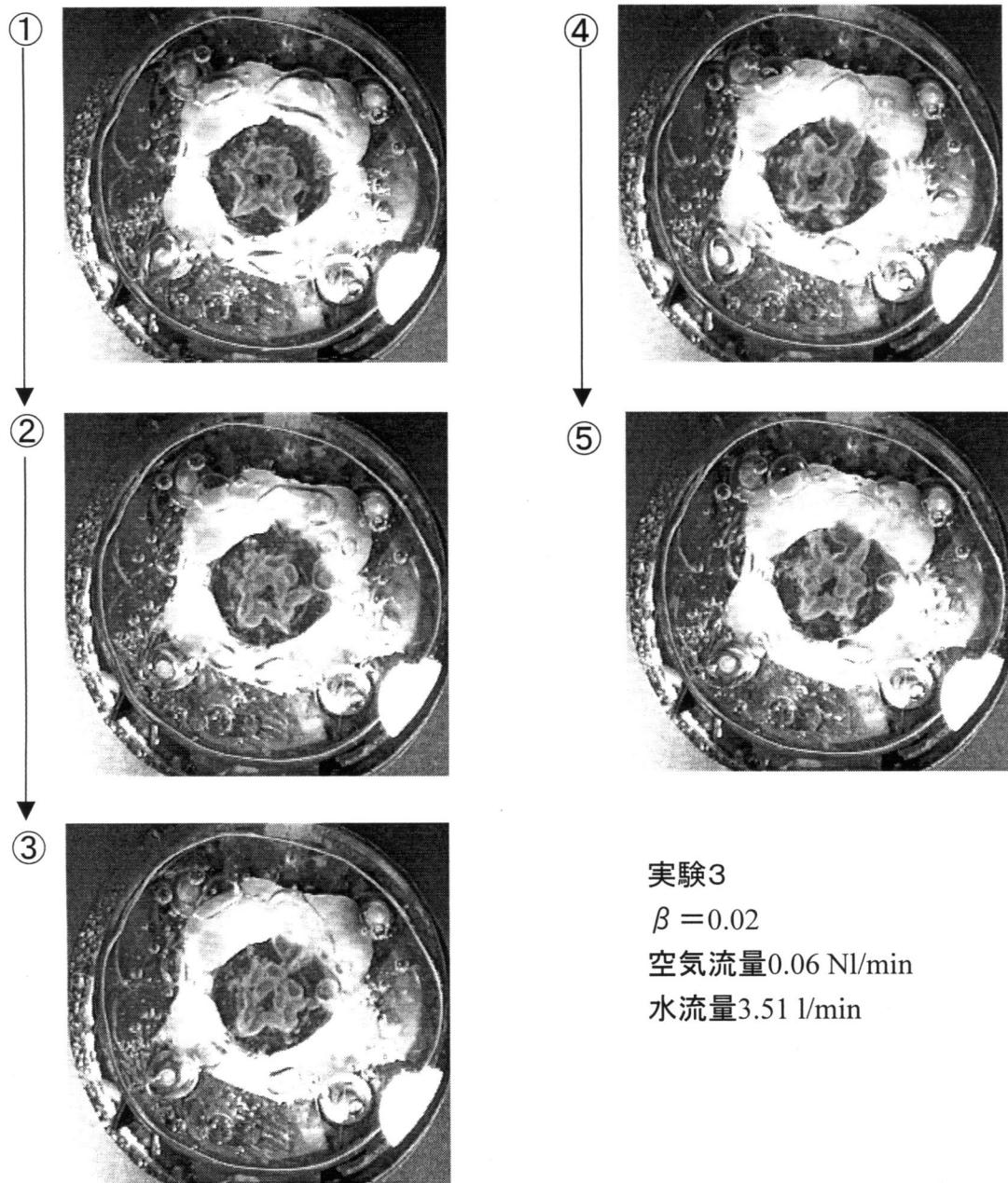
実験2

$$\beta = 0.03$$

空気流量 0.06 Nl/min

水流量 2.51 l/min

ii) 気泡合体する様子



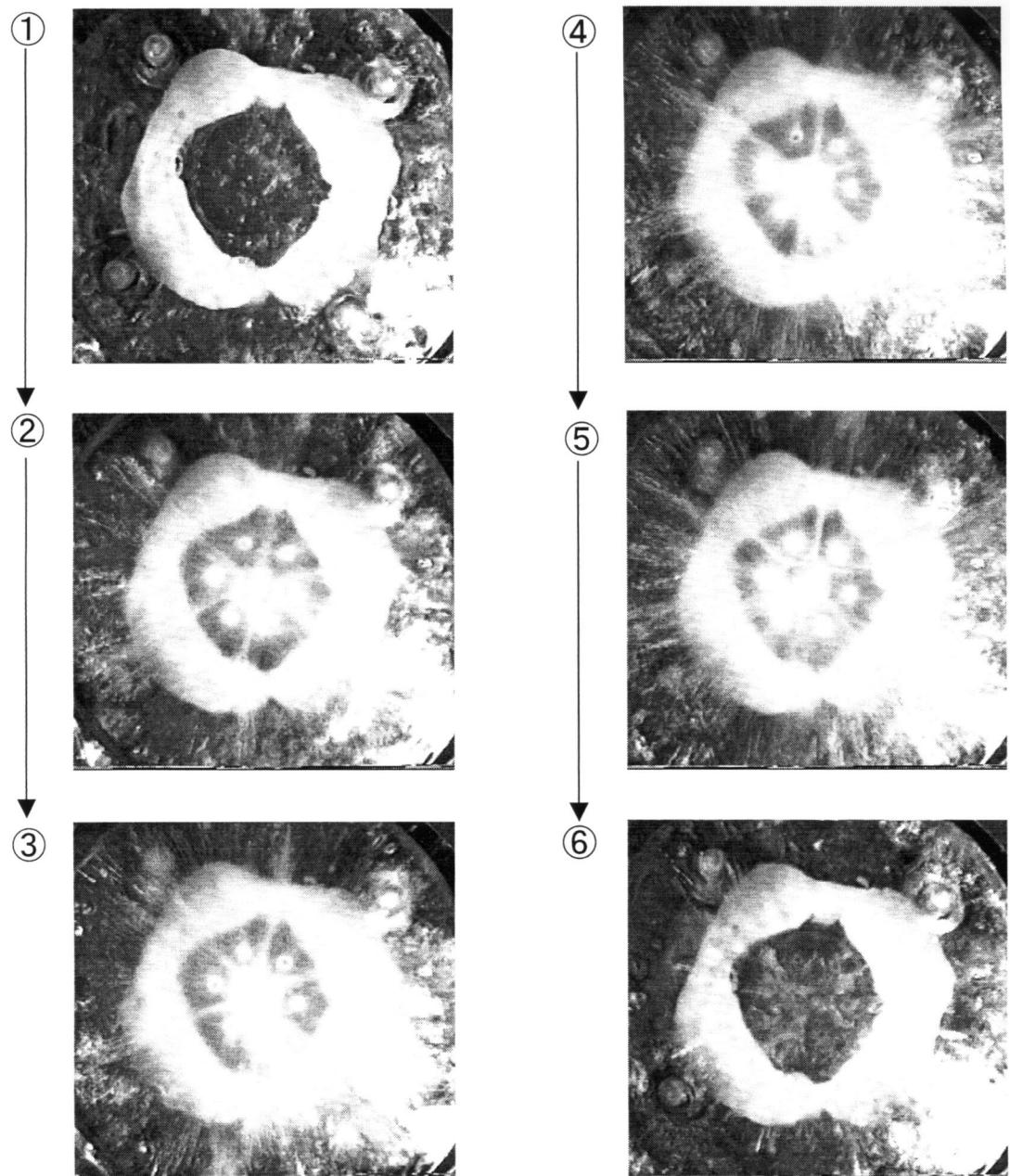
実験3

