

分置

ガス巻き込み現象詳細実験：気泡巻き込み機構に関する研究

平成16年度

(共同研究報告書)

2005年3月

筑波大学
核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課
電話：029-282-1122 (代表)
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 筑波大学
(Tsukuba University)
© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2005

ガス巻き込み現象詳細実験：気泡巻き込み機構に関する研究

平成 16 年度

(共同研究報告書)

文字 秀明*, 上出 英樹**

要 旨

原子炉のコンパクト化に伴い炉容器内では冷却材流速が増大し、自由界面からのガス巻き込みの発生が危惧され、ガス巻き込みの発生の有無の判定は、設計の観点から重要な評価項目となっている。本研究は、ガス巻き込み発生の判定基準作成のための一連の研究の一部として行われ、流入流量に変動を与えた場合の円筒容器内のガス巻き込み渦の流動特性について調べた。昨年度はガスコアの挙動について調べたため、本年度はPIVにより流れ場を計測し、ガスコアの振舞いとの関係を調べた。その結果、以下の知見を得た。円筒容器断面内の周方向速度の径方向分布は、流量が変動してもほとんど影響を受けなかった。速度分布を基にした循環は、変動流量の平均値で定常に流れた場合より大きく、変動流量の最大値で定常に流れた場合より小さかった。これは流量変動下のガスコア長の傾向と一致する。一方、径方向速度は流量が変動することにより大きく変わりガスコア長と相関を持つが、ガスコア長の変動を完全に説明するものではなかった。

* 筑波大学大学院 システム情報工学研究科

**大洗工学センター 要素技術開発部新技術開発試験グループ

Detailed Experiment on Gas Entrainment : Study on Bubble Entrainment Mechanism

Hideaki Monji*, Hideki Kamide**

ABSTRACT

This paper deals with unsteady behavior of free surface vortices at an upper plenum in a reactor. In the compact reactor investigated, the coolant velocity increases and gas entrainment at the free surface is afraid to occur. The estimation of the onset condition of gas entrainment is an important factor for design of the reactor. This study was performed as a part of study on the onset condition of gas entrainment and investigated the flow characteristics of a vortex entraining gas in a cylindrical vessel. In the work done in the last year, the behavior of a gas core was measured by image processing under the fluctuating inflow rate to the cylindrical vessel. The inflow rate changed as a sinusoidal function. In the study, the velocity field in the cylindrical vessel was measured by PIV and discussed with the behavior of the gas core. The results of the study are mainly as follows; The tangential velocity was influenced little by the fluctuating inflow rate. The circulation based on the tangential velocity under the fluctuating inflow rate was smaller than that under the condition of the fixed flow rate which is the same as the maximum of the fluctuating inflow rate and larger than that under the condition of the fixed water flow rate which is the same as the average of the fluctuating inflow rate. This tendency was similar to the relations on the gas core length between the fluctuating flow and the steady flow. On the other hand, the radial velocity was influenced much by the fluctuating inflow rate. The gas core length was seemed to correlate with the radial velocity but the mechanism of the flow structure of the gas core length cannot be explained by only the radial velocity.

* Graduate School of System and Information Engineering, University of Tsukuba

** New Technology Development Group, Advanced Technology Division, OEC, JNC

目次

1. はじめに	1
2. 実験装置と計測系	1
2. 1 実験装置	1
2. 2 実験条件	2
2. 3 計測方法	2
3. 実験結果と考察	3
3. 1 定常流量の速度場	3
3. 2 定常流でのガスコア形状	4
3. 3 非定常流量の速度場	4
3. 4 非定常流量条件下の周方向速度の検討	5
4. おわりに	7
参考文献	8

図リスト

図 1 - 1	正弦波状流量変動を与えた場合のガスコアの形状と長さ	9
図 1 - 2	定常と非定常の流量下のガスコア長の比較	9
図 2 - 1	実験装置概略	10
図 2 - 2	速度分布計測系	10
図 2 - 3	測定断面と測定範囲	11
図 3 - 1	容器底面から 15cm の測定面における定常流量の速度場	12
図 3 - 2	容器底面から 15cm の測定面における定常流の速度分布	13
図 3 - 3	容器底面から 15cm の測定面における定常流量の循環分布	14
図 3 - 4	ガスコア形状の計測値と計算値の比較	14
図 3 - 5	周期的流量変動と平均を取った位相	15
図 3 - 6	周期的に流量が変動する場合の速度場	15
図 3 - 7	周期的に流量が変動する場合の速度分布	17
図 3 - 8	定常および非定常流量条件下の循環分布の比較	18
図 3 - 9	流量とガスコア長	18
図 3 - 10	流体に時間変動する運動量が付加された場合の速度分布 (計算結果)	19

1. はじめに

高速炉の実用化概念として、経済性の向上のために原子炉容器をコンパクト化した炉型が検討されている。コンパクト化された原子炉容器では冷却材流速が増大することから、自由界面からのガスの巻き込みの発生が危惧され、発生の有無の判定は、設計成立性の観点から重要な評価項目となっている。そのため、設計で遵守すべきガス巻き込みの判断基準を策定することを目的に行われている一連の研究の一部として、昨年度に引き続き実施された。

従来のガス巻き込み現象に関する研究は定常的に形成されたガス巻き込み渦に関するものが多く見受けられる。しかし、ガス巻き込み現象は比較的穏やかな液面から突発的に、または間欠的に発生する非常に狭い範囲での非定常現象であり、非定常性を加味した研究が望まれる。本研究では非定常ガス巻き込み渦に関する知見を得ることを目的とするが、突発的に発生するがガス巻き込み現象の瞬時・局所の計測は困難であるため、昨年度は、定常渦に関する研究で用いられたものと同様の円筒容器内旋回渦を研究の対象とし、これに流れ場の変動を与え、ガス巻き込み現象の非定常特性を調べた。実験では正弦波状に流量変動を与え、ガスコア長変化を画像処理計測により求めた[3]-[5]。

図1-1に最低4.5 L/min、最大7.5 L/min、平均6.0 L/minで周期10 sの正弦波状に流量を変化させた場合の流量とガスコア長およびガスコア形状の変化を示す。この条件は、昨年度の研究で流量変動幅と周期を何通りかに変えたもの内、最もガスコア形状の周期的変化がはっきりと出た実験条件である。ガスコア長の変化は流量と同期しているが正弦波状に変化せず、ガスコア長がもっとも長いときは流量が最も大きなきときではない。図1-2に流量が変動したときのガスコア長の時間変化と定常流量の場合のガスコア長を示す。流量が変動した場合のガスコア長は変動流量の平均値である6.0 L/minで定常的に流れた場合のガスコア長より長く、流量が7.5 L/minの場合のガスコア長より短い。この結果は、定常状態でのガス巻き込み判定基準が非定常状態のそれとは異なることを示しており興味深い。瞬時の最大流量で定常的に流れた場合を想定し、設計すると安全側に見積もることになるが、変動の平均値を設計点とすると、変動中のガスコア長はそれより長く、ガス巻き込みに関しては危険側に見積もったこととなる。

昨年度はガスコアの振る舞いについて明らかにしたが、その原因を明らかにするに至らなかった。本年度は、ガスコアの振る舞いの流体力学的機構を明らかにするため、流動状況をPIVにより計測し、流れ場とガスコア長の関係について検討した。

2. 実験装置と計測系

2. 1 実験装置

実験には昨年度に引き続き、図2-1に示す実験装置を使用した。これは、円筒容器内に旋回流と下降流を引き起こすことによりガス巻き込み渦を形成する実験装置で、守屋が定常旋回流によるガス巻き込み現象に関する研究で用いた体系[1][2]を参考に製作した。以下に実験装置の概略を説明する。詳細については昨年度報告書[3]を参照していただきたい。

実験装置は、主にバッファタンク、渦を発生させる円筒容器（試験部）、流量計、ポンプよりなり、それらが管路により連結されたループ形状をしている。他に、トレーサ粒子回収等に用いられるフィルターに連結しているバイパスを有する。バッファタンクと円筒容器、およびそれらを連結する流路は流況観察および可視化計測のため透明アクリル材で作られている。

作動流体は水で、ポンプにより駆動され、自由液面を有するバッファタンク内にタンク下方から上向きに供給される。バッファタンクには、直径1 cmの穴を複数開けた2枚のパンチングボードが主流と直角になるように設置され、バッファタンクを3分割している。昨年度の実験ではスポンジマットをパンチングボードに貼り付け、流れが更に静定されるようにしたが、今年度の実験ではPIV用のトレーサ粒子を水に混入したため、スポンジマットを用いなかった。

バッファタンクを出た水は、試験部に入る前に、幅20 mmの上部開放の矩形流路を通る。この流路の片方の壁は、試験部である円筒容器の壁に接線方向に滑らかに接続する。そのため、水は円筒容器壁の接線方向速度成分を持って流入し、容器内の水に旋回を与える。

