

分置

ガス巻込み現象詳細実験：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)

2004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-Ken 319-1184, Japan

© 筑波大学

(University of Tsukuba)

© 核燃料サイクル開発機構

(Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2004

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

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。したがって、ガス巻き込みを引き起こす重要なメカニズムの1つと考えられる自由表面渦の非定常特性について調べることは重要である。自由表面渦によるガス巻き込みは以下の一連の現象より構成されると考えられる；(i)自由表面でのくぼみ渦の形成、(ii)下降流によるガスコアの発達、および(iii)ガスコア先端の気泡の分離によるガス巻き込みの発生。この研究では、気泡の分離によるガス巻き込みの段階に焦点を当て、流動条件の変動によるガスコアの非定常な振舞いを実験的に調べた。

定常流によるガス巻き込み実験で用いられた体系と類似のシンプルな体系を用いて実験を行った。試験部を円筒容器とし、円筒容器内に容器壁の接線方向に水を流入させ循環を引き起こした。また、容器底部に吸込み口を設け、下降流を形成した。このとき、循環と下降流により自由表面渦が成長する。実験は水を作動流体とし、大気開放で行った。ガスコアの非定常な振舞いを知るために、流入流量を正弦波状に変化させ、ガスコア形状の時間的変化をステレオ画像処理法によって測定した。

主な研究の結果は以下のとおりである。

- (i) ガスコア長は水の流量変動と共に変化するが、その変動の形は正弦波状ではなく、水流量が減少する時ガスコア長は急に減少した。これは、流量が増加するときの流れの特性時間が減少するときの特性時間より長いことと一致する。
- (ii) 変動する水流量の条件下でのガスコア長は、最大流量で定常的に流れた場合のガスコア長より短かった。また、逆に、最低流量で定常的に流れた場合のガスコア長より長かった。これは、変動流量の最大値と同じ流量で定常的に流れた場合にガス巻き込みが発生する場合でも、流量が変動する場合にはガス巻き込みが必ずしも生じるとは限らないことを示唆する。
- (iii) 流量の変動周期が長くなると、ガスコア長の変化は明確な周期性を示さなくなった。これは、速度乱れによる効果が顕在化したためと考えられる。

* 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

Experiment on Gas Entrainment at Free Surface:
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 feared to occur. The estimation of the onset condition of gas entrainment is an important factor for design of the reactor. Therefore, the study on the unsteady characteristics of the free surface vortex is important. The gas entrainment due to the free surface vortex is a time series of phenomena; (i) formation of a vortex dimple on the free surface, (ii) development of the gas core of the vortex by a downward flow, and (iii) gas entrainment by the separation of bubbles at a tip of the gas core. In this study, the gas entrainment by the bubble separation is focused on and the unsteady behavior of the gas core by the fluctuations of the flow conditions is investigated experimentally.

In the experiment, an apparatus having a simple geometry, similar to that used in the study on a steady free surface vortex, was used. The circulation was generated in a cylindrical vessel with a tangential slit injection and the downward flow was by a suction pipe at the bottom. The free surface vortex developed due to the circulation and the downward flow. The working fluid was water and the vessel is under the atmospheric air. In order to know the unsteady behavior of the gas core, the injection flow rate into the vessel was changed as a sine wave, and the time series of the gas core geometry was measured by a stereo image processing.

The results of the study are mainly as follows;

- (i) The gas core length changed with the water flow rate but the shape of the fluctuation of gas core length was not a sine wave. The gas core length decreased suddenly when the water flow rate decreased. This corresponds that the characteristic time of the flow for the increasing flow rate is longer than that for the decreasing flow rate.
- (ii) The gas core length under the fluctuating flow rate was shorter than that under the condition of the fixed water flow rate which is the same as the maximum water flow rate of the fluctuating flow. This fact suggests that the gas entrainment always does not occur under the fluctuating flow rate condition where the gas entrainment occurs under the fixed flow rate that is the same as the maximum flow rate of the fluctuating flow.
- (iii) The fluctuation of the gas core length did not show periodic clearly with longer period of the flow rate fluctuation because a turbulent effect of the flow became obvious.

* 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. ガス巻き込み機構の予測と研究手法	2
3. 実験装置と計測系	2
3. 1 実験装置	
3. 2 計測方法	
3. 3 実験条件	
4. 実験結果	5
4. 1 定常旋回流による渦	
4. 2 ステップ状流量変化に対する応答	
4. 3 正弦波状流量変化に対する応答	
5. おわりに	8
参考文献	9

表リスト

表 3-1	ポンプの仕様	10
表 3-2	電磁流量計の仕様	10
表 3-3	CCD カメラの仕様	11
表 3-4	テレセントリックレンズの仕様	11
表 3-5	代表的な流量条件での容器流入／流出速度	12
表 3-6	ステップ状に流量を変化させた場合の流量条件	12
表 3-7	正弦波状に流量変動を与えた場合の流量条件	12
表 4-1	流入流量と定常旋回渦の長さ	16
表 4-2	ステップ状に流量を変化させた場合の過渡時間	16

図リスト

図 3-1	実験装置概略	13
図 3-2	ステレオ画像処理計測系	13
図 3-3	テレセントリックレンズの特徴	14
図 3-4	渦の撮影例と輪郭曲線	15
図 4-1	定常渦の形状 (7 L/min)	17
図 4-2	気泡の離脱と連なり	18
図 4-3	ステップ状に流量を増加させた場合のガスコア長さの時間変化	19
図 4-4	ステップ状に流量を減少させた場合のガスコア長さの時間変化	19
図 4-5	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	20
図 4-6	流量変動周期を変えた場合のガスコア長の比較 (平均流量 6 L/min, 最大流量 7.5 L/min, 最小流量 4.5 L/min)	21
図 4-7	流量変動周期を変えた場合のガスコア長の比較 (平均流量 6 L/min, 最大流量 7.0 L/min, 最小流量 5.0 L/min)	22
図 4-8	流量変動周期を変えた場合のガスコア長の比較 (平均流量 6 L/min, 最大流量 6.5 L/min, 最小流量 5.5 L/min)	23
図 4-9	流量変動周期を変えた場合のガスコア長の比較 (平均流量 6 L/min, 変動周期 T=10 s)	24
図 4-10	長周期の流量変動を与えた場合のガスコア長変化 (周期 T=400 s, 平均流量 6 L/min, 最大流量 6.5 L/min, 最小流量 5.5 L/min)	25

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共同研究を実施した。

高速炉内の自由液面からのカバーガス巻き込みの形態として、上昇流が自由液面に衝突した場合の液面の乱れや内部構造物と容器壁の狭窄部での潜り込み、間欠的に生じる自由表面渦による巻き込みが挙げられている。この内、自由表面渦による巻き込みは、液面の乱れがほとんど観察されない状態から突如発生するため予測が困難で、また、これが発生すると1次循環系全体にガスが連行される可能性が高く、この発生機構に関する研究が重要と思われる。

従来の自由表面渦によるガス巻き込みに関する研究では、定常的な渦（安定な層流渦）を強制的に作り、循環や下降流速の強さをパラメータとして気泡の離脱条件を把握することが行われてきた[1]、[2]。しかし、形状を模擬したモデル試験などで観測される実現現象に比べると、渦が安定なためにガスコアが長く引き延ばされ、気泡が離脱しにくいと考えられる。また、実現現象に見られるガス巻き込みが間欠的に、また見かけ上突発的に発生する事象であることから、非定常性が強く、安定な条件下での研究は現象を理解するのに十分とは考えられない。

そこで、本研究では、自由表面渦によるガス巻き込み現象を次に示す一連の非定常現象として捉え、研究を行う。つまり、ガス巻き込み現象は、自由液面近傍に循環（渦）が発達するとともにその下方に下降流が存在するとき、くぼみを伴った渦が形成され、渦と下降流の相互作用の中で渦が発達し、くぼみの先端で気泡が液中に離脱する現象として捉えられる。しかし、一連の現象すべてを一度に把握することは困難なため、本研究では、最後のくぼみ渦の先端で気泡が液中に離脱する段階について詳しく調べることにする。非定常性を考慮し、渦の強さの変動や液面の波立ち、乱流、遠方の速度変動など実現現象に見られる比較的不安定で過渡的な気泡の離脱という側面から新しい知見を得ようとするものである。

研究では、従来の定常的な渦に関する研究で用いられたようなシンプルな体系を対象とした。水を作動流体とし、渦と下降流を生成できる試験装置を作成した。計測ではステレオ画像処理法を適用し、渦を形成する水流の流量をパラメータにとり、渦の時間的变化を計測した。定常渦と比較し、流量の変動が渦の挙動および気泡離脱に及ぼす影響について調べた。

2. ガス巻き込み機構の予測と研究手法

自由表面渦によるガス巻き込み現象を時間経過（現象の進行）に従って段階に分けるとすると次のように考えられる。(i)まず、構造物付近のせん断流れや対向流による初期の渦が生成され、(ii)次に、渦が下降流速を伴い成長し、(iii)渦先端からガスが分裂し、やはり下降流により気泡が連行され、最終的にガスが一次系全体に行き渡る。最終段階に達すると、ポンプ性能や炉心反応度異常などの不具合が発生することが懸念される。(i)と(ii)の段階に関しては、他の研究によりその機構が解明されつつあるため、本研究では(iii)の渦からの分裂による気泡離脱と下降流による連行の段階に焦点を当て、流況の把握と機構の解明および流動条件の影響等を調べることにした。

