



JAEA-Research

2006-067



JP0650662

## ガス巻きこみ現象に関する基礎的研究

—自由表面渦による非定常ガス巻き込み現象の評価—

Experimental Study of Gas Entrainment at Free Surface  
– Development of Circulation and Gas Core of Surface Vortex –

江連 俊樹 木村 暢之 小林 順 伊藤 真美\* 上出 英樹

Toshiki EZURE, Nobuyuki KIMURA, Jun KOBAYASHI  
Masami ITO\* and Hideki KAMIDE

次世代原子力システム研究開発部門  
機器開発グループ

Component and Fluid Engineering Group  
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

October 2006

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA  
Research

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)  
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター\*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

\* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5901

© Japan Atomic Energy Agency, 2006

ガス巻きこみ現象に関する基礎的研究  
-自由表面渦による非定常ガス巻き込み現象の評価-

日本原子力研究開発機構 次世代原子力システム研究開発部門  
FBR システムユニット  
江連 俊樹、木村 暁之、小林 順、伊藤 真美\*、上出 英樹

(2006年9月1日受理)

日本原子力研究開発機構では、FBR 実用化戦略調査研究において、ナトリウム冷却型大型炉を有力な炉型の一つとしてその設計研究を実施している。設計では、物量の削減により経済性を向上させるため、従来と比較してコンパクトな原子炉容器を検討している。炉容器のサイズに対して炉出力が上昇し炉容器内の流速が増加する一方で、炉上部プレナムに自由液面を有する構造となっているため、原子炉容器内でのカバーガスの巻き込みを防止することが設計上の重要課題となっている。このため、ガス巻き込み防止の判定基準の作成が進められている。

ガス巻き込みに関しては、くぼみ渦、潜り込み、碎波の3形態に大別できることが示されている。この内、くぼみ渦によるガス巻き込みに関しては、下降流速と循環の重要性が指摘されているが、その発生に対する定量的な評価手法や判定基準に関しては明確化されていないのが現状である。そこで、くぼみ渦によって発生するガス巻き込みに関して基礎的な実験体系を用いた水流動試験を実施した。ガス巻き込みの発生条件を評価する目的で、吸い込み管からの下降流速と試験体入口での水平流速を変化させ、渦の可視化試験を実施した。さらに、これまであまり検討されてこなかった渦の非定常性について基礎的な特性を把握するため、ガスコア周囲の流速分布の測定とガスコア長さの可視化計測を組み合わせた試験を実施した。

その結果、ガスコア長さと気泡の巻き込みに至る頻度との関係を明らかにすると共に、くぼみ渦が成長する過程で、まず循環が増加し、これに遅れてガスコア長さが成長する位相遅れがあることを見出した。

---

大洗研究開発センター(駐在)：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

\* 常陽産業(株)

Experimental Study of Gas Entrainment at Free Surface  
-Development of Circulation and Gas Core of Surface Vortex-

Toshiki EZURE, Nobuyuki KIMURA, Jun KOBAYASHI,  
Masami ITO<sup>\*</sup> and Hideki KAMIDE

FBR System Engineering Unit  
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate  
Japan Atomic Energy Agency  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received September 1, 2006)

A sodium cooled reactor is one of important candidates and has been investigated in the feasibility study of FBR cycle. In the study, a compact reactor vessel was designed in order to reduce the construction cost. However, the compact reactor vessel causes the higher velocity. In addition, there is a free surface in the reactor vessel. Accordingly, the cover gas entrainment from the free surface in the reactor vessel is one of the significant issues for the reactor design. It is required to clarify the criterion of gas entrainment at free surface to qualify the tolerance of gas entrainment in the design.

It was known that hydraulic phenomena inducing gas entrainment at the free surface could be categorized into following three types, wave break, submerged flow, surface vortex. However, there was no clear quantitative evaluation method and criteria regarding the onset condition of the gas entrainments by the surface vortex. In the present study, some visualization experiments were performed in the water-air system focusing on the gas entrainment by the surface vortex and its transient phenomena. The relationship between circulation and length of gas core during transient phenomena of the gas entrainment were also measured by the particle image velocimetry and visualization.