容器底部には内径12.5 mmのアクリルパイプが接続されており、水が流出する。このとき、円筒容器内には下降流が形成される。その後、水は電磁流量計を通過し、ポンプへと戻る。電磁流量計およびポンプは制御盤を介して接続されており、PCから制御盤を設定することにより、ポンプ流量を最小流量設定間隔0.1 L/min、最小設定時間間隔 $\Delta t = 1$ sで制御することができる。

2. 2 実験条件

水位は昨年度と同様に25 cmに設定した。流量を4.5 L/min、6.0 L/min、7.5 L/minのそれぞれの値に固定した定常流量の場合と、最低4.5 L/min、最大7.5 L/min、平均6.0 L/minで周期10 sの正弦波状に流量を変化させた場合の実験を行った。いずれの流量条件の場合も昨年度の研究でも実験条件として設定したもので、それぞれの場合についてガスコア形状およびガスコア長が計測されている。

2. 3 計測方法

実験では電磁流量計により水流量を計測した。また、円筒断面内の速度分布をPIVにより計測した。図2-2に計測系の配置図を示す。YAGレーザ(ニューウエーブ、15 mJ/パルス)をジャッキに乗せ、計測断面にシート光を照射し、カメラ(Kodak ES1.0)を円筒容器上部または下部に設置し撮影した(図は上部に設置した場合)。測定断面および円筒容器内の測定範囲を図2-3に示す。測定断面には円筒容器の底部および底部から5 cm刻みで表面まで設定した。底部および表面の速度分布は計測できないため、実際には円筒底部から3 mm上方および表面から3 mm下方の断面を測定面とした。レーザーシート光は約2 mmの幅を持っており、その中心が設定した測定面になるようにジャッキでYAGレーザの発信器の位置を調整した。また、測定範囲は図2-3に示すように円筒容器断面の1/4程度を覆い、円筒中心軸を含むように設定した。旋回流は円筒軸に対して対象ではないため、

渦中心が撮影範囲に入るように測定範囲が設定されている。CCD カメラは表面を測定する場合には上部に、それ以外は円筒下部に設置した。上部に設置するとアクリル板を介さずに撮影できるものの、ガスコア中心部では界面の曲率半径が小さくなり速度を得ることができない。そのため、表面の計測についてだけカメラを上方に設置した。

設定した流量条件の範囲でガスコア長は最大でも 6 cm を超えないため、表面および底面から 20 cm の測定面以外ではガスコアは測定面内に存在しない。また、PIV のトレーサ粒子にはローダミン B 蛍光粒子 (DANTEC FPP、直径 10 μm 程度、密度 1500 kg/m^3) を用いた。蛍光粒子と光学フィルターを用いることによりアクリル表面および気液界面からの反射を CCD カメラに取り込まずに撮影できる。

3. 実験結果と考察

3. 1 定常流量の速度場

4.5 L/min、6.0 L/min、7.5 L/min のそれぞれの一定流量条件下の速度場を図 3-1 に示す。計測は 2. 3 で示した測定断面で行ったが、ここでは底面から 20 cm の断面の計測結果を示す。昨年度報告書[3]で示したようにこの断面にはガスコアは到達しておらず、測定面全体は水で占められている。定常流の場合には、速度場は 0.15 s 間隔で計測され、その瞬時速度場の 200 回の計測結果を平均化した結果を示している。

各図中、速さと方向が矢印で示されている。また、見やすくするために速さが色で表示されている。青色から赤色に変わるにつれ、速さが大きくなっている。いずれの場合も渦中心は流れの非軸対象性から容器中心にはない。図中、渦中心の上側には速度の遅い領域があるが、これは容器底部に設けた出口管の影が撮影されているため、速度が得られていない領域である。それ以外の領域では、渦中心で中心方向に向かう流れが観察され、中心から少し離れた領域で旋回流速が最大になっている。その後、中心から離れるにつれ速度は弱まる。外周で速度場がうまく計測されていない領域があるが、円筒容器にはめ込まれた O リングや継ぎ目部分の影響である。この図から数値は読み取れないので、赤線で示した部分の速度分布を図 3-2 に示した。赤線は速度場を基に渦中心を目視により決定し、渦中心から径方向に引いた線である。観測者の主観により渦中心が変化する可能性があるが、ほぼ、速度の径方向分布を示すものと思われる。

図 3-2 では、速度は渦の径方向成分 v_r と周方向成分 v_θ に分けられている。径方向速度は中心から外周に向かう方向を、周方向速度は円筒容器上部から測定面を見たときの反時計回り方向を、それぞれ正にとった。渦中心部では渦中心に向かう流れが顕著に見られる。中心へ向かう流速が大きな領域は流量が大きいほど広いようである。外周では多少流量によってばらつくが、周方向速度に比べてかなり小さく。周方向成分は中心部ではほぼ零であるが、渦の外側に向かうと急激に増加し、その後、減少し、強制渦と自由渦の様相を示す。周方向の速度の最大値は流量に比例して増加している。最大値を取る点は流量と関連していないが、速度場を基に目視で渦中心を決定しているため、これらの分布は径方向にずれる可能性があり、正確に議論する場合は、中心の決定方法を検討しなくてはならない。

中心から離れた点では周方向速度成分は流量に比例しており、循環効率が一定になっていると思われる。

図3-3は周方向速度分布を基に、渦中心からの距離と周方向速度の積より求めた循環の分布である。渦中心で急激に立ち上がりその後、6.0 L/min、7.5 L/minの場合にはだだららと増加し、4.5 L/minの場合はほぼ一定値をとる。中心部以外での循環の大きさは流量が大きいほど大きい。

3. 2 定常流でのガスコア形状

計測した速度分布を基にして、Burgersの伸長渦理論に基づくガスコア形状と計測された形状の比較を行い、Burgersの伸長渦理論の適用性を検討する。守屋によると、ガスコア形状 $\zeta(r^*)$ は

$$\zeta(r^*) = \frac{1}{g} \left(\frac{\Gamma_\infty}{r_1} \right)^2 f(r^*) \quad (1)$$

で与えられる[1]。ここで

$$f(r^*) = \int_{r^*}^{\infty} \frac{1}{x^3} \{1 - \exp(-x^2)\}^2 dx \quad (2)$$

$$r^* = r/r_1$$

で、渦中心からの距離 r でのガスコア深さは自由渦領域での循環 Γ_∞ と特性長 r_1 が分かれば求まる。また、循環の分布は

$$\Gamma(r) = \Gamma_\infty \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{r}{r_1} \right)^2 \right\} \right] \quad (3)$$

で与えられる。

本研究で得られた循環分布(図3-3)を見ると、流量が6.0 L/minと7.5 L/minの場合は循環が一定と見なせる領域がなく、 Γ_∞ を求めることが難しい。4.5 L/minの場合についてのみ Γ_∞ を求めると、 $9.6 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ となる。この値を図3-3に破線で示した。特性長 r_1 は速度分布のフィッティングからも求まるが、本研究では、より確度が高いガスコア形状のフィッティングから求め、 $r_1=3.9 \text{ mm}$ を得た。図3-4に式(1)で与えられるガスコア形状と計測値を示す。ガスコア深さが浅いところでは、実験結果が求まっていないが、伸長渦理論に基づくガスコア形状と計測による形状はよく一致しており、Burgersの伸長渦理論の有効性を示す。

3. 3 非定常流量の速度場

周期10sの正弦波状に流量を変化させた場合(最低4.5 L/min、最大7.5 L/min、平均6.0 L/min)のPIV計測による速度場を示す。計測では瞬時速度場を得ることができるが、速度ベクトルの欠損や誤りがあるため、流動特性の把握が難しい。そこで本研究では、1周期を20等分し、図3-5の点で示される流量のタイミング(位相)で位相平均を求めた。代

表的な速度場を図3-6の(a)-(d)に示す。(a)は最も流量が小さな時(流量4.5 L/min)で、(b)は流量が増加し平均流量(6.0 L/min)に達した時である。また、(c)は最も流量が大きな時(流量7.5 L/min)で、(d)は流量が減少し平均流量(6.0 L/min)に達した時である。(b)と(d)はほぼ同流量であるが、(b)は流量が増加している最中であるのに対し、(d)は流量が減少中である点が異なる。どの位相でも流れの様相は似ており、目視で決めた渦中心が多少変動し、流量が多い場合、下方に移動する程度である。渦の中心部では、定常流量の場合と同様に中心に向かう流れが観察されるが、乱れは定常流量の場合より大きい。

図中、赤線で示した戦場の速度分布を図3-7に示す。位相を示す記号(a)~(d)は図3-5で示したものと一致している。周方向成分 v_θ はどの位相でもほぼ同様の分布を示し、流量変化の影響は少ないようである。これに対し、径方向速度の分布は流量変化の影響を強く受ける。図3-6の速度場から分かるように渦中心部の速度計測点は少なく、計測精度に問題はあるが、少なくとも、図3-7は(b)や(c)の位相では径方向速度が大きく、(a)では径方向速度が小さいことを示している。