しかし、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ガス巻き込み現象のガスコア先端からの気泡離脱は、非常に狭い範囲での非定常現象であるため、現在の測定技術では十分な精度を持って計測することは困難と考えられる。そのため、測定の対象を容器内定常旋回渦とし、これに流れ場の変動を与え、巻き込み現象を観察することとする。流れ場の変動としては流量の時間的変化や速度乱れ成分の変化が考えられるが、定常状態に流量変動を与えることから出発し、計測を容易にする。

最終的な研究目的は、上に述べたような渦からの気泡離脱と連行現象の機構の解明と流況変化の影響を調べることであるが、今回の研究では、定常旋回渦から出発し、流量が時間的に変化した場合の旋回渦の挙動と気泡離脱に及ぼす効果を明らかにすることを目的とし実験的研究を行った。

3. 実験装置と計測系

3. 1 実験装置

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]を参考に、実験装置を作成した。実験装置の概略を図3-1に示す。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。また、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。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。ポンプと電磁流量計の仕様を表 3-1、2 にそれぞれ示す。

実験装置は、守屋が用いたものと似ているが、寸法と円筒容器出口条件が異なる。寸法は、ガス巻き込みの他の段階（渦の生成と成長）に関する実験とほぼ合わせるため、小さくなっている（代表寸法 20 cm）。また、円筒容器流入部流路幅や円筒容器出口径は、これに比例して小さくなっている。円筒容器出口条件は、守屋の体系の場合、160mm の出口導管が接続された後、大きな容積をもつ容器に自由落下するのに対して、本研究では出口導管を流量計まで径を変えずに接続した。この場合、円筒容器の下部から流出する水が持つ旋廻成分は導管内に保持される。実際のポンプの吸い込みでは大きな空間に流れが開放されることはないと考え、流量計まで同径のパイプ接続とした。また、構造上、エルボを設けることが必要であったため、ここでの流れが渦を強める可能性もある。

水位は 25 cm に設定した。これは、予備実験で旋廻渦によるガス巻き込みが確認された条件である。したがって、本研究では守屋が用いたエックマン層を形成しガス巻き込みを助長する、自由表面に付加するリングプレートは用いていない。

実験では、定常渦の条件の他、水流量を変化させた場合を行った。このために、電磁流量計の出力をフィードバックし、ポンプにて所定の流量にコントロールするために、電磁流量計とポンプを制御盤に接続し、さらに制御盤と PC を結び、PC からの流量設定を可能にした。流量は最小流量設定間隔 0.1 L/min で、最小設定時間間隔 $\Delta t = 1$ s で制御することができる。このとき、流量はポンプの機械的動作のために少し時間遅れが発生するが、後に示すように試験部の円筒容器内の流れが定常に達するまでには更に長い時間がかかり、ポンプの機械的動作による流量変化の遅れはほぼ無視できる。これに関しては、実験結果で詳しく説明する。

3. 2 計測方法

実験では電磁流量計による水流量の変化を計測した。また、旋回渦の形状計測をステレオ画像処理法で行った。このため、試験部の円筒容器と出口配管は透明アクリル製とし、さらに試験部周囲にはウオータージャケットを用い、画像の歪みを極力抑えた。

ステレオ画像処理計測[3]-[5]は、図 3-2 に示したように、2 台の CCD カメラにより異なる方向から対象を記録する方式で、円筒モデル等ある仮定の下、旋回渦の 3 次元形状の推定が可能となる。実際の撮影では、気液界面を鮮明に撮影するためバックライトを用いた。CCD カメラの仕様を表 3-3 に示す。CCD カメラは外部トリガーに同期し撮影することができる。本実験ではパルスジェネレータで適当な撮影時間間隔を設定し、この信号をカメラと流量計記録用 A/D 変換器に入力し、流量が既知の常態での画像を得た。

また、撮影レンズにはテレセントリックレンズを用いた。テレセントリックレンズは、絞ることによりレンズに垂直に入射する平行光のみを撮影面（CCD 素子）に投影

するものである。平行光のみを取り込むことから、このレンズによる撮影では遠近感がなくなり、図3-3に示す概念図のように、実際の大きさが同じであれば、遠くのものも近くのものも同じ大きさに撮影される。今回のように非定常流量による旋回渦の場合は、その位置が刻々と変化しカメラからの距離が変わるため、テレセントリックレンズは渦形状を計測するには都合が良い。ただし、平行光のみを取り込むため、レンズ径が撮影範囲を決定し、大きな視野を得ることは難しい。使用したテレセントリックレンズの仕様を表3-4に示す。

図3-4に今回撮影した渦の例とそれを画像処理し、渦の輪郭曲線を得た結果を示す。画像処理では、現画像から背景画像を差し引き、更に二値化したのちに輪郭を得た [4]。

3.3 実験条件

主に3種類の実験を行った。まず、所定の流量条件のもと、定常旋回流を作り、そのときの渦形状を計測した。流量を4.5 L/min から 7.5 L/min まで 0.5 L/min 間隔で変化させ、それぞれ定常状態でのガスコア長を計測した。代表的な流量条件として5, 6, 7 L/min の場合について、円筒容器への平均流入速度および出口管での平均流速を表3-5に示す。4 L/min の流量では渦の深さが小さく観測しづらいことおよび8 L/min 以上では渦先端から気泡が離脱しガス巻き込みが発生するためこのような流量を例にとり計測した

つぎに、ポンプの回転数を制御して流量をステップ状に、また正弦波状に変化させた場合の実験を行った。ステップ状に一定流量から異なる一定流量にする場合には、流量を増加する場合と減少させる場合を行い、また、変化幅を変えて行った。実験条件を表3-6に示す。これにより系の時定数を調べることができると考えられる。ガスコア長および流量の計測時間間隔は1 s とした。また、非定常な流量条件の下での旋回渦の挙動を調べるために、正弦波状に流量を連続的に変化させた場合として、平均流量を6.0 L/min とし、変動量を ± 0.5 、 ± 1.0 、 ± 1.5 L/min に変えて実験を行った。また変動周期は、それぞれ場合に、10、15、20 s に設定した。これらの周期は、後で示すように系の時定数より短い。このときのガスコア長および流量の計測時間間隔は0.25 s とした。反対に、系の時定数より長い場合として、平均流量6.0 L/min、変動幅流量を ± 0.5 L/min とし、変動周期を400 s として実験を行った。ガスコア長および流量の計測時間間隔は1 s とした。正弦波状の流量変動を与えた場合の流量条件を表3-7に示す。

4. 実験結果

4. 1 定常旋回流による渦

渦形状の例として7 L/minの流量で定常に試験容器に流入流出した場合の渦の様子を示す。定常状態では、ほぼ渦形状は一定で、直行する2方向から取得した画像を基に得た渦の外形を図4-1に示す。それぞれの方向から見た図では、渦の輪郭と中心軸が示されている。渦形状はほぼ軸対象であるが、その中心軸は円筒容器の中心から大きく離れている。これは、円筒容器への流入口が1箇所であるため、円筒容器の壁に沿って流れた場合、入り口付近は流速が速く反対側は遅い円筒容器中心軸に対して非対称な流れ場を形成しているためと思われる。

このような外形を得た後、ガスコアの長さ(深さ)を各流量に関して得た。結果を表4-1に示す。それぞれ、十分時間の経過後計測した結果である。なお、流量が7.5 L/minでは、渦先端から気泡の間欠的な離脱が観察され(図4-2(a))、8.0 L/minではその間隔が短くなり、最終的には連なった渦先端が出口に吸い込まれる(図4-2(b))。この場合は、ガスコア長は水面から円筒容器底部までの距離となるため記載していない。また、同じ流量(7.5 L/min)条件でも間欠的な気泡離脱が観察されない場合もあり、実験条件が十分に制御されていない面がある。

4. 2 ステップ状流量変化に対する応答

ある一定流量から異なる一定流量にステップ状に変化させた場合の渦挙動を計測し、系の時定数を推定した。図4-3は流量を増加させた場合のガスコア長の時間変化を示す。長時間たった後、ガスコア長は定常に達している。その定常値になるまでの部分を過渡変化とみなし、近似した直線と定常値との交点を定常に達するまでにかかった時間として評価した。表4-2にかかった時間を示す。5.5 L/minから6.5 L/minに変化させた場合、ガスコア長は約130秒後にほぼ定常に達している。流量変化にかかった時間は示していないが、ほぼ2s以内に終了し、ガスコア長さの変化に比べて速く、ステップ状の流量変化を与えた場合とみなすことができる。流量を増加させた場合、変化幅が大きい方が当然、ガスコア長が定常に達するまでの時間は長く、5.0 L/minから7.0 L/minに変化させた場合は約160sかかって定常に達している。

図4-4に流量をステップ状に減少させた場合のガスコア長の時間変化を示す。増加させた場合に比べ、過渡状態でのガスコア長の時間的変動が大きい。流量を増加させた場合と同様に、変化幅が大きい方が定常に達するのに時間がかかる。また、流量を増加させる場合と減少させる場合では、同じ変化幅であれば減少させる場合のほうが、短い時間で定常に達していることがわかる。流量が増加する場合は、流入した水により力(モーメント)を受け、壁からの摩擦に抗しながら回転速度が増加するのに比べ、流量が減少する場合は流入する水による力(モーメント)が減少するが、このとき壁から摩擦力も回転速度を減少させる方向に働くため、定常に達するまでの時間が短くなるものと考えられる。また、流量が減少する場合は、内部の流体は慣性モーメントにより流量減少前の回転速度を持ち、徐々に壁付近の遅い流れの影響を受けて減速