From the result of this study, the relationship between gas core length and probability of gas entrainment was clarified, and it was found that there was time-delay between the increase of circulation and the increase of gas core.

Keywords: Gas Entrainment, Surface Vortex, Particle Image Velocimetry, Innovative Sodium Cooled Fast Reactor.

---

\* Joyo Sangyo Industry Co. Ltd.

## 目次

1. 緒言 .....	1
2. ガス巻き込み特性基礎試験装置 .....	3
2.1 試験装置の概要 .....	3
2.2 計測手法 .....	4
2.2.1 可視化試験 .....	4
2.2.2 流速場測定試験 .....	5
2.3 試験条件 .....	6
2.3.1 可視化試験条件 .....	6
2.3.2 PIV 試験条件 .....	6
3. 剪断流条件下でのガス巻き込み試験結果 .....	7
3.1 ガス巻き込み影響因子の把握 .....	7
3.2 ガスコア長さの計測 .....	8
3.3 ガスコア長さと速度分布の同時計測結果 .....	8
4. 考察 .....	10
5. 結言 .....	13
謝辞 .....	14
参考文献 .....	14

## Contents

1. Introduction .....	1
2.Experiment .....	3
2.1 Overview of Experimental Apparatus .....	3
2.2 Experimental Method .....	4
2.2.1 Flow Visualization Measurement Method .....	4
2.2.2 PIV Measurement Method .....	5
2.3Experimental Condition .....	6
2.3.1 Flow Visualization Measurement Condition .....	6
2.3.2 PIV Measurement Method .....	6
3.Experimental Result .....	7
3.1 Onset Codition of Gas Entrainment .....	7
3.2 Evaluation of Gas Core Length .....	8
3.3 Results of PIV Experiment .....	8
4. Discussions .....	10
5. Conclusions .....	13
Acknowledgements .....	14
4References .....	14

## 表リスト

Table 2.1 ガス巻き込み影響因子の把握試験条件

Table 2.2 ガスコア長さの計測条件

Table 2.3 ガス巻き込み渦周囲の流速分布とガスコア長さの計測条件

Table 3.1 ガスコア長さの平均、最大ガスコア長さ(最大に発達した場合)、計測回数

## 図リスト

Fig. 2.1 ガス巻き込み基礎試験装置の概略

Fig. 2.2 ガス巻き込み基礎試験装置ループ図

Fig. 2.3 可視化試験時の機材配置

Fig. 2.4 流速分布—ガスコア同時計測セッティング

Fig. 2.5 流速分布—ガスコア同時計測時の機器動作のタイミングチャート

Fig. 2.6 ガス巻き込み発生条件と試験条件の関係

Fig. 3.1 染料による渦の可視化

Fig. 3.2 形態Ⅰ ガス巻き込み例

Fig. 3.3 形態Ⅱ ガス巻き込み例

Fig. 3.4 形態Ⅲ ガス巻き込み例

Fig. 3.5 ガス巻き込み発生時の流入流速と吸込み流速の関係

Fig. 3.6 ガスコア長さの計測結果 Case A

Fig. 3.7 ガスコア長さの計測結果 Case B

Fig. 3.8 ガスコア長さの計測結果 Case C

Fig. 3.9 ガスコア長さの計測結果 Case A-D

Fig. 3.10 速度分布-ガスコア同時計測結果 (ガス巻き込み発生, Case E)

Fig. 3.11 速度分布-ガスコア同時計測結果 (ガス巻き込み未発生, Case F)

Fig. 4.1 形態Ⅰ のガス巻き込み過渡変化

Fig. 4.2 形態Ⅱ のガス巻き込み過渡変化

Fig. 4.3 形態Ⅲ のガス巻き込み過渡変化

Fig. 4.4 渦中心の決定手法適用例

Fig. 4.5 循環-ガスコア長同時計測 1 (ガス巻き有り、液面下 1cm)