図3-8は周方向速度と渦中心からの距離の積より求めた循環分布で、定常流量の場合と比較した。流量が変動する場合に周方向速度が流量の影響を大きく受けなかったことに対応し、循環も変動する流量の影響を大きく受けない。またその値は、流量が6.0 L/minと7.5 L/minの定常流量の場合の循環の値の間に存在し、図1-2のように流量変動時のガスコア長が流量が6.0 L/minと7.5 L/minの定常流量のときのガスコア長の間に存在することに対応する。

図1-1に流量とガスコア長の変化を示したが、これと速度分布の変化を比較するため、図3-9に時間軸を拡大し、速度場を計測した位相と共に流量とガスコア長を示す。ガスコア長は流量が平均の6 L/minで増加中の(b)および最も流量が多い(c)の場合が長く、平均流量6 L/minで減少中の(d)がもっとも短い。流量が最も少ない(a)のときでもガスコア長は最も短くならない。これと図3-7で示される径方向速度を比較すると、(b)と(c)は(a)や(d)に比べ速い流速で、ガスコア長が長いことと相関を持つ。つまり、ガスコア長は径方向速度が大きいほど長いと考えられる。しかし、(d)の場合の径方向速度はそれほど小さくなっておらず、逆に、ガスコア長が長い(a)の場合のほうが速度は小さく、整合性にかける。従って、径方向速度とガスコア長は関連があると推測されるものの、径方向速度だけではガスコア長の挙動を説明できない。

3. 4. 非定常流量条件下の周方向速度の検討

円筒容器内の旋回流を評価するため、円筒容器内の周方向のみに流動する2次元流れを考える。運動方程式は

$$\rho \frac{\partial v_\theta}{\partial t} = F + \mu \left(\frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r^2} \right) \quad (4)$$

で表される。ここで、 ρ , μ は流体の密度と粘性係数を、 t , r は時間と円筒軸中心からの距離をそれぞれ示す。 F は流体要素にかかる力で、単位時間に付加される運動量である。 v_θ

は周方向速度である。境界条件として円筒容器中心軸上($r=0$)で $v_{\theta}=0$ を考える。円筒壁側の境界条件とし、スリット (幅 D) から流入する領域($R-D < r < R$)に水の流入流量 Q に対応する運動量 $Q(v_R - v_{\theta})$ が付加される状態を考える。ここで R は円筒半径、 v_0 は水の平均流入速度、 δ は変動割合を表すパラメータ、 ω は流量変動の角振動数である。 v_R は流入する流体の周方向速度で、 $v_R = v_0(1 + \delta \sin \omega t)$ で与えられるとする。スリット (幅 D) から流入する領域ではその場の周方向速度 v_{θ} と流入する流体の速度差($v_R - v_{\theta}$)に比例した運動量が与えられる。実際に流体の流入を考えると、出口条件が複雑になるため、ここでは流体による運動量のみが与えられるものとする。円筒壁上はスリップ条件とし、円筒内側の速度と同じ流速を取るものとした。

今、3.3 で示した流量変動下の流れを想定すると、円筒容器半径が $R=0.1$ m で、水位 $H=25$ cm、流入スリット幅 $D=20$ mm である。また、平均流入流量が $Q_0=6$ L/min で、流量変動量 1.5 L/min、周期 10 s であるため、 $v_0=Q_0/DH=0.02$ m/s、 $\delta=1.5/6=0.25$ 、 $\omega=\pi/5$ となる。このときの式 (4) の計算結果を図 3-10 に示す。図中、幾本かの黒線は流量変動周期の $1/10$ 刻みで変化する速度分布を示している。また、赤線は運動量の付加がなく、壁で周方向速度 v_0 を与えた場合の解で、剛体回転を示す。青線は $\delta=0$ とした場合の計算結果で、流量および速度に変動がない場合 (定常流量) を示す。定常流量の場合でもスリットから流入する流体により運動量が付加されることを考えると、その領域で全体的に流速が増加し、円筒中心までその影響が及ぶ。スリットの領域以外では速度分布は剛体回転と同様に直線的になる。流量変動に対応した付加運動量の変化を考慮した場合 (黒線)、付加運動量が流量 Q とその速度 v_{θ} の積として与えられ、 $Q = S v_{\theta}$ (S はスリット面積) であるので、付加される運動量は v_{θ}^2 に比例する。従って、流速分布の時間平均値は定常流量を仮定した速度 (青線) より $\delta^2/2$ 程度大きくなる。この計算の場合は 3% 程度である。しかし、流量変動の影響はスリット幅よりか中心側にはほとんど伝播することなく、円筒中心部の速度分布は時間的に変化しない。このことは、図 3-8 で示される流量が変動する場合にも循環分布がほとんど変化しない計測結果に対応する。しかし実験では、流量が変動する場合には循環は 6 L/min で定常に流れる場合に比べ 15% 程度増加しているにもかかわらず、計算では定常流量の場合に比べ 3% 程度しか増加しないため、実験結果を十分説明しているとは言えない。従って、運動量の付加および流出口からの喪失について、適切なモデル化の工夫が必要と考えられる。

4. おわりに

ガス巻込みの判断基準を策定することを目的する一連の研究の一部として、昨年度に引き続き、流量変動を与えた場合の円筒容器内のガス巻込み渦の挙動に関する研究を行った。昨年度はガスコアの挙動について調べたが、容器内流動との関係が明らかでなかったため、今年度は流動状況を PIV により計測し、流れ場とガスコア長の関係について検討した。主な結果として以下の知見を得た。

(1) 定常流量の条件下で、時間平均した円筒容器断面内速度場を得た。ガスコアが到達していない円筒容器底面から 15cm の断面では、周方向速度分布は強制渦と自由渦の速度分布の組合せで表され、径方向速度は渦中心部で顕著であった。周方向速度から算出した循環は、流量が少ない場合(4.5 L/min)にのみ、周辺で循環一定の分布を示した。

(2) Burgers の伸長渦理論に基づくガスコア形状と計測で得られたガスコア形状を比較した結果、特性長をガスコア形状から推定すれば、理論と計測結果はよく一致することが示された。

(3) 正弦波状の流量変動を与えた場合の速度場（底部より 15cm の断面）を得た。位相平均した結果からは、周方向速度分布は流量変動の影響を受けないのに比べ、径方向速度は流量変動の影響を大きく受けることが示された。周方向速度が流量変動の影響を受けないことは、簡単な数値計算によっても示された。

(4) 周方向速度より求めた循環は、定常流量の 6 L/min(変動流量の平均値)の場合の循環と 7.5 L/min(変動流量の最大値)の間の値をとり、ガスコア長の関係と対応するものであった。一方、径方向速度が大きくなるときにガスコア長は長くなり、径方向速度とガスコア長に関係があると考えられるが、ガスコアが最も短くなる場合でも径方向速度は最も小さくならず、ガスコア長の決定機構を径方向速度を用いて完全に説明することができなかった。この機構については今後も検討が必要である。

参考文献

- [1] 守屋祥一、伸長渦理論と詳細可視化・計測に基づく自由表面渦の流動特性評価、電力中央研究所報告 U97072、1998.
- [2] 守屋祥一、自由表面渦のガス巻き込み発生限界に及ぼす模型縮尺効果、電力中央研究所報告 U97073、1998.
- [3] 文字秀明、上出英樹、ガス巻き込み現象詳細実験：気泡巻き込み機構に関する研究平成15年度共同研究報告書、JNC TY9400 2004-018, 2004.
- [4] 秋本敏憲、三輪大祐、文字秀明、上出英樹、ナトリウム冷却高速炉のガス巻き込みに関する研究(8)ーガスコア非定常特性の画像処理計測ー、日本原子力学会2004年秋の大会、D40, 2004.
- [5] H. Monji, T. Akimoto, D. Miwa and H. Kamide, “Unsteady Behavior of Gas Entraining Vortex on Free Surface in Cylindrical Vessel”, Proc. of Fourth Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety, 2004.