するものと考えられる。このとき、容器中心部付近の旋回流は周囲流体からのせん断力を受け旋回成分が減少するため、不安定となりガスコア長が変動しやすいものと考えられる。厳密な定義はさらにデータを取得した後に検討することとなるが、ステップ状流量変化に対応するガスコア長の変化に要する時間をここでは系の時定数と言うことにする。

4. 3 正弦波状流量変化に対する応答

図4-5に流量変化とそのときのガスコアの長さおよび実丸で示した時刻でのガスコアの画像を示す。流量は周期10秒で、6.0L/minを中心に±1.5 L/minの範囲を正弦波状に変動させた。この流量変動に対し、ガスコアは位置と長さを変える。位置を変えるのは、流入口が一箇所であるため、その配置が試験部円筒容器の中心軸に対して非対称で、流れ場も非対称になるためである。今回の実験ではテレセントリックレンズを用いているため、ガスコアの位置変化の影響を受けずガスコア形状の計測が可能である。図4-5に示すようにガスコア長の時間変化は正弦波状でなく、水流量が減少するときに急激に長さが短くなっている。これは、前節のステップ状に流量が増加する場合と減少する場合の過渡変化にかかる時間（系の時定数）の違いに対応し、減少するときの方が系の時定数が短いことと一致する。また、ほぼ流量と同じ周期でガスコア長は変化するが、それぞれの周期の中での最大長さを比較すると、必ずしも同じ値ではなく、更に長周期の変動の影響を受けている可能性を示している。

図4-6に流量変動幅を固定し、変動周期Tを10、15、20sに変えた場合のガスコア長の時間変化を示す。このとき、平均流量は6.0 L/minで、最大流量および最小流量は、それぞれ、7.5 L/min、4.5 L/minである。比較のため、それぞれの流量Qで定常に流れた場合のガスコア長を破線で示す。例えば、図中6.0L/minと表示した破線は、6.0 L/minで定常に流れた場合のガスコア長を示す。流量が変動する場合のガスコア長は、流量変動周期が10sのときは周期性を示すが、流量変動周期が長くなるにつれて、ガスコア長の時間変化は明確な周期性を示さなくなる。このとき、ガスコア長は増減するが、それが流量変化と必ずしも同期せず、かつ、更に長周期の変動が見られるようになる。これは、流量が減少するときにガスコア長の時間変動が増加したことと対応するのではないか。つまり、流量減少時には速度の乱れがあり、流量変動の周期が長くなると、つまり単位時間当たりの変化量が小さくなると、その影響が顕在化すると考えられる。

周期が変化したときのガスコア長を、破線で示した定常流れのガスコア長と比較すると、周期がいずれの場合も最大流量である7.5 L/minで定常に流れた場合のガスコア長より短い。また、最低流量4.5 L/minで定常に流れた場合に比べて、ガスコア長は長く、流量が変動する場合のガスコア長は、最大流量および最小流量で定常に流れた場合のガスコア長の範囲内に収まることが分かる。また、流量が変動する場合のガスコア長の平均値は流量変動周期によって変わるが、ここで示した場合には平均流量6.0L/minで定常に流れた場合のガスコア長より長い。

流量変動時のガスコア長が、最大流量である 7.5 L/min で定常に流れた場合のガスコア長より短い傾向を示すことは興味深い。定常状態でガス巻き込みを発生させない条件の方が、流量変動する条件下でガス巻き込みを発生させない条件より厳しい(上限流量が小さい)ことを示し、定常状態でのガスコア長より決定したガス巻き込み防止条件は安全側に見積もっていることとなる。ただし、ここでは局所的な速度乱れの影響は考慮していない。

図 4-7、4-8 には流量変動幅をそれぞれ、 6.0 ± 1.0 L/min、 6.0 ± 0.5 L/min に固定し、変動周期 T を 10, 15, 20s と変えた場合のガスコア長の時間変化を示す。破線は図 4-6 と同様に、最大流量、平均流量および最小流量で定常に流れた場合のガスコア長を示す。ガスコア長の変化の特徴は図 4-6 で示した傾向と同じで、ほぼ最大流量と最小流量で定常に流れた場合のガスコア長の範囲内に収まっている。また、平均流量で定常に流れた場合のガスコア長より長い範囲で変動する。

図 4-9 は流量変動周期 T を 10 s に固定し、流量変動幅を ± 1.5 L/min、 ± 1.0 L/min、 ± 0.5 L/min に変えた場合を示す。変動幅が小さくなるにつれてガスコア長の周期的変化は明確でなくなる。また、それぞれの平均流量は同じであるが、ガスコア長の平均値は次第に減少する傾向を示す。変動幅が小さくなるとガスコア長の周期性が失われるのは、周期が長くなった場合と同じで、単位時間当たりの流量変化が小さくなり、乱れによる影響が顕在化しているのではないかと考えられる。

周期が長くなると、ガスコア長は不安定になり、流量変動に追従しないことを示したが、非常に長周期の場合は定常流によるガスコア長と一致しなければならない。従って、次にステップ状流量変化に対する応答の項で調べた時定数より長い周期の変動を与えた場合のガスコア長について調べた。400 s の周期を与え、画像取得間隔は 1 s とし、500 s 間計測した。流量制御の精度が 0.1 L/min であるため、流量変動は正弦波形状からずれるが、いずれの場合も、最大流量で定常的に流れた場合のガスコア長と最小流量で定常的に流れた場合のガスコア長の間で変動し、かつそれぞれの長さに近づいている。従って、長周期の流量変動の場合は定常流れの結果とは矛盾しない。時定数より短い周期で変動する中で、比較的周期が長い場合にガスコア長が不安定になるようである。

5. おわりに

コンパクト化された原子炉容器では自由界面からのガスの巻込みの発生が危惧され、ガス巻込みの判断基準を策定することが望まれている。自由液面からのカバーガス巻き込みの形態の内、自由表面渦による巻き込みは、これが発生すると1次循環系全体にガスが連行される可能性が高く、この発生機構に関する研究を行った。

本研究では、自由表面渦によるガス巻き込み現象をその時間進行に従い、(i)自由液面近傍に循環(渦)が発達するとともにその下方に下降流が存在するとき、くぼみを伴った渦が形成され、(ii)渦と下降流の相互作用の中で渦が発達し、(iii)くぼみの先端で気泡が液中に離脱する現象に分けて考え、最後のくぼみ渦の先端で気泡が液中に離脱する段階について詳しく調べることにした。

研究では、従来の定常的な渦に関する研究で用いられたものと類似した体系を対象とした。水を作動流体とし、渦と下降流を生成できる試験装置を作成した。計測ではテレセントリックレンズを用いたステレオ画像処理法を適用し、渦を形成する水流の流量をパラメータにとり、渦の時間的変化を計測した。定常渦と比較し、流量の変動が渦の挙動および気泡離脱に及ぼす影響について調べた。その結果、主なものとして以下のような結果が得られた。

- (1) 単純な過渡変化としてステップ状の流量増加ならびに減少時のガスコア長の変化を観測した結果、初期定常状態からガスコア長が変化し終わるまでの時間が、両者で異なることがわかった。すわわち、流量が増加する場合より減少する場合の方がガスコア長の変化にかかる時間(系の時定数)が短い。
- (2) 正弦波状の流量変動を与えた場合、ガスコア長はこれに対応し変化するが、正弦波状ではなく、水流量が減少するときに急激に長さが短くなることが示された。これは、減少するときの方が系の時定数が短いことと一致する。
- (3) 流量が変動する場合のガスコア長は、最大流量および最小流量で定常に流れた場合のガスコア長の範囲内に収まる。これより、定常状態でガス巻き込みを発生させない条件の方が、流量変動する条件下での条件より厳しいことを示す。従って、定常状態でのガスコア長より決定したガス巻き込み防止条件は安全側に見積もっていることと推測される。ただし、この場合、局所的な速度乱れの影響は考慮していない。
- (4) 流量変動周期が系の時定数より小さい場合、周期が長く、また、変動幅が小さくなるにつれて、ガスコア長の時間変化は明確な周期性を示さなくなる。
- (5) 周期が系の時定数より大きな場合は、最大流量で定常的に流れた場合のガスコア長と最小流量で定常的に流れた場合のガスコア長の間で変動し、かつそれぞれの長さに近づいている。つまり、各時刻における定常流によるガスコア長とほぼ一致する。

特に、(3)の結果から、定常流では気泡離脱とガス巻き込みが発生する流量を最大流量にとり、流量変動を与えた場合にもガス巻き込みが発生しない可能性があることを示唆する。

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] T. Takamasa, and K. Kondo, Measurement of bubble motion in bent tube using image-processing method, Proceedings of International Symposium on Two-Phase Flow Modeling and Experimentation, 2(1995), pp.110-117.
- [4] H. Monji and G. Matsui, Gas-Phase Characteristics in Sliding Bubble Flow Obtained by Image Processing" Proc. of the Japan-U.S. Seminar on Two-Phase Flow Dynamics (Supplement), pp.155-162, 1996.
- [5] H. M. Choi, T. Terauchi, H. Monji and G. Matsui, Visualization of Bubble-Fluid Interaction By a Moving Object-Flow Image Analyzer System, Annals New York Academy of Science, Vol.972, pp. 235-241, 2002..