$$\beta = 0.02$$

空気流量 0.06 Nl/min

水流量 3.51 l/min

iii) 空気と水が交互に噴射される様子



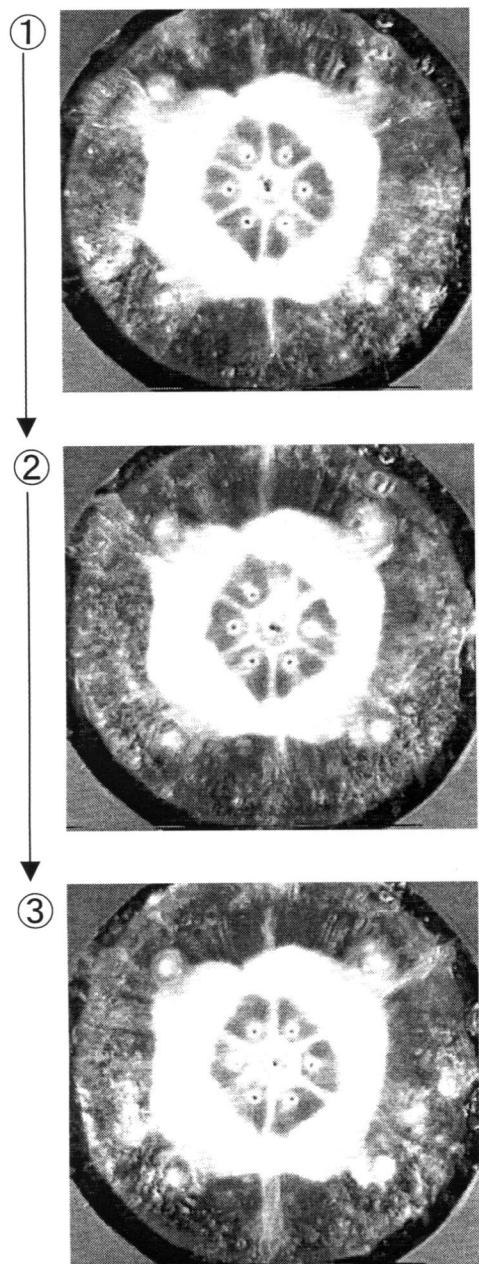
実験2

$$\beta = 0.8$$

空気流量 15 Nl/min

水流量 4.01 l/min