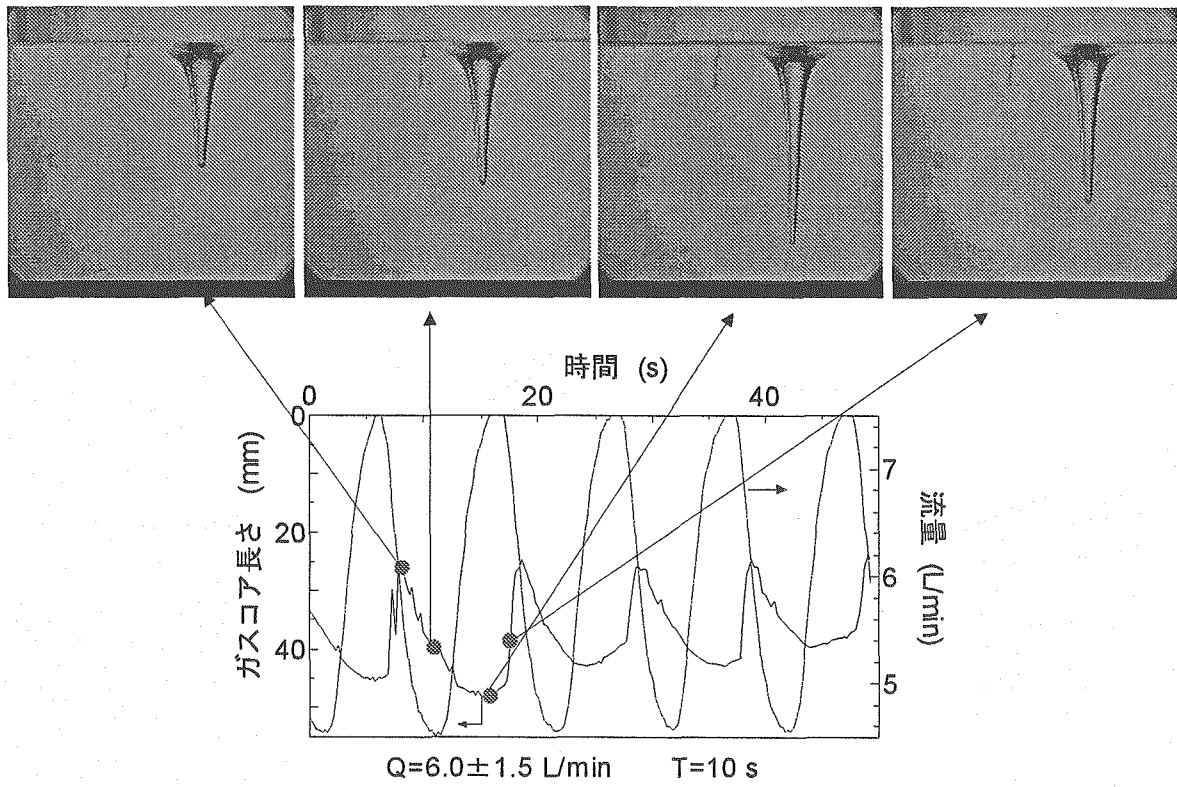


図 1 - 1 正弦波状流量変動を与えた場合のガスコアの形状と長さ

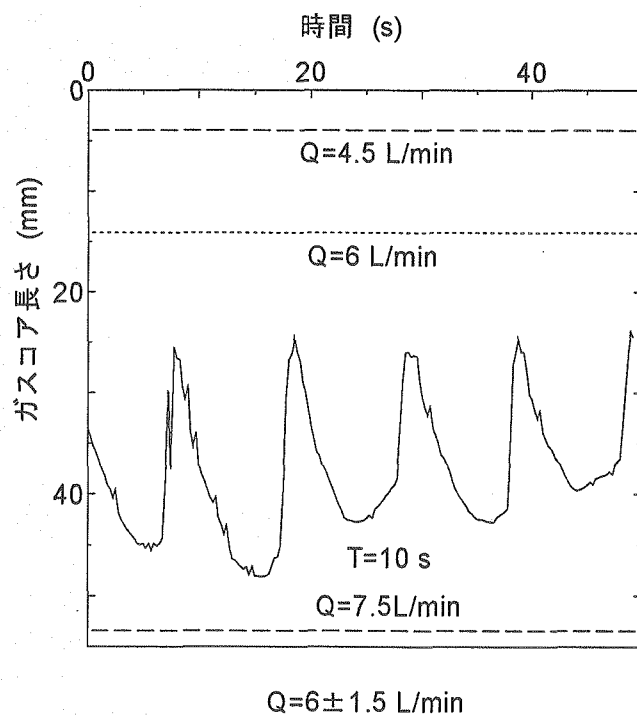


図 1 - 2 定常と非定常の流量下のガスコア長の比較

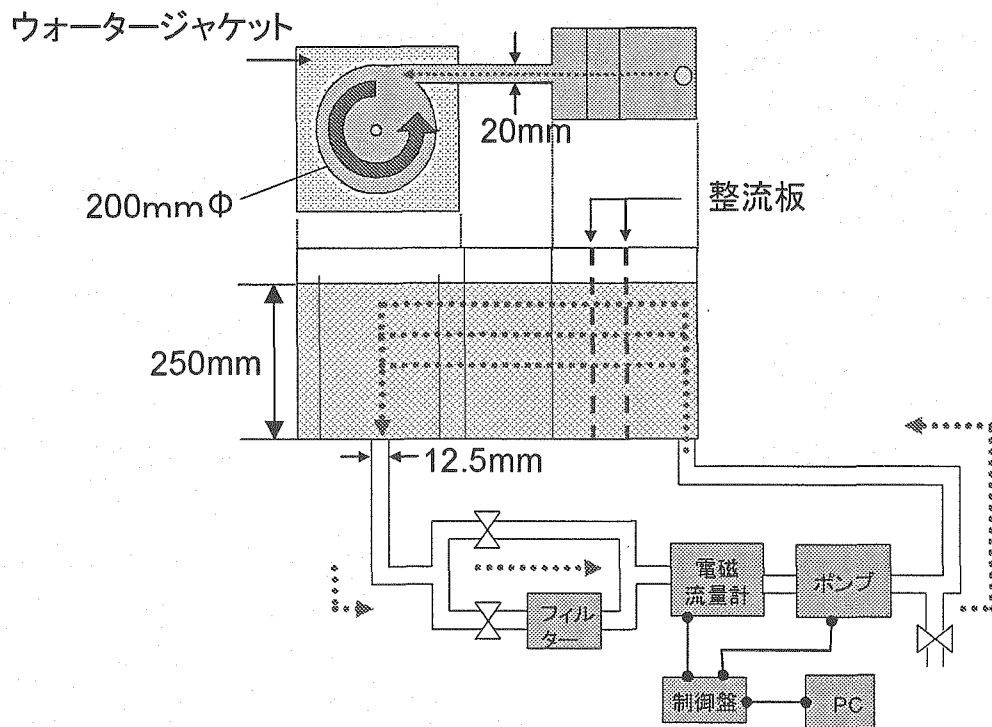