表 3-1 ポンプの仕様

形式 MD-70RZM ((株) IWAKI)			
口径	最大吐出量	最高揚程	標準吐出量
吸込/吐出	L/min	m	m-L/min
G 3/4	40~43	14.3~20.3	12-24~17-25
取扱液の比重限界	モーター		製品質量
	電源 V	定格出力 W	kg
1.0	100, 200	180~216	6.0

表 3-2 電磁流量計の仕様

横河電機株式会社製
口径：15mm
励磁方式：
・二周波励磁：口径 2.5~400mm
出力信号：
・電力出力 1 点：4-20mA DC (負荷抵抗：ケーブルを含み最大 750Ω)
・パルス出力 1 点：
トランジスタ接点出力 (オープンコレクタ)
接点容量 30VDC(OFF),200mA(ON)
出力レート 0.0001~10000pps (パルス毎秒)
・アラーム出力 1 点：
トランジスタ接点出力 (オープンコレクタ)
接点容量 30V DC(OFF),200mA(ON)
・ステータス出力 2 点：
トランジスタ接点出力 (オープンコレクタ)
接点容量 30V DC(OFF),200mA(ON)
変換器材質：
ケースおよびカバー：アルミニウム合金
精度 (AXF 分離形検出器と組み合わせ)
PFA ライニング・セラミックス測定管：
・精度：0.15/Vs % of span Vs:スパン設定値(m/s)
正常作動条件
周囲温度：-40~60℃
注：・表示器動作範囲：-20~60℃
周囲湿度：0~100% ただし 95%以上の長期連続は不可

表 3-3 CCD カメラの仕様

形式 ES 1.0 (Kodak 社製) メモリ 1024 コマ

仕様レンズ	焦点距離 25 [mm]
フレームレート	30 [フレーム/s] (デュアルチャンネルモード)
空間解像度	100 万画素
データ転送速度	20 [MHz/チャンネル]

表 3-4 テレセントリックレンズの仕様

Edmund (オプティクス・ジャパン株式会社)

絞り距離	F6~25
作動距離	132~182mm
テレセントリック範囲	50mm
テレセントリシティ	<0.2°
実視野	49.2mm
ディストーション	<0.75%
被写体深度	±5mm
フィルターマウント	M105×P2.0
許容 CCD フォーマット	≤2/3"
外形寸法	Φ110×200mmL