Fig. 4.6 循環-ガスコア長同時計測 2 (ガス巻き有り、液面下 1cm)

Fig. 4.7 循環-ガスコア長同時計測 3 (ガス巻き有り、液面下 5cm)

Fig. 4.8 循環-ガスコア長同時計測 4 (ガス巻き有り、液面下 5cm)

Fig. 4.9 循環-ガスコア長同時計測 5 (ガス巻き無し、液面下 1cm)

Fig. 4.10 循環-ガスコア長同時計測 6 (ガス巻き無し、液面下 5cm)

## 1. 緒言

日本原子力研究開発機構(原子力機構)では、高速炉を核とした核燃料サイクルの確立を目指しFBR実用化戦略調査研究を実施している[1]。同研究では、ナトリウム(Na)を冷却材とした高速炉が最も有力な候補として挙げられている。安全性を十分に確保した上で、将来の軽水炉と同等の経済性を有する炉とするため、日本原子力発電(株)が実施した実証炉設計研究[2]と比較して、システムを大幅に簡素化・コンパクト化した炉設計が検討されている。本設計のナトリウム冷却大型炉では、原子炉容器の径を実証炉設計と同等の10m程度しながらも、電気出力を約2.5倍(60万kWe級→150万kWe級)とするとともに、主冷却系ループ数を3ループから2ループに削減することを検討している。同時に、制御棒案内管や燃料集合体出口温度計装、それらの支持構造などからなる炉上部機構(UIS)に切り込みを設けることで、UIS内部に燃料交換機(FHM)のアームが進入できる構造とし、炉容器上部の燃料交換システムを簡素化することを検討している。

ループ数の削減や炉出力に対して炉容器径の相対的な大きさが小さくなつたことにより、炉容器上部プレナム内の流速が実証炉に比べて大幅に増加するとともに、UIS内部に切り込みを設けるため局所的にさらに流速の大きい領域が生じる可能性がある。一方、実証炉と同様に、炉容器上部デッキを低温に保つため、炉上部にはアルゴンのカバーガス空間が設けられており、炉上部プレナムは自由液面を有する構造となっている。すなわち、炉容器上部プレナム内のNaの高流速化と自由液面の存在により、液面でのカバーガスの巻き込み(ガス巻き込み)発生が懸念されている。Na高速炉において、Na中にカバーガスのガス巻き込みが発生し、巻込まれた気泡が大量に炉心を通過した場合、炉心特性の不安定要因となる可能性がある。そのため、これを防止することが重要課題となっている。設計では自由液面に到達する速い流れを遮断することを目的にして、液面下に水平の板(ディッププレートD/P)を置くこととしている。このガス巻き込み抑制の問題に対して、現設計の妥当性の確認と共に設計変更を含む設計の自由度を確保する観点から、ガス巻き込み抑制に関する一般的な評価方法を確立する必要がある。

Na冷却高速炉におけるガス巻き込みの既往の研究として、前述の実証炉を対象にいくつかの実験がなされている[3]~[8]。この中で、自由液面からのガス巻き込みは、1) 自由液面で波立ちが起こり、碎けることによって発生する「碎波」、2) 液面近傍の流れが斜め下に向かって流れ込む「潜り込み」、3) 自由液面で渦によるくぼみが発生し、そのくぼみが成長することによりガスを巻き込む「くぼみ渦」の3形態に大別できることが明らかにされている[3]。この中で、1)、2)のガス巻き込みは自由液面での表面流速を抑えることにより発生を抑制することが出来ると考えられており、炉設計上は炉容器上部プレナム内の水平流速を抑えることで抑制できると考えられる。一方、3)の「くぼみ渦」に関しては、比較的小さい表面流速においてもガス巻き込みが発生する可能性があることが示されており、詳細なメカニズムの解明が必要であると考えられる。