図 2 - 1 実験装置概略

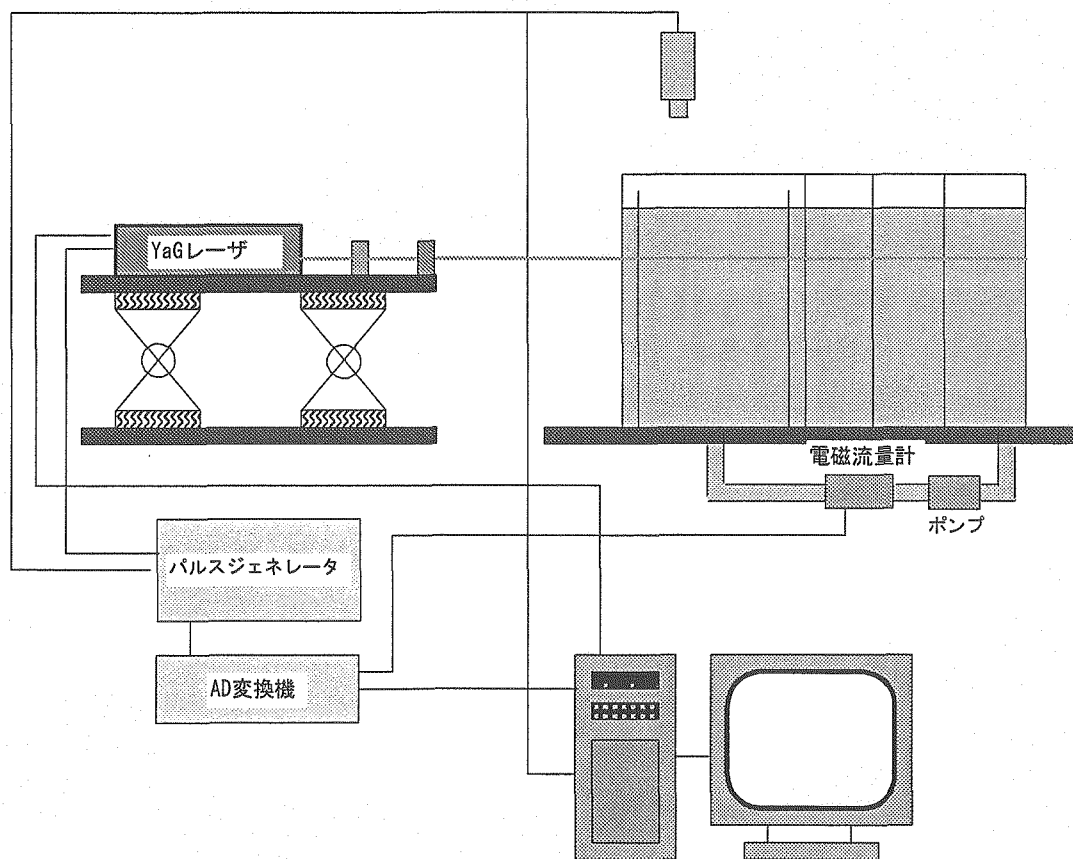


図 2 - 2 速度分布計測系

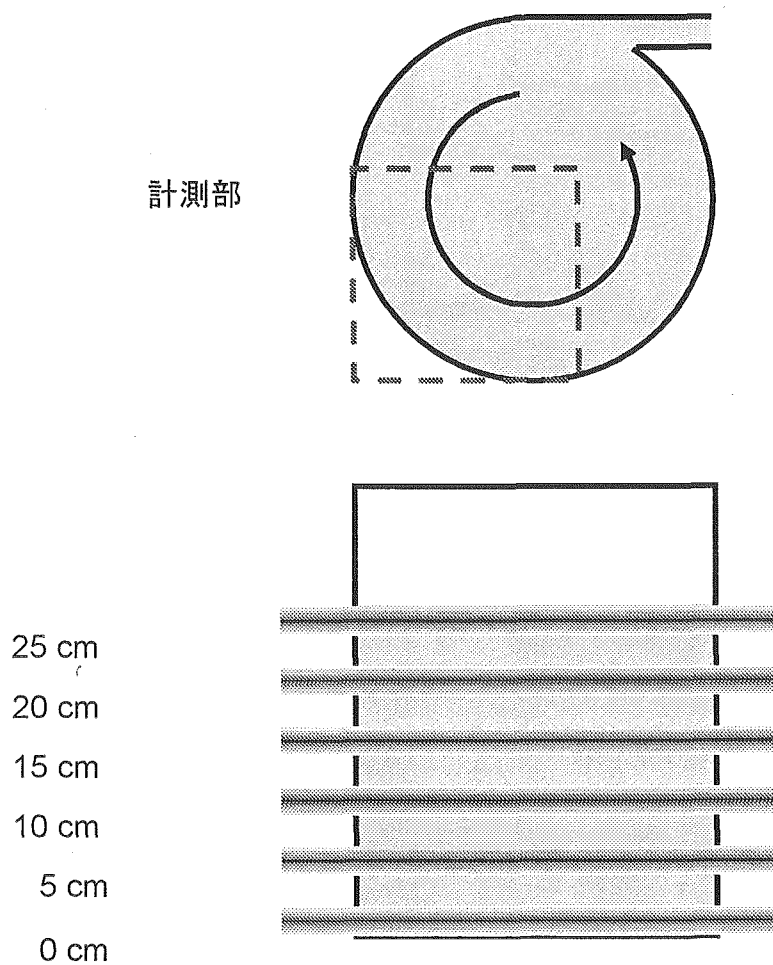
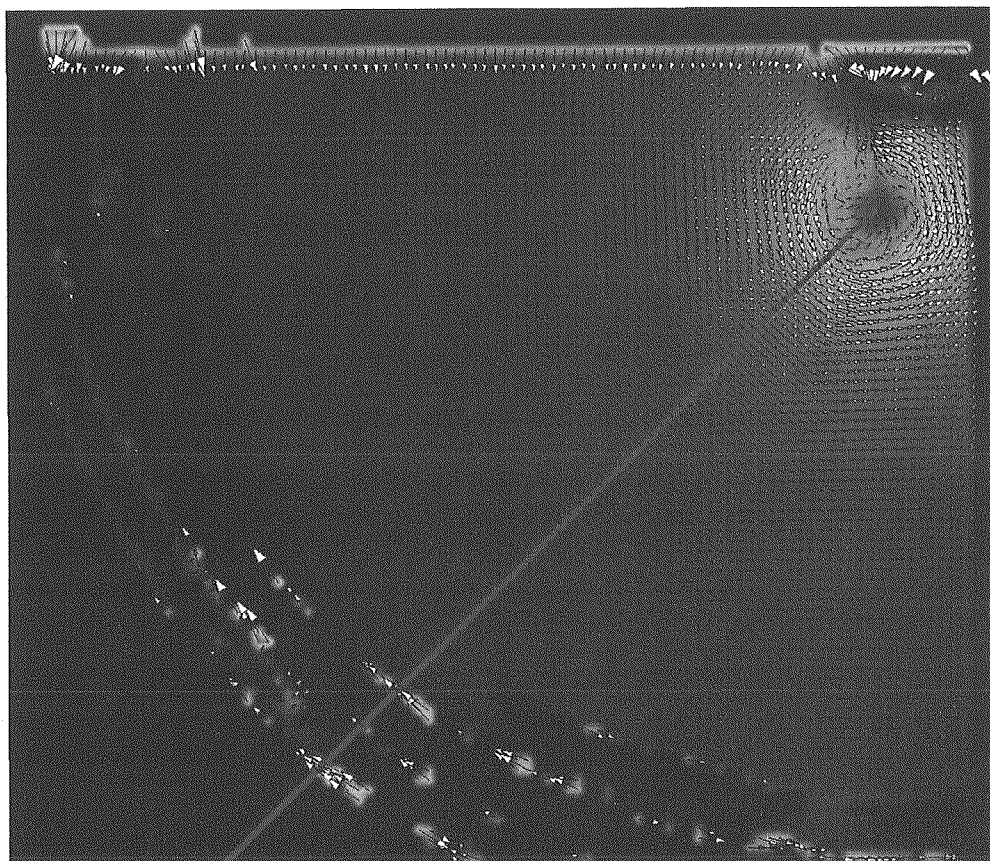
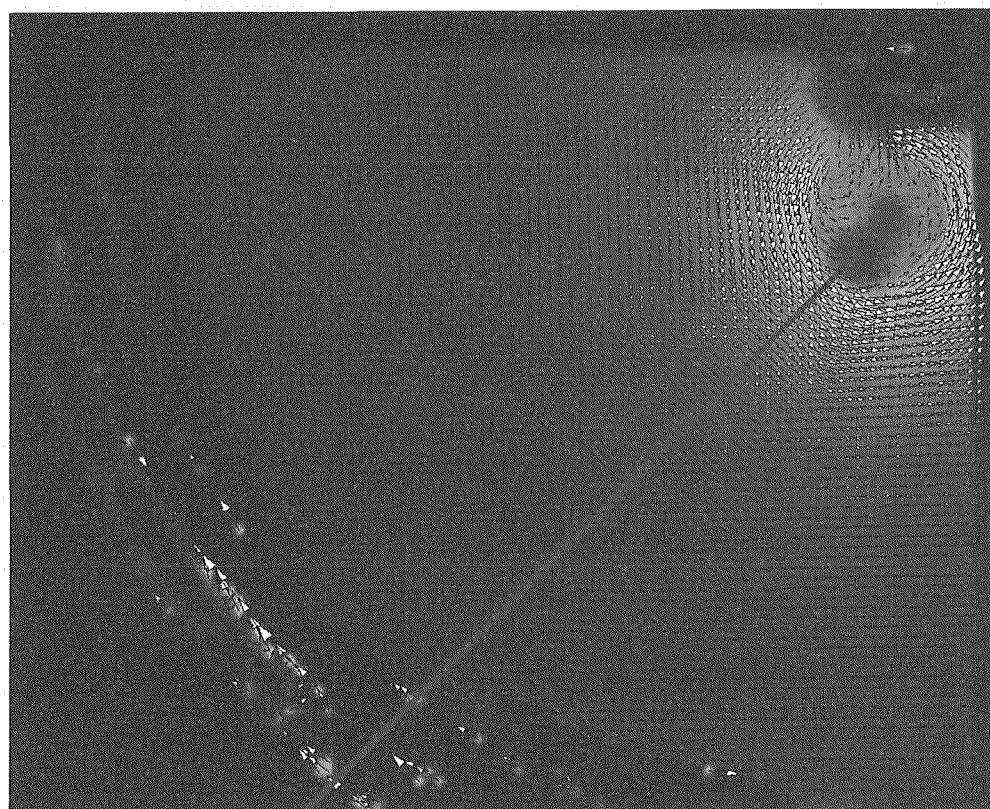