表 3-5 代表的な流量条件での容器流入/流出速度

流量 Q (L/min)	入口流速 (cm/s)	出口流速 (m/s)
5	1.7	0.68
6	2.0	0.81
7	2.3	0.95

表 3-6 ステップ状に流量を変化させた場合の流量条件

流量変化幅 (L/min)	流量変化範囲 (L/min)	備考
1	5.5⇔6.5	増加/減少
2	5.0⇔7.0	増加/減少
3	4.5←7.5	減少のみ

表 3-7 正弦波状に流量変動を与えた場合の流量条件
平均流量 6 L/min

流量変化範囲 (L/min)	周期 (s)
5.5-6.5	10、15、20、400
5.0-7.0	10、15、20
4.5-7.5	10、15、20

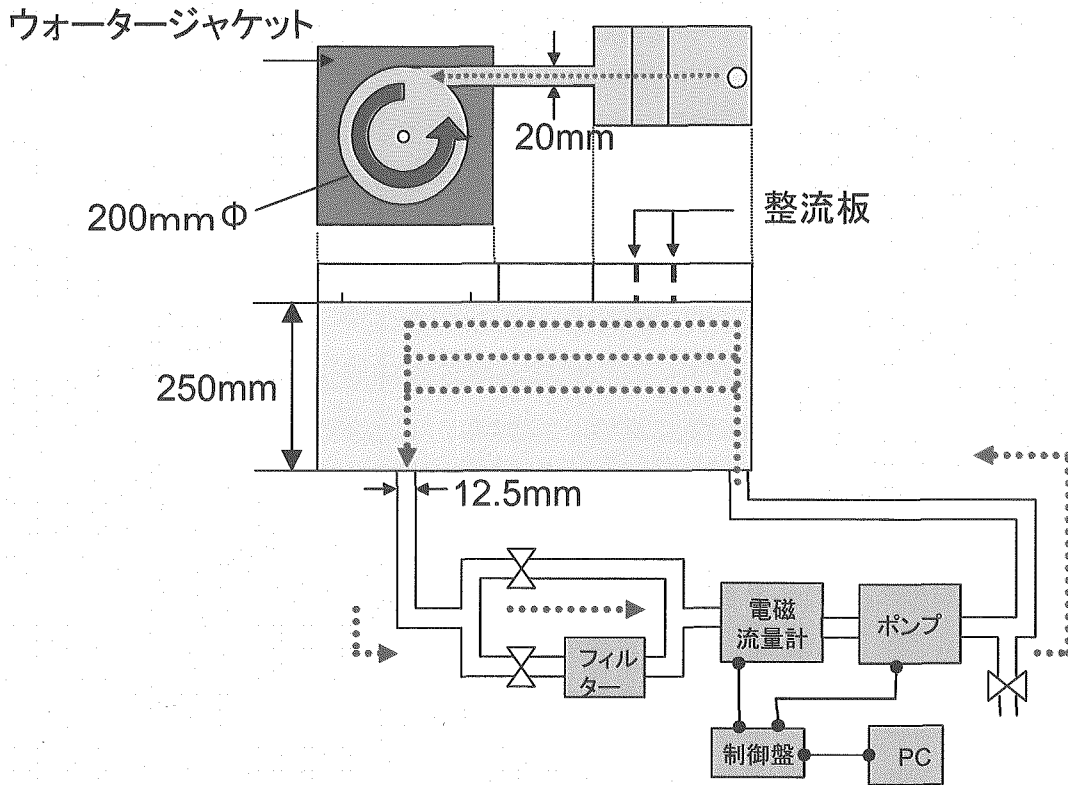


図3-1 実験装置概略

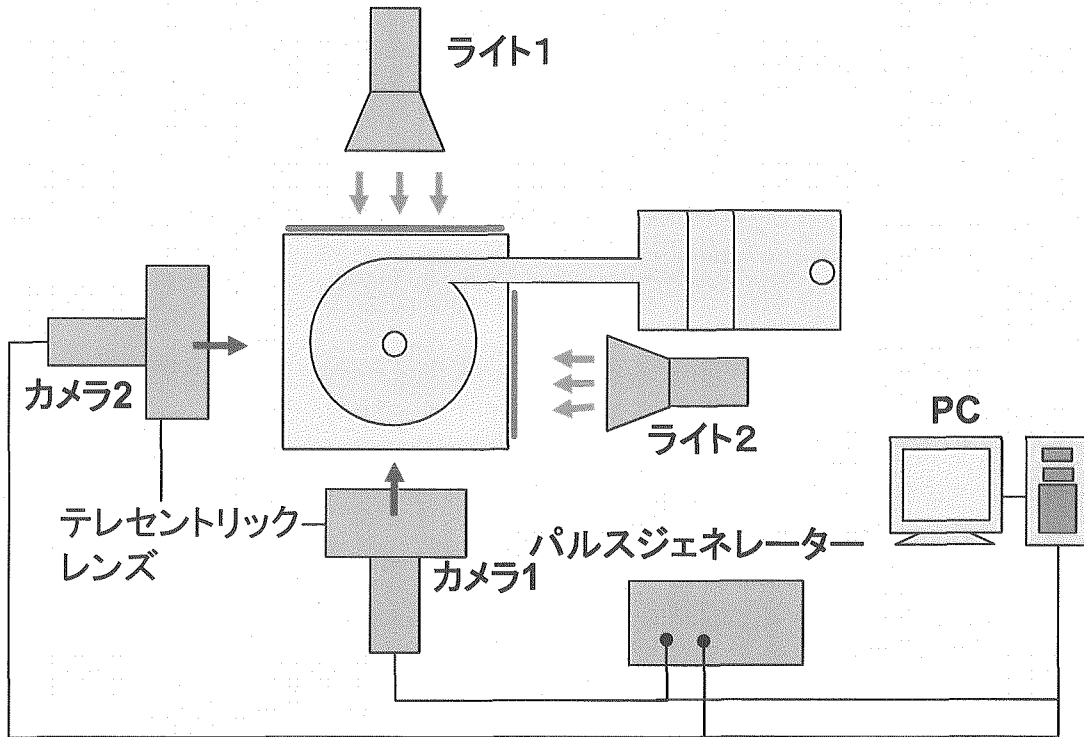


図3-2 ステレオ画像処理計測系

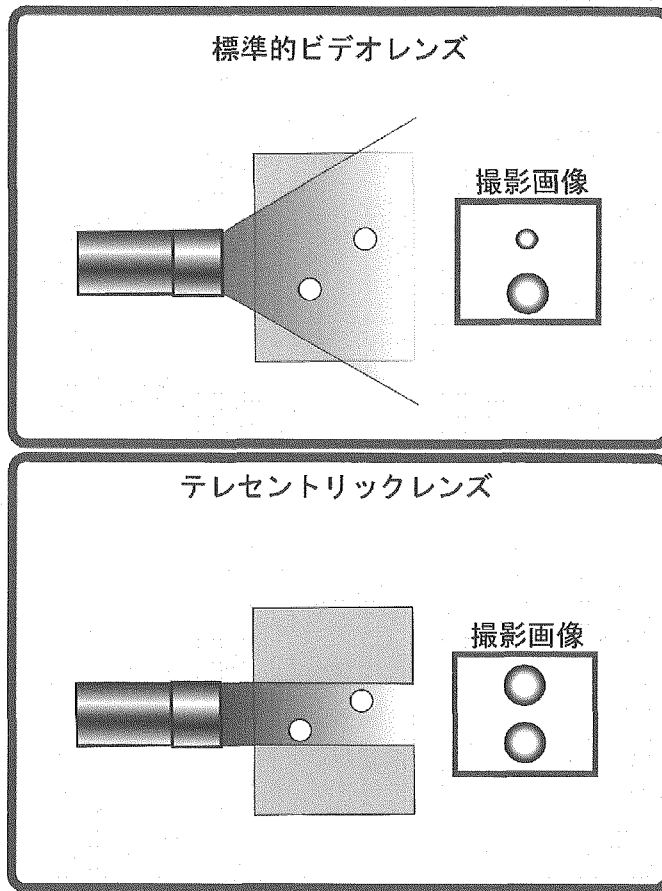
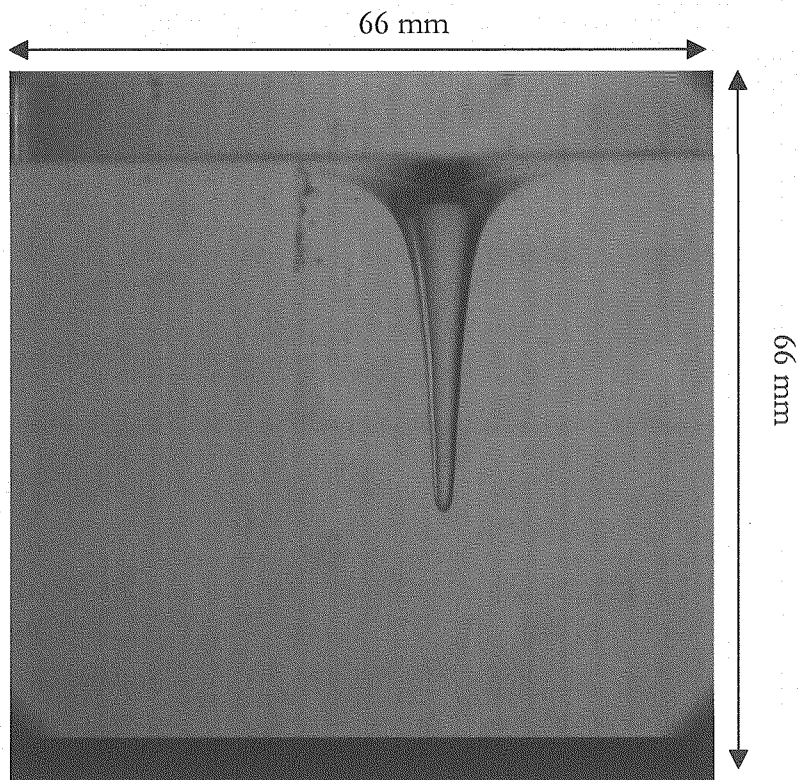
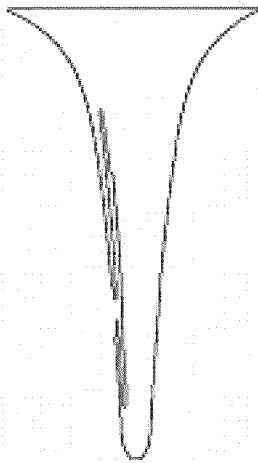


図3-3 テレセントリックレンズの特徴



(a) 撮影された渦の画像例



(b) 抽出された輪郭曲線

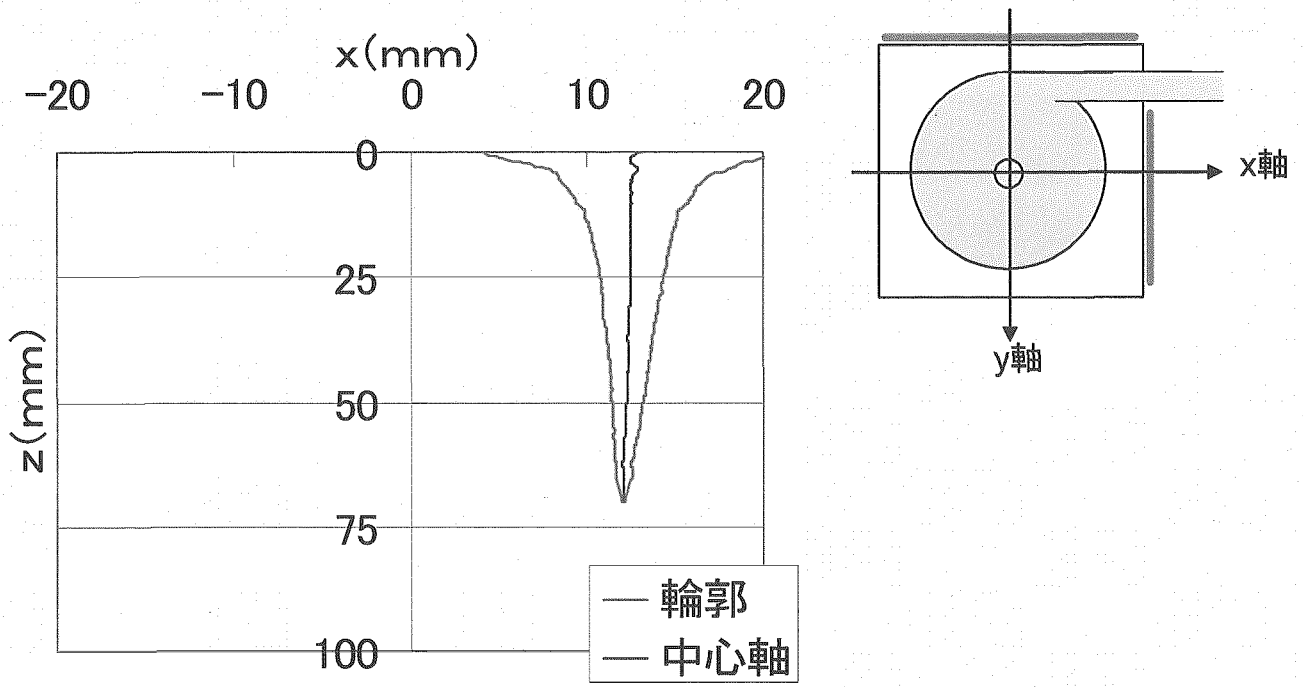
図 3-4 渦の撮影例と輪郭曲線

表 4-1 流入流量と定常旋回渦の長さ

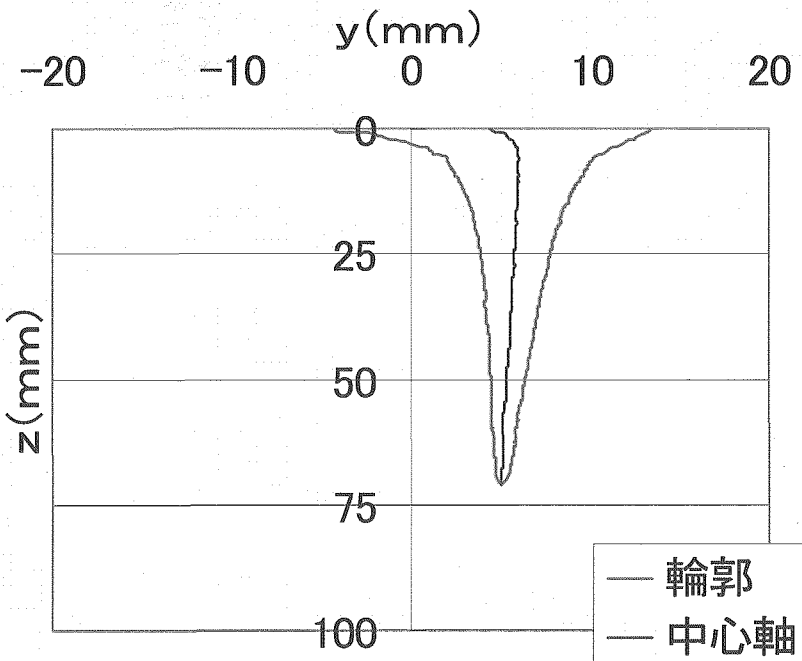
流量(L/min)	ガスコア長さ(mm)
4.5	4.5
5.0	6.3
5.5	7.9
6.0	14.0
6.5	21.9
7.0	36.3
7.5	53.2

表 4-2 ステップ状に流量を変化させた場合の過渡時間

流量変化幅 (L/min)	流量変化範囲 (L/min)	流量増加で定常 に達するまでの 時間(s)	流量減少で定常 に達するまでの 時間(s)
1	5.5⇔6.5	129	120
2	5.0⇔7.0	157	138
3	4.5←7.5	-	184