—実験値にバラツキがあるときの噴流パターン—

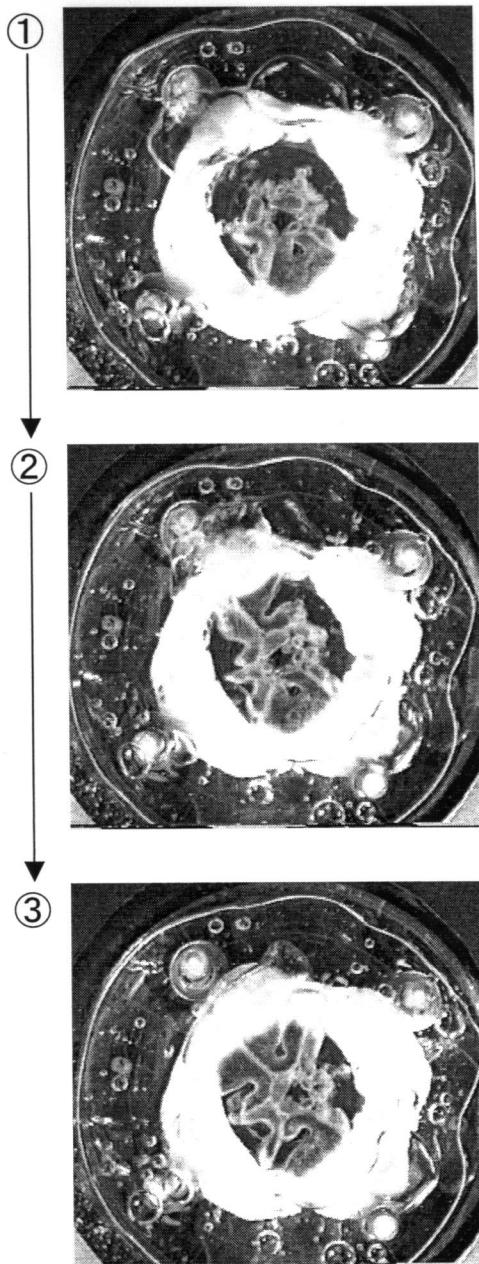


実験2

$\beta = 0.02$

空気流量 0.1 Nl/min

水流量 5.51 l/min



実験2

$\beta = 0.02$

空気流量 0.06 Nl/min

水流量 3.0 l/min