くぼみ渦によるガス巻き込みの影響因子としては、液位、水平方向流速(または局所的な循環)、下降流速等が検討されてきた。また、ガス巻き込み現象を模型縮尺試験や水試験により評価するために、スケール効果[3][4]、物性値の影響[5][6]が実験的に検討されてきた。スケール効果については、実機の設計の妥当性確認にあたっては、1/3縮尺以上の大型水試験によって最終確認する必要があるとされた。一方、物性値に関しては、概ね水試験によってガス巻き込みの発生を保守側に評価できることが明らかにされた。

くぼみ渦に関する実験としては、これまでに円筒形状の容器の接線方向に流体を流入させ、円柱中心下部に設置した下向き配管により流出させる体系での実験が主として行われてきた[7][8]。その場合、流入・流出流速と循環が一対一対応しており、渦の移動も無いため、定常的な渦によるガス巻き込みが発生するという特徴がある。一方、実機の炉容器上部プレナム部は構造が複雑であり、くぼみ渦が移動するとともに非定常にガス巻き込みが発生すると考えられる。この場合、円筒体系と異なり、炉内の局所的な循環量と下降流速、水平流速等の代表流速は必ずしも一対一に対応していないと考えられる。すなわち、円筒体系では現象を十分に模擬できていないことが考えられる。このため、特に、非定常挙動を示すくぼみ渦について渦の成長減衰挙動を調査し、ガス巻き込み渦の成長条件を評価する必要がある。

原子力機構では、Na大型炉におけるガス巻き込み評価に関して、1/10縮尺炉上部プレナム試験[9]

と 1/1.8 縮尺液面部分モデル試験[10][11]を実施している。前者では、炉内構造物の配置等をパラメータとして、炉内流速分布の適正化を図るとともに、現設計で検討されている D/P による自由液面近傍の流速低減効果を確認した。また、1/1.8 縮尺液面部分モデル試験により、実機定格相当条件でガス巻き込みが防止できる見通しが得られた。一方、ガス巻き込みが発生する可能性がある場所としては、大まかに 2 つの領域があることが明らかになった。第一の領域として、炉容器上部プレナム部での水平方向の流れがホットレグと衝突する領域が指摘されている。炉容器上部プレナム部での水平方向の流れは、炉心からの上昇流が UIS 切込み部分やディッププレートの隙間部分を通過し、ホットレグ配管廻りでディッププレートの隙間を通り下降することから発生する[9]。このホットレグ配管前縁部でのガス巻き込みは、速い水平流れ(実機で予想される流速の 3m 倍以上)が構造物に衝突することにより下降流が発生することでガス巻き込みに至ることが、明らかにされている[11]。すなわち、ホットレグ配管の前縁部でのガス巻き込みは炉容器上部プレナム内の水平流速が支配的な因子であり、大きな水平方向流速を必要とするため、碎波、潜り込みと同様の考え方方に立ち、水平流速を抑えることで防止できると考えられる。第二の領域としては、ホットレグ配管と炉容器壁との隙間部分が指摘されている。ホットレグ配管と炉容器壁の隙間部でのガス巻き込みは比較的低液位で下降流速が大きい場合に発生しやすいことがわかっているものの[10]、その因果関係を含むメカニズムについては、未だ十分に明らかにされていない。そこで本研究では、フローパターンに応じて循環が過渡的に変化する流れ場でガス巻き込みを発生させ、ホットレグ配管と炉容器壁の隙間部で見られたような比較的低液位で下降流速が大きい流れ場でのガス巻き込みを対象として、現象のメカニズムを検討する基礎的な試験を実施した。

本研究の目的は以下の 3 点である。

- 1) 比較的低液位で下降流速が大きい流れ場でのガス巻き込みについて、影響因子を把握する。
- 2) ガス巻き込み発生の限界条件を把握する観点でガス巻き込み発生時のガスコア長さを評価する。
- 3) 非定常な渦が発生する体系での渦の成長メカニズムを把握する。

## 2. ガス巻き込み特性基礎試験装置

1/1.8 液面部分モデル試験において、ホットレグ配管と炉容器壁の隙間部で見られたガス巻き込みに着目し、せん断による渦の発生と下降流を伴う体系において発生するガス巻き込み現象について、基礎的な特性を把握するための試験装置の概要と計測に用いた手法の概要を以下に示す。