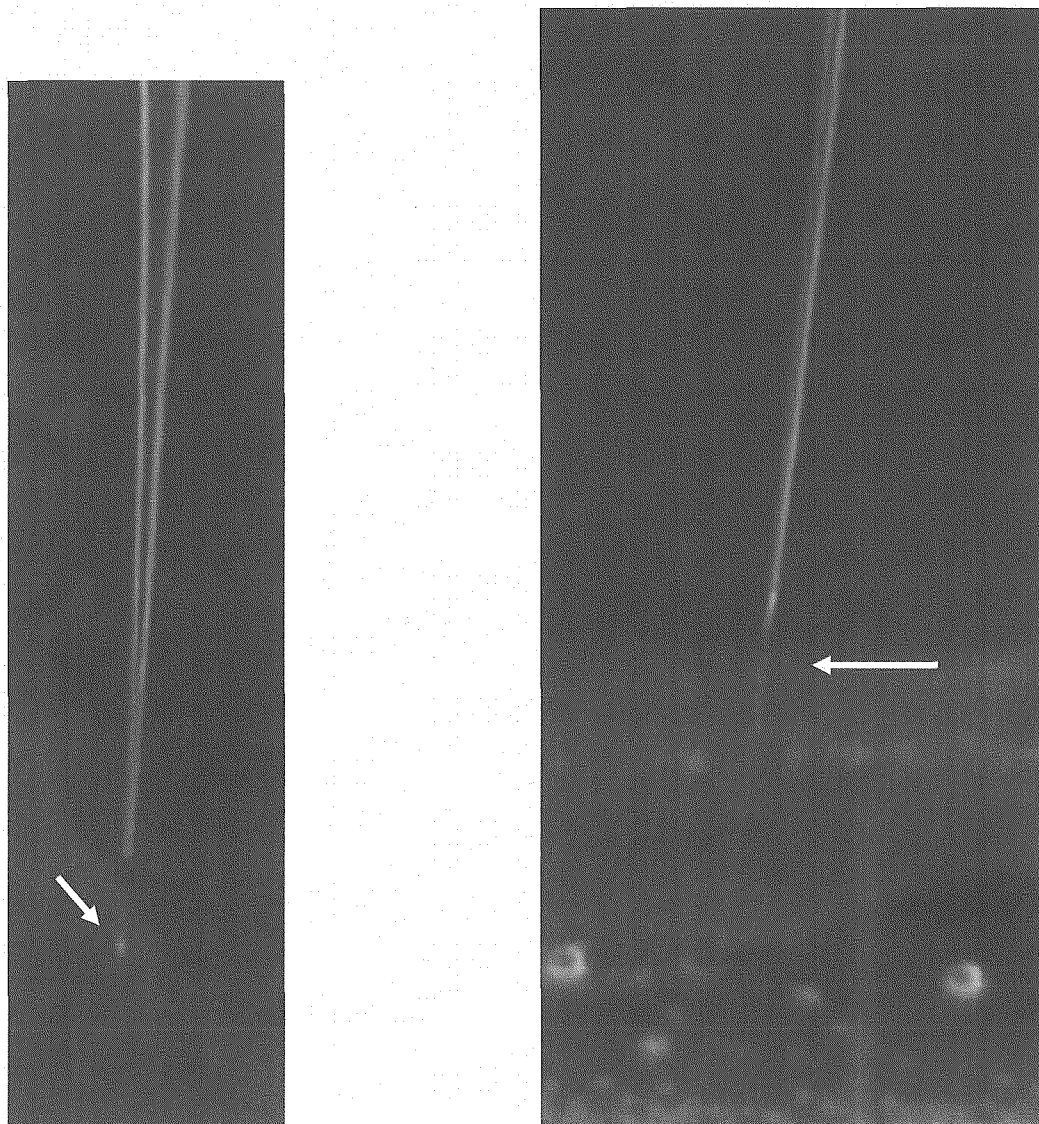


(a) カメラ 1 方向



(b) カメラ 2 方向

図 4 - 1 定常渦の形状 (7 L/min)