図 2 - 3 測定断面と測定範囲

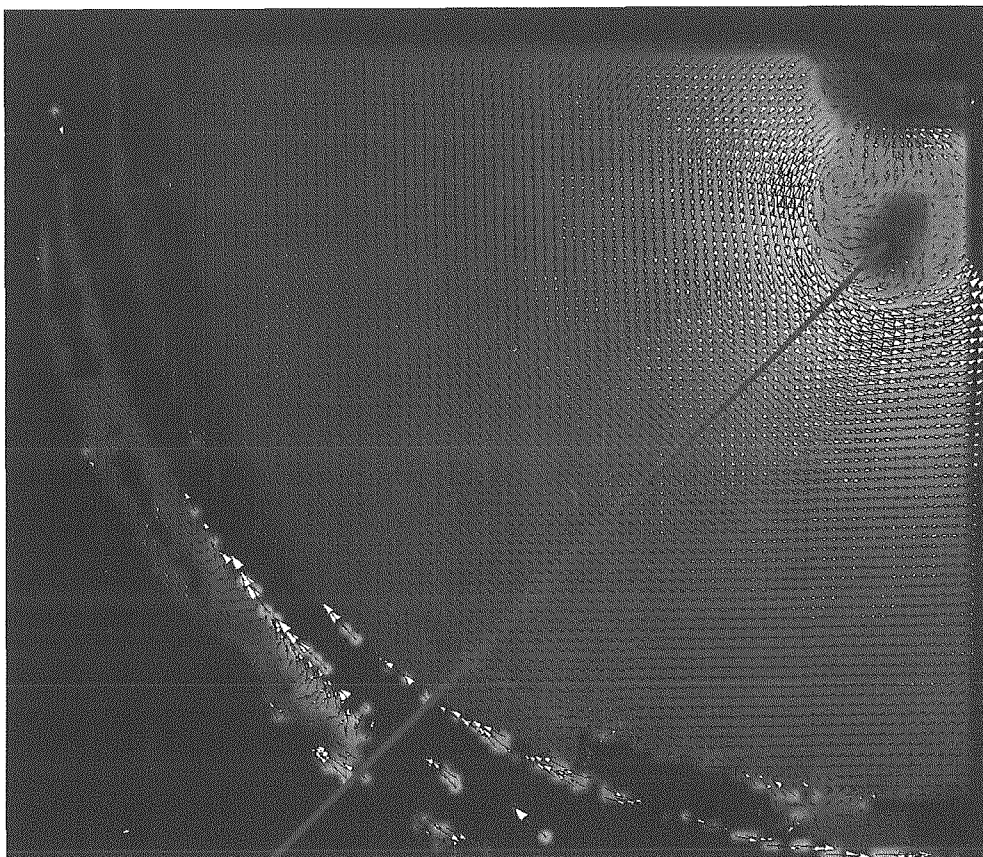


(a) 4.5 L/min



(b) 6.0 L/min

図3-1 容器底面から15cmの測定面における定常流量の速度場



(c) 7.5 L/min

図 3 - 1 容器底面から 15cm の測定面における定常流量の速度場

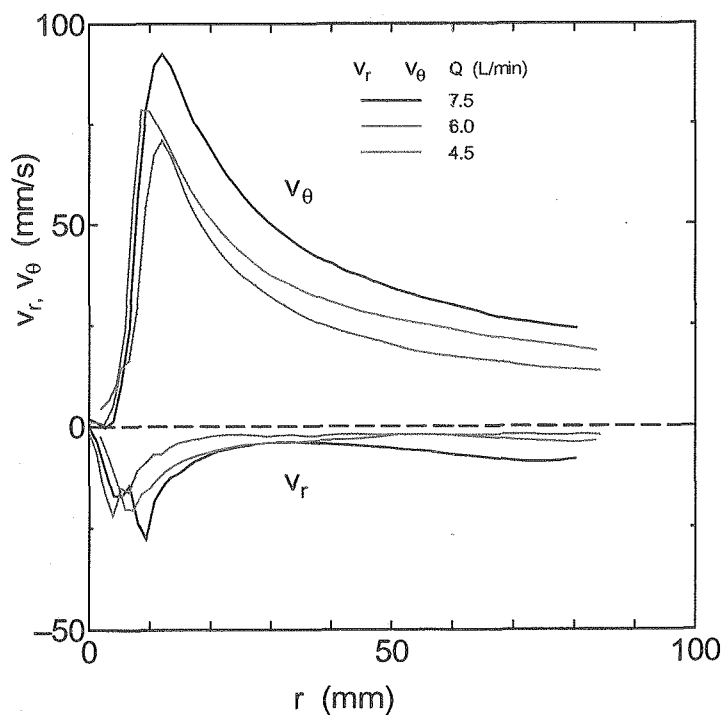


図 3 - 2 容器底面から 15cm の測定面における定常流の速度分布