(a) 7.5 L/min
矢印は離脱気泡を示す。

(b) 8.0 L/min
矢印より下は気泡が連なり渦と
なった部分

図4-2 気泡の離脱と連なり

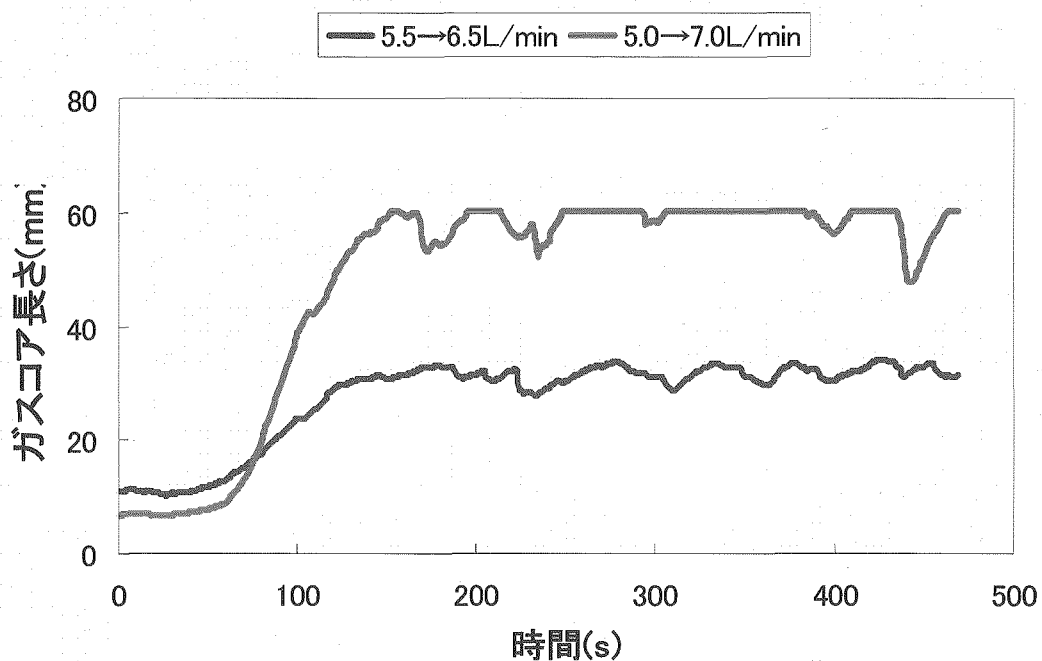


図4-3 ステップ状に流量を増加させた場合のガスコア長さの時間変化

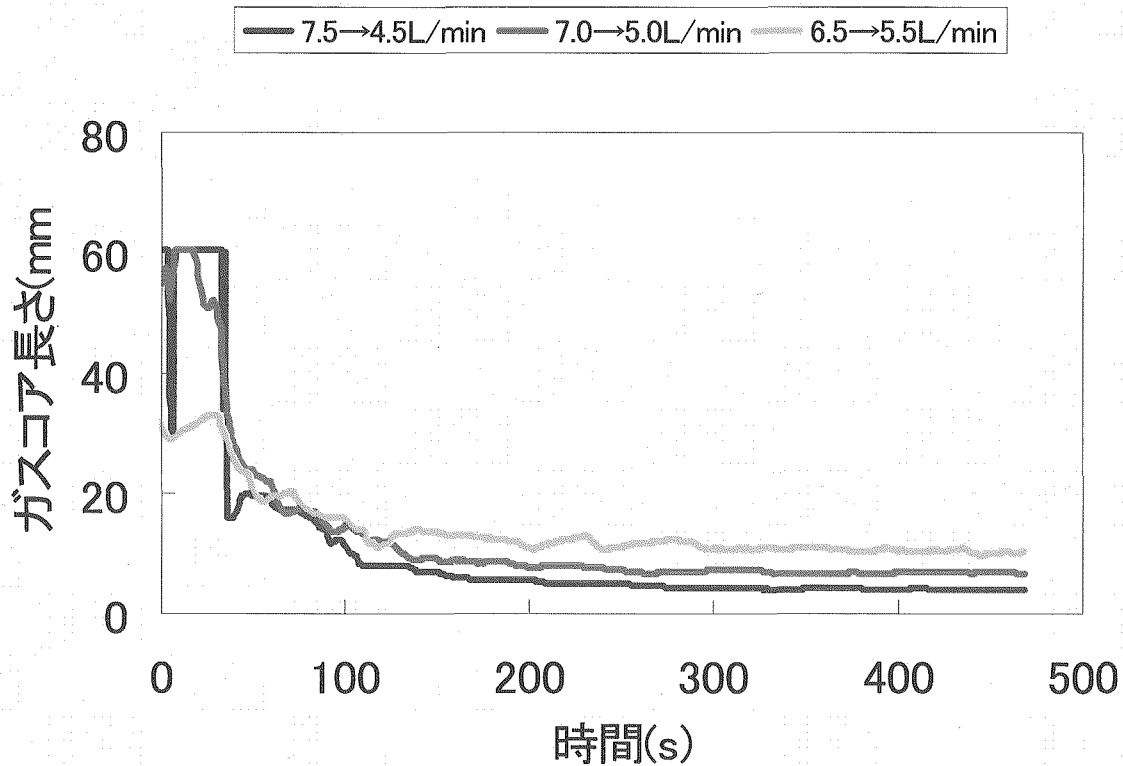


図4-4 ステップ状に流量を減少させた場合のガスコア長さの時間変化

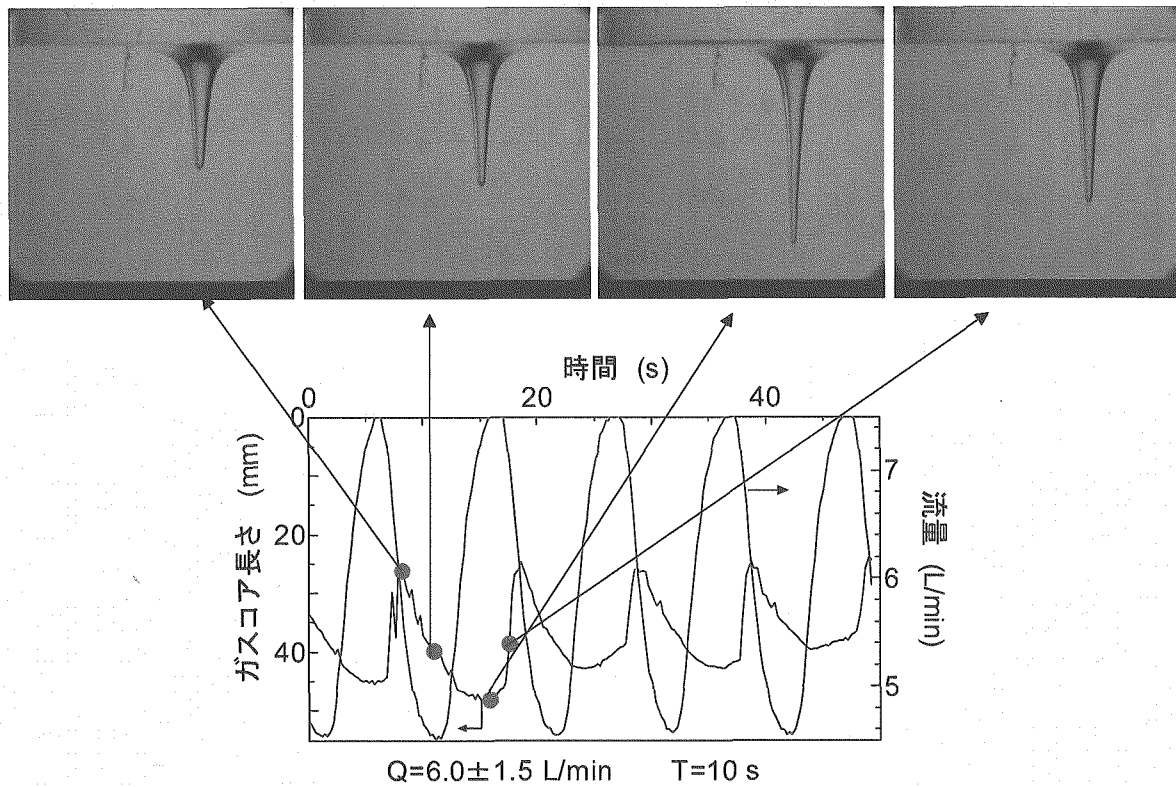
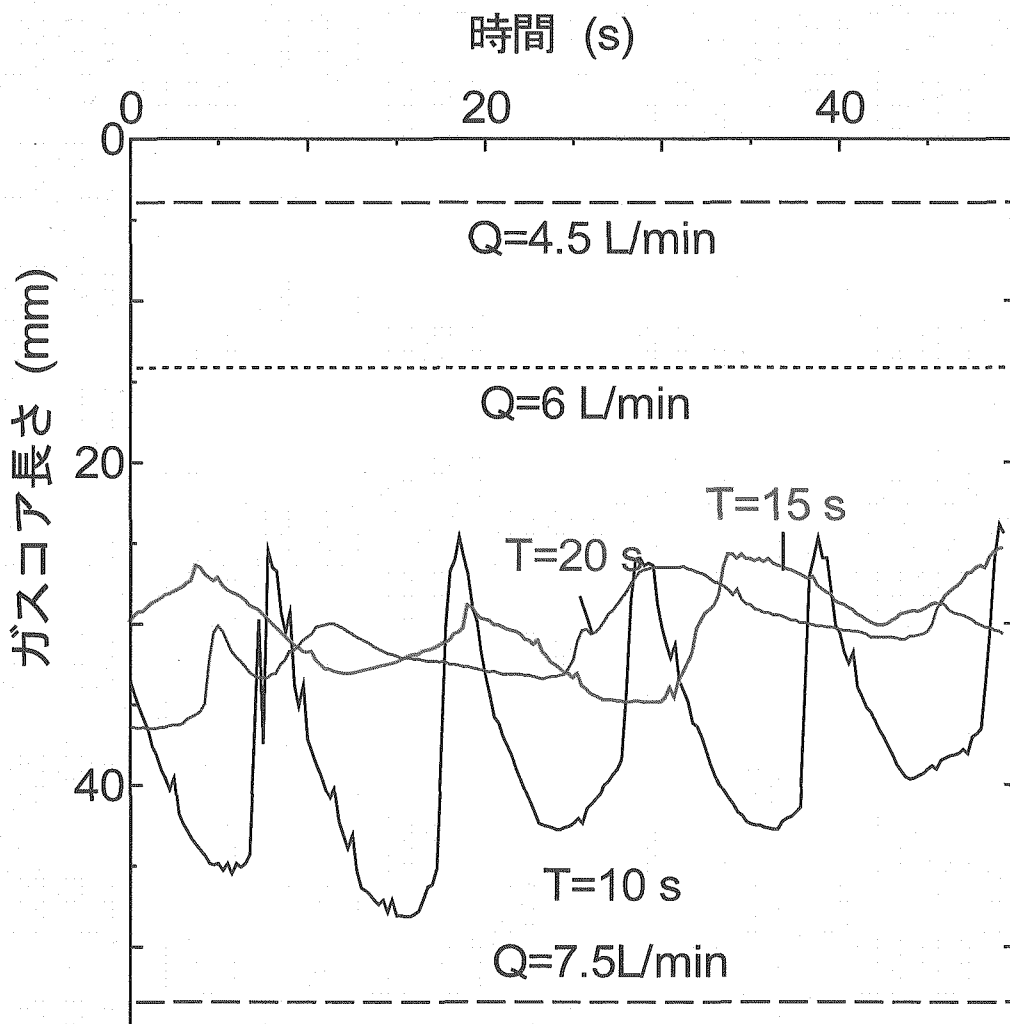


図 4-5 正弦波状流量変動を与えた場合のガスコアの形状と長さ



$Q=6 \pm 1.5$ L/min

図4-6 流量変動周期を変えた場合のガスコア長の比較
(平均流量 6 L/min, 最大流量 7.5 L/min, 最小流量 4.5 L/min)

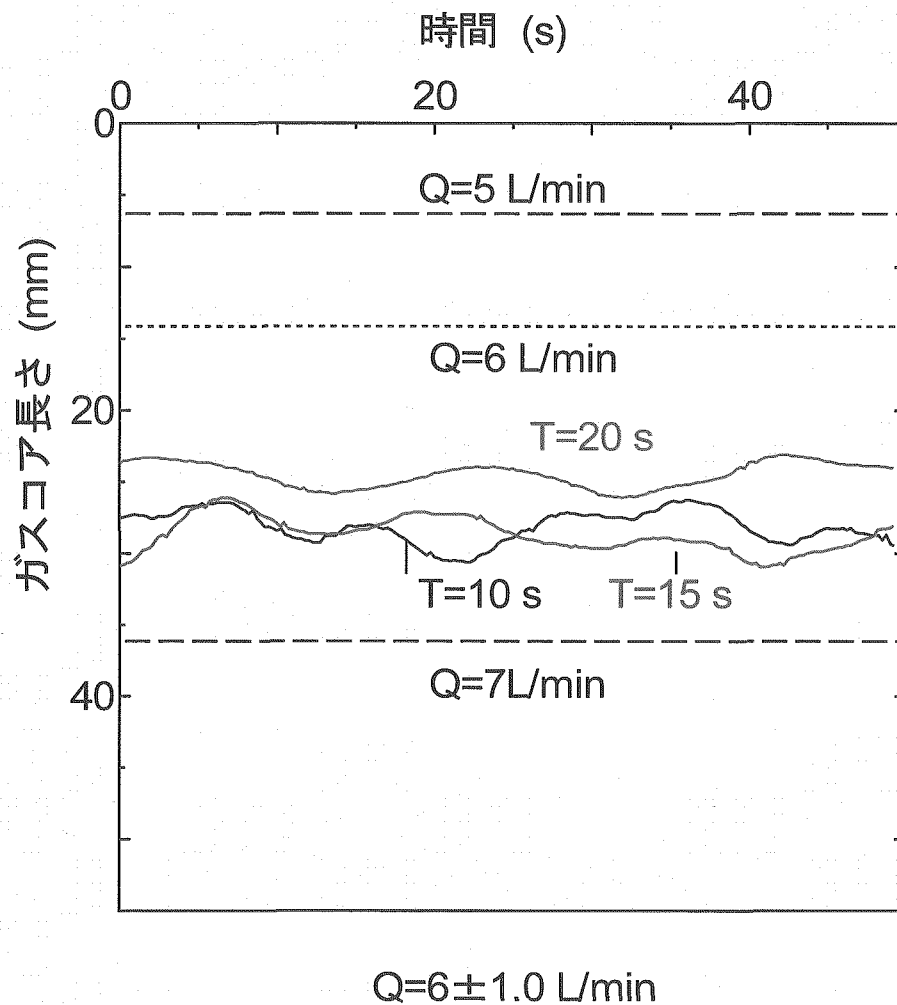


図4-7 流量変動周期を変えた場合のガスコア長の比較
(平均流量 6 L/min, 最大流量 7.0 L/min, 最小流量 5.0 L/min)

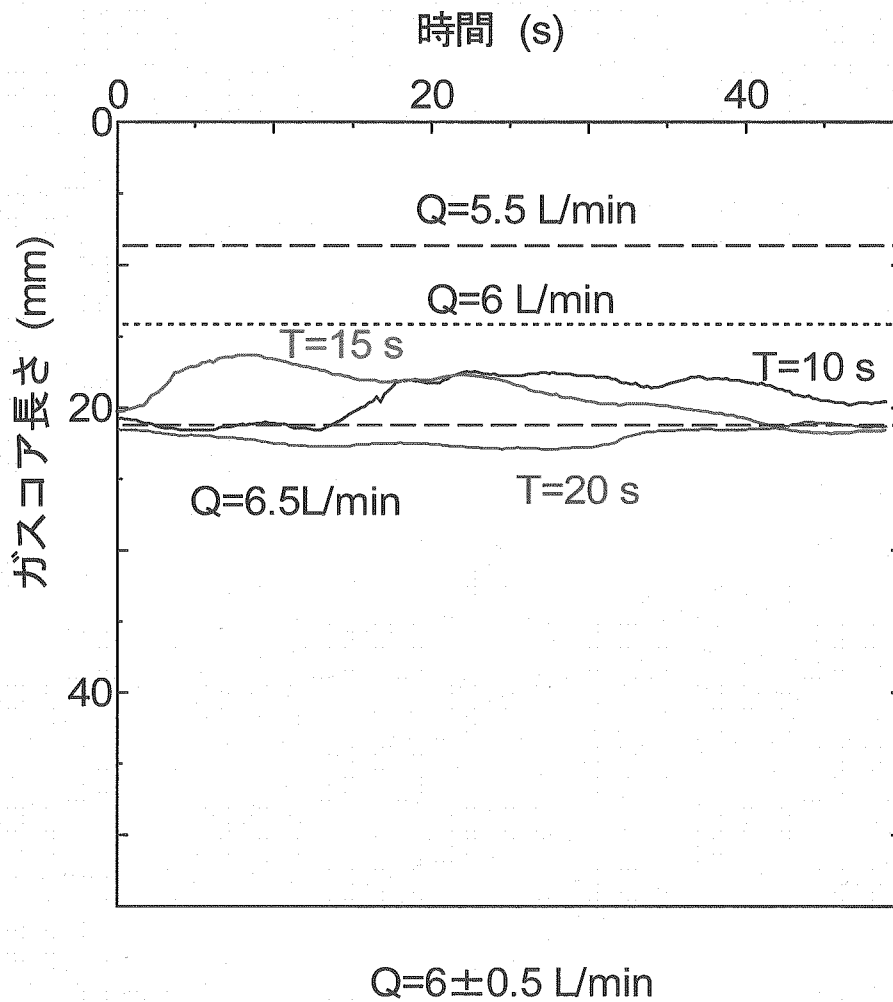


図4-8 流量変動周期を変えた場合のガスコア長の比較
(平均流量 6 L/min, 最大流量 6.5 L/min, 最小流量 5.5 L/min)

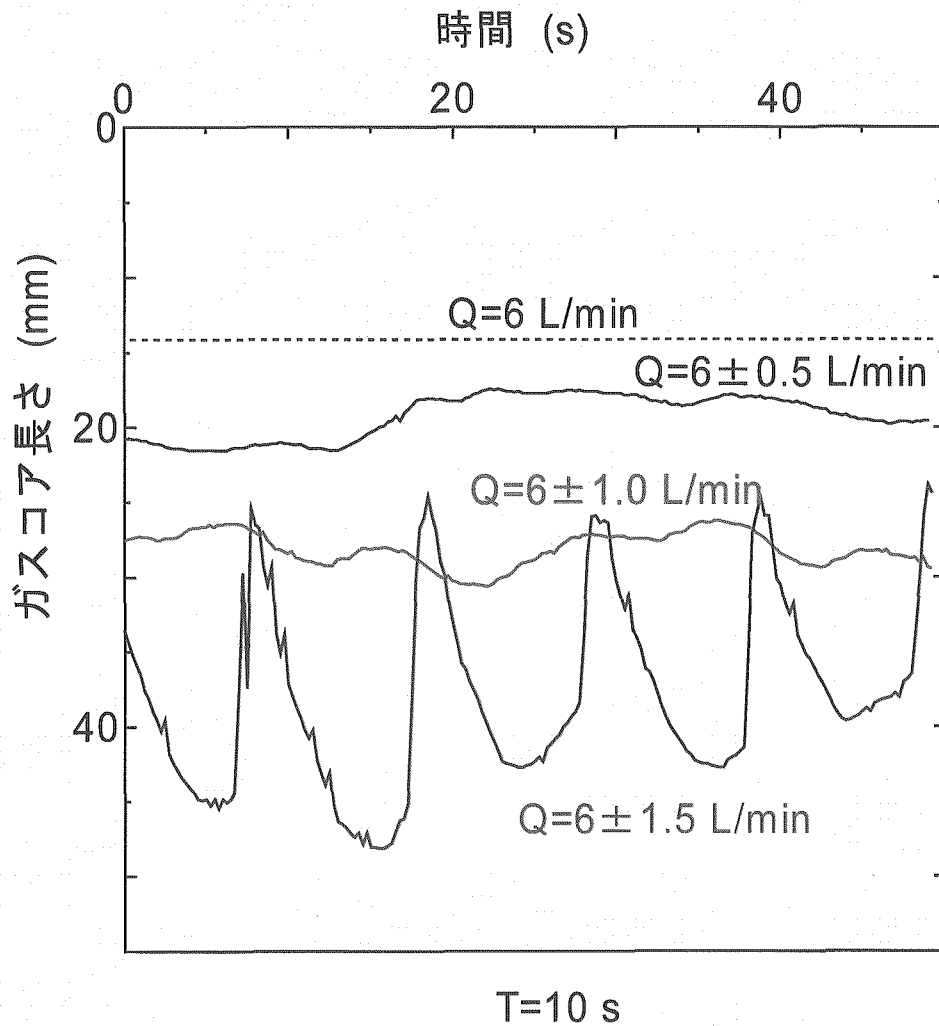


図4-9 流量変動周期を変えた場合のガスコア長の比較
(平均流量 6 L/min, 変動周期 T=10 s)

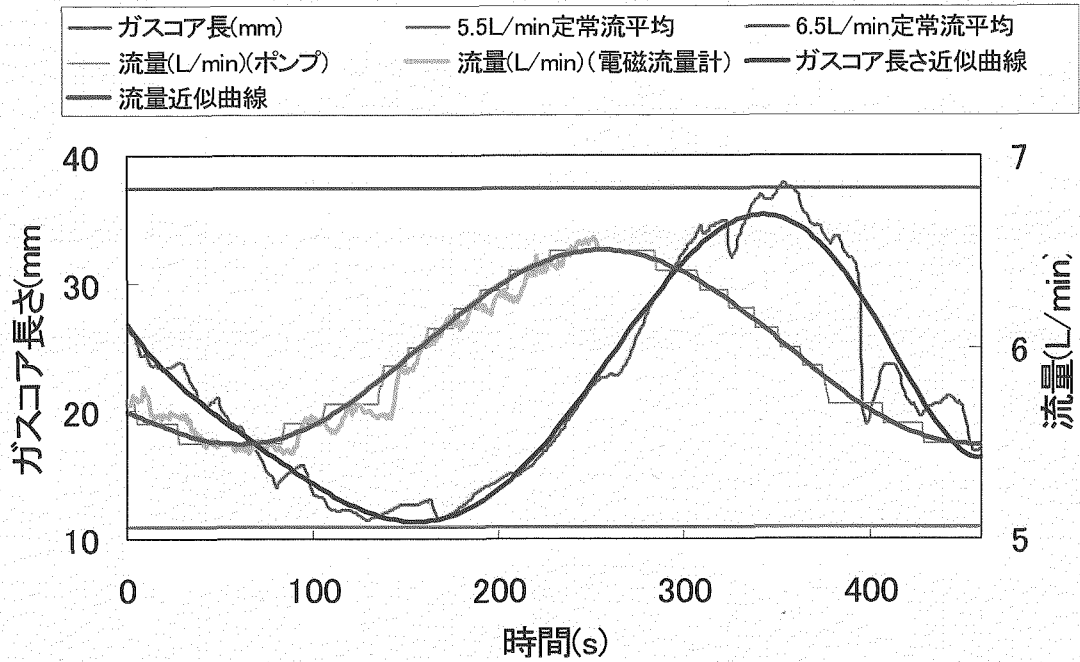


図4-10 長周期の流量変動を与えた場合のガスコア長さ変化
(周期 $T=400$ s, 平均流量 6 L/min, 最大流量 6.5 L/min, 最小流量 5.5 L/min)