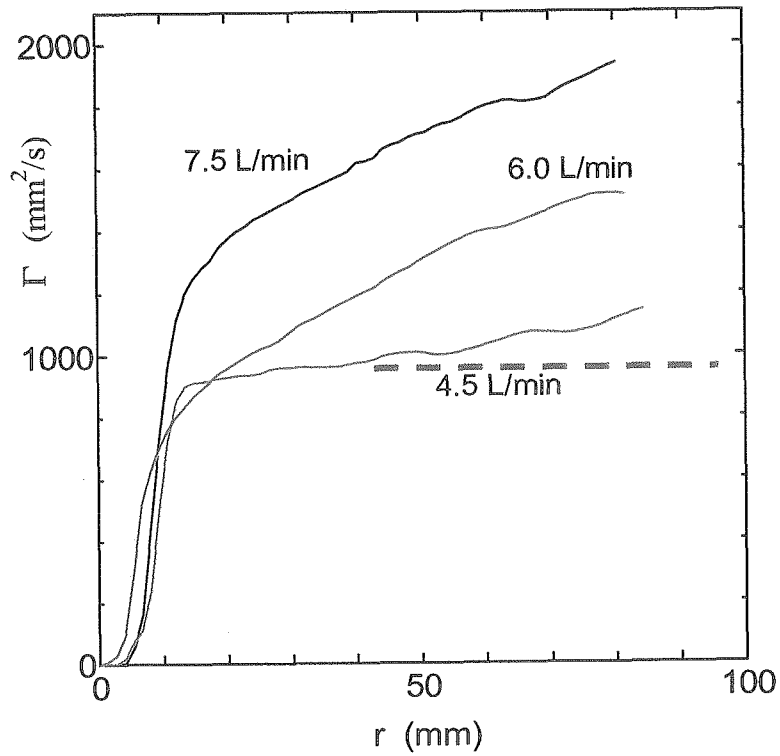


図 3-3 容器底面から 15cm の測定面における定常流量の循環分布

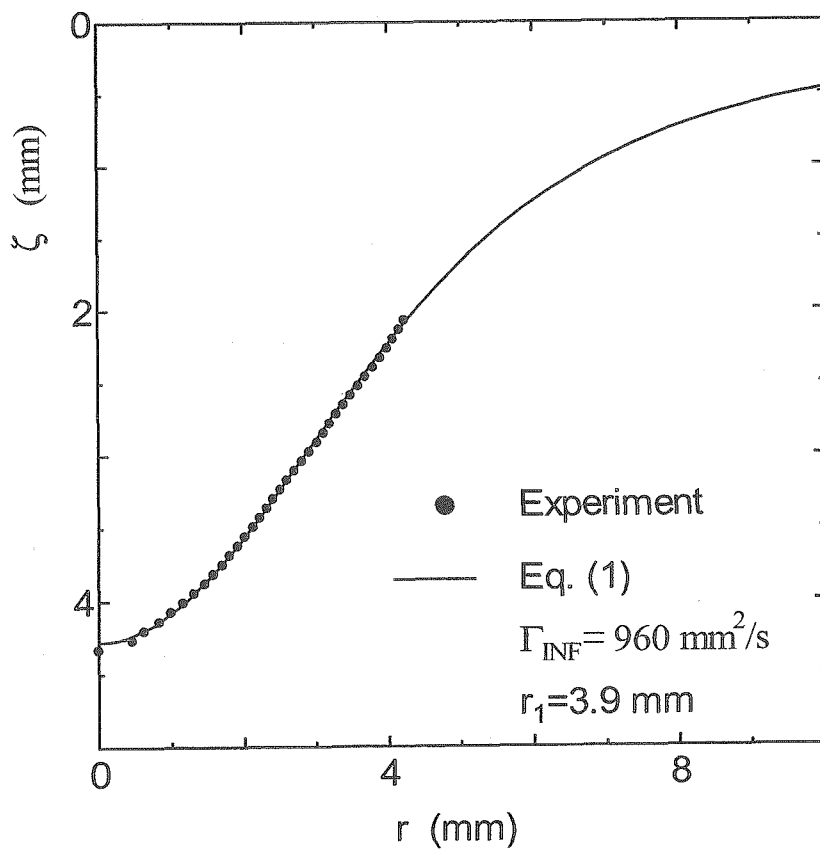


図 3-4 ガスコア形状の計測値と計算値の比較

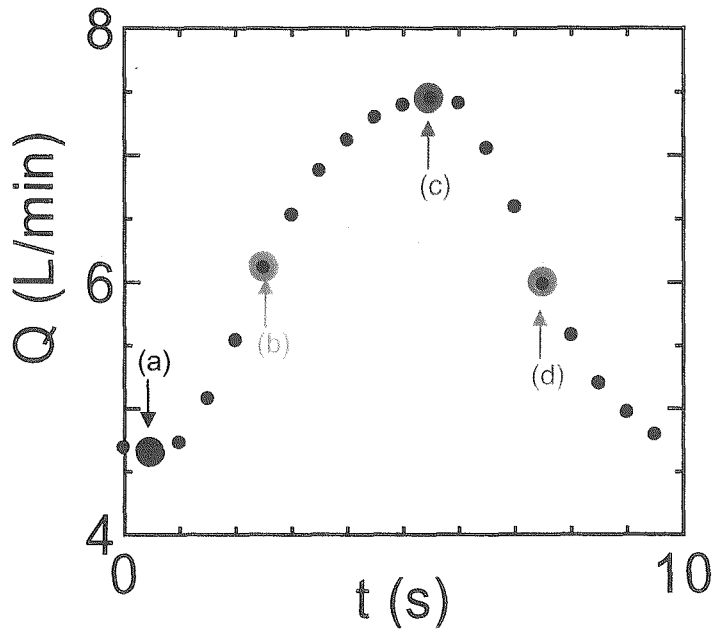
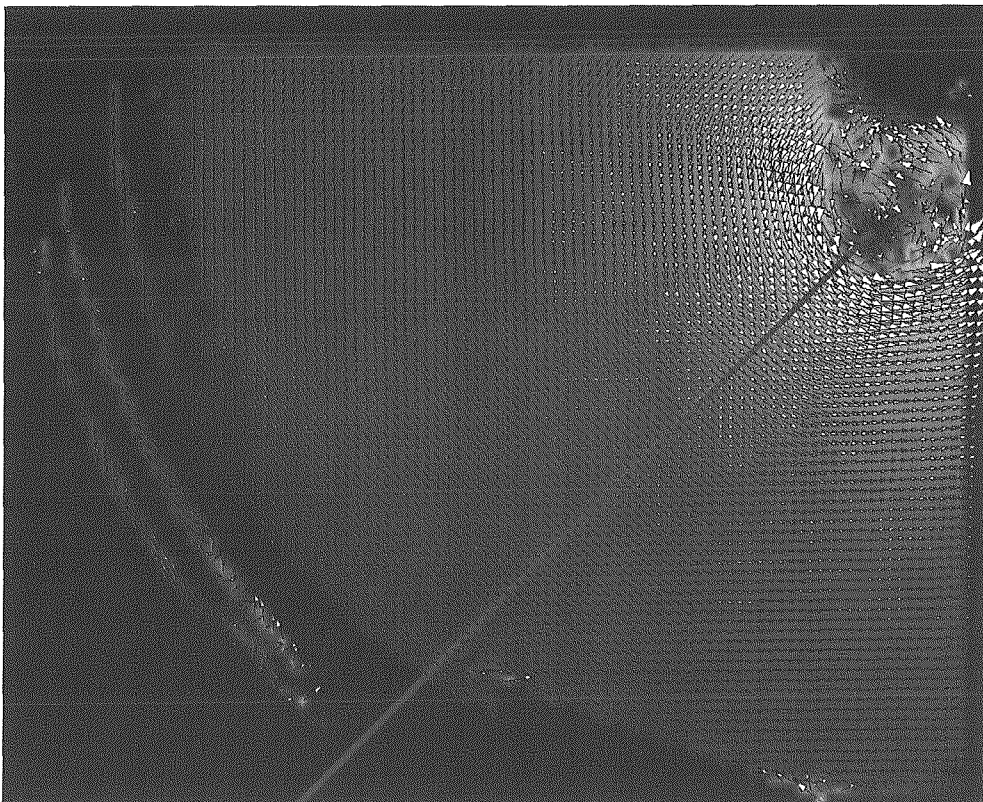
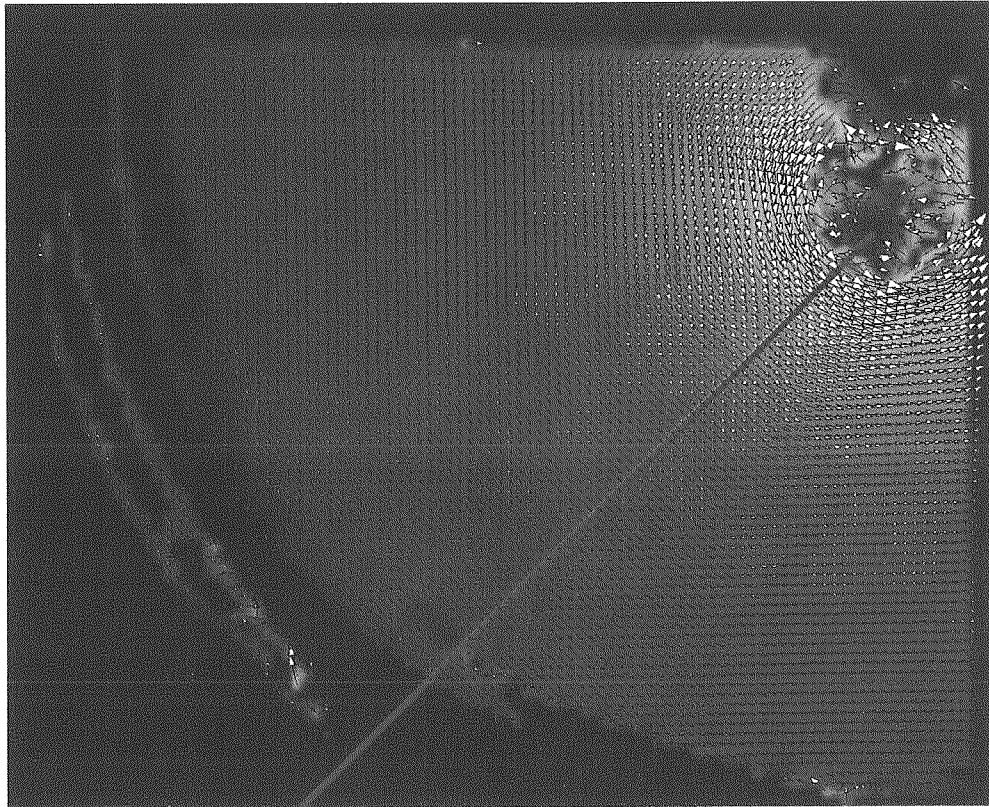


図3-5 周期的流量変動と平均を取った位相

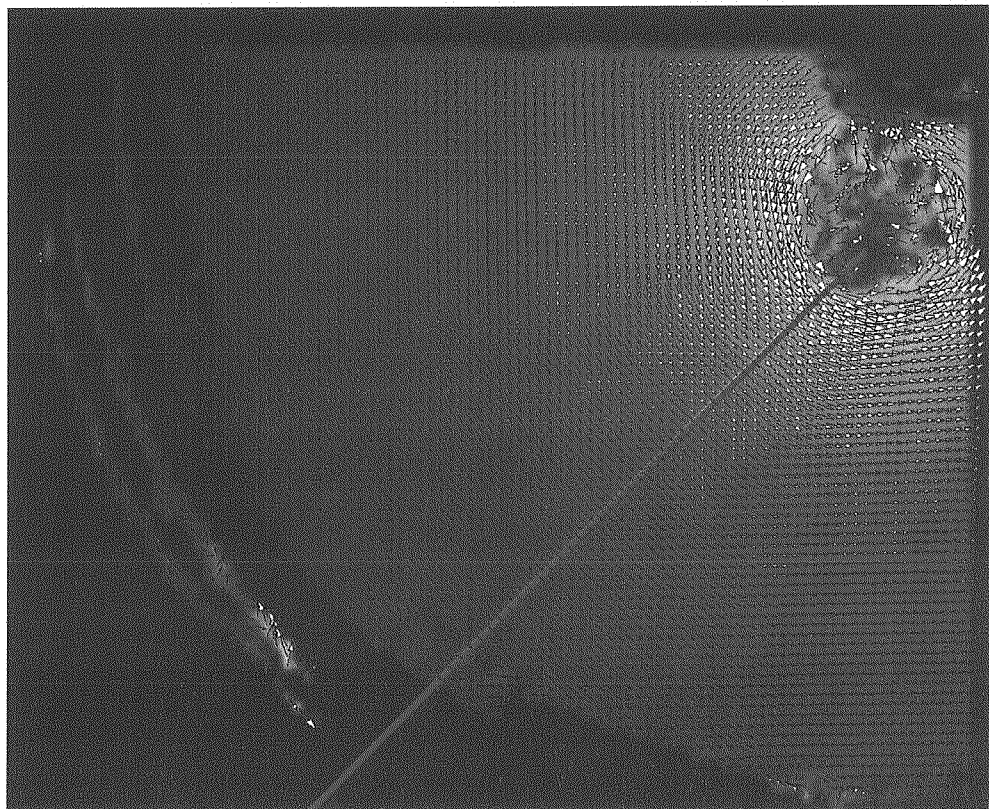


(a) $Q=4.5$ L/min

図3-6 周期的に流量が変動する場合の速度場



(b) $Q=6.0$ L/min 流量は増加中



(c) $Q=7.5$ L/min

図 3 - 6 周期的に流量が変動する場合の速度場



(d) $Q=6.0$ L/mi 流量は減少中

図3-6 周期的に流量が変動する場合の速度場

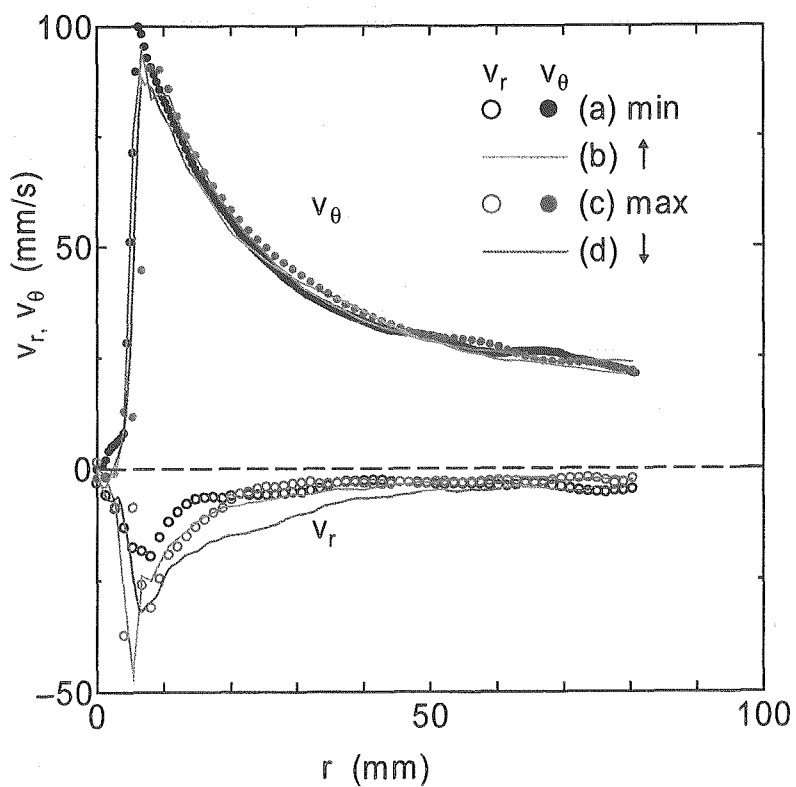


図3-7 周期的に流量が変動する場合の速度分布

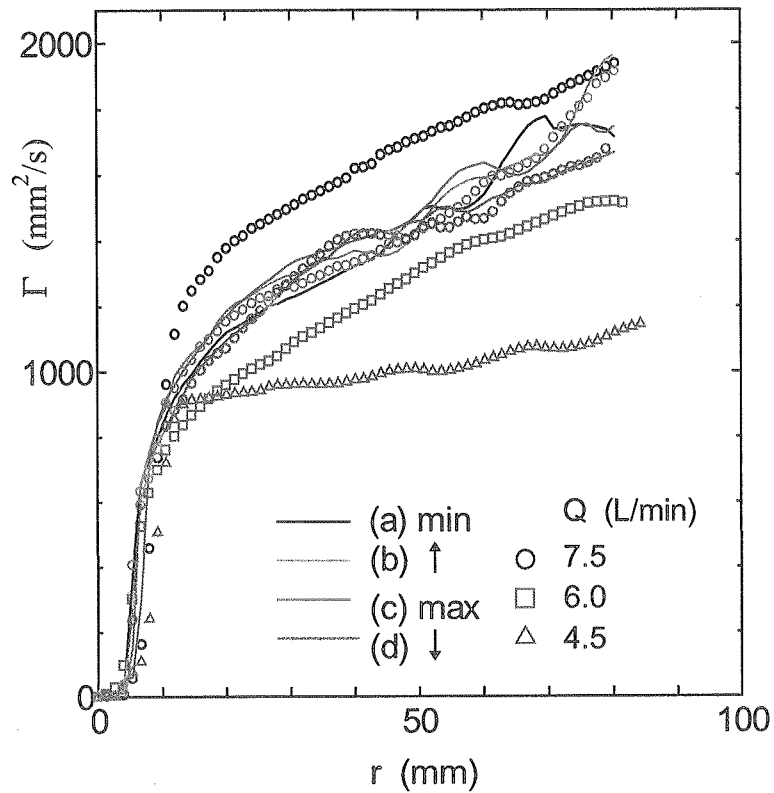
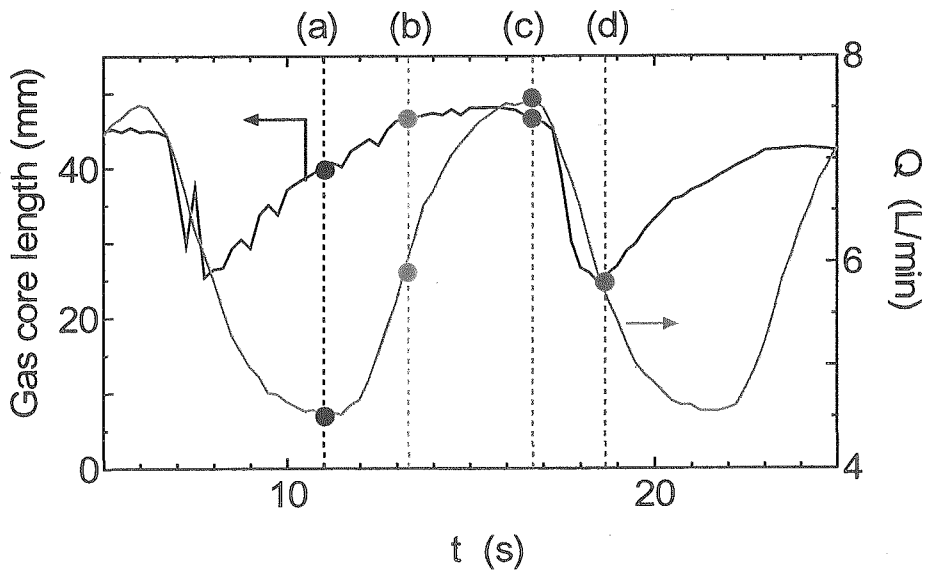


図3-8 定常および非定常流量条件下の循環分布の比較



$Q=6.0 \pm 1.5 \text{ L}/\text{min}$ $T=10 \text{ s}$

図3-9 流量とガスコア長

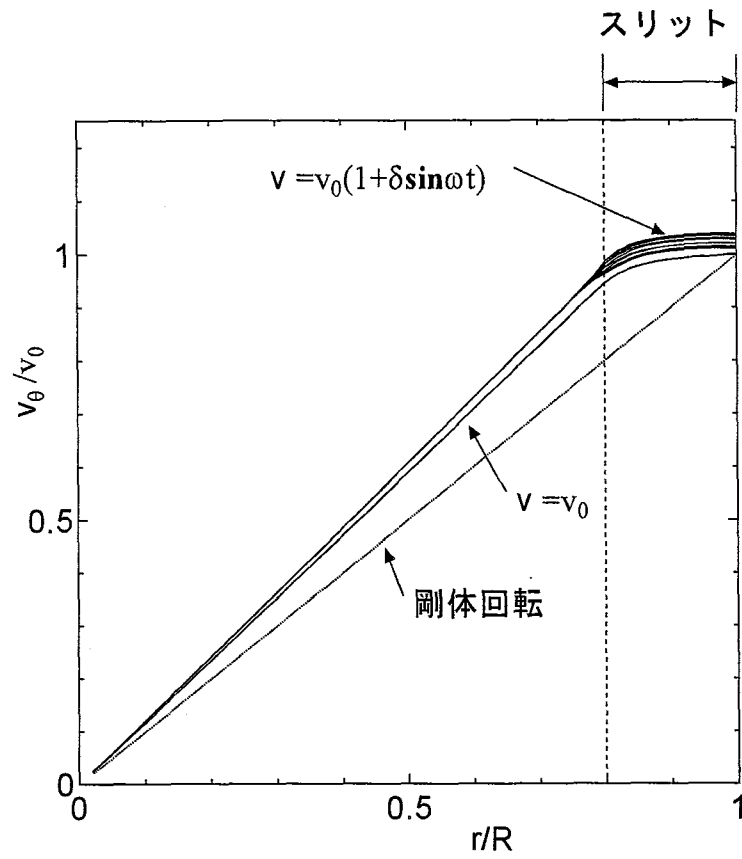


図 3-10 流体に時間変動する運動量が付加された場合の速度分布 (計算結果)