### 2.1 試験装置の概要

1/1.8 縮尺液面部分モデル試験では、ガス巻き込みが発生し易い場所として、低液位時のホットレグ配管と炉容器壁面の隙間部分が挙げられている。ホットレグ配管と炉容器壁との隙間部分は、ホットレグを回り込んでくる速い流れが、炉容器壁面に沿って流れ込み、ホットレグ配管近傍に存在する淀んだ領域に流入することが確認されている。淀んだ領域に対して、速い流れが流入することにより、水平方向の剪断が生じ、水平渦が発生しやすい流れ場となっている。さらに、炉容器壁や、ホットレグ配管とディッププレートの間には隙間が存在し、これらの隙間部分から下降流速が発生している。このような、流れがすれ違うことによって剪断が常に存在し、速い下降流速が存在する流れ場の典型として、キャビティ的流れ場を作り、キャビティ流れを駆動する水平方向の流速と吸込み管からの下降流速を独立に制御する、水を作動流体とした基礎試験装置を作成し、そこでガス巻き込み現象の計測を実施した。

Fig. 2.1 に試験装置の概略図を示す。試験体は、アクリル製の試験流路(図中点線部)と、SUS 製の流入出流路からなる。

アクリル製の試験流路(図中点線部)は長さ 1000mm × 奥行き 300mm × 高さ 650mm の上部開放の矩形容器である。試験流路はアクリル製の中板が取り付けられており、上下に 2 分割された二重底構造なっている。これは、試験流路に下降流速を与えるために取り付ける吸込み配管がレーザーによる可視化計測の妨げとなることを防ぐためである。これにより、試験流路の底面、側面、上面のいずれからも可視化することが可能となっている。中板は上面が、試験流路の底面から 100mm 上方となるように設置されている。中板によって隔てられた二重底上側が試験部であり、下側が試験部から流出した流体が通過するためのプレナム部となっている。ガス巻き込み観察は二重底の上側の試験部(長さ 1000mm × 奥行き 300mm × 高さ 550mm) で行う。この試験部の(図中)右側から作動流体が流入し、左側へと流出する構造となっている。さらに、中板の中心には、内径 50mm、高さ 100mm の吸込み管が取り付けられている。この吸込み管から発生した下降流速によって、ガス巻き込みを発生させる。吸込み管は、配管内の流動場を計測する場合の、屈折の影響を緩和するため、配管側面の 4箇所(試験流路に平行に 2箇所、垂直に 2箇所)を 10mm 幅でフラット加工されている。吸込み管から吸い込まれた流体は二重底の下側のプレナム部分へ流出し、プレナム内で 2 手に分かれて、プレナムの側面に取り付けられた流出配管から流出する。試験部は鉛直に立てられた仕切板によって 2 つの流路に分割されている。作動流体は試験部の右側から流入し、左側へと流出する。流入、流出するのは 2 分割された流路の手前側(図中)のみであり、奥側の流路は流路の両端が閉止されて、淀んだ領域となっている。また、吸込み管を中心とした 38cm の領域は仕切り板の無い領域となっている。この奥側の領域は手前側の流路が水平方向流れを有しているのに対し淀んだ領域となっており、キャビティ的流れ場を作り出している。このキャビティ部分において、キャビティ内部の淀んだ状態にある流体と手前側の流路から流入する流体とで剪断を生じる構造となっており、吸い込み配管からの下降流と水平方向流れとの関係によりガス巻き込みを発生させる。

SUS 製の流入出流路(破線部以外)は Fig. 2.1 に示すとおり、試験体の両側に取り付けられている。流入出流路も二分割されているが、試験流路の手前側の流路(二重底上側)に接続されている部分のみを使用して試験を実施した。流入流路は試験体の右側(図中)に取り付けられており、幅 450mm の流路を 150mm まで縮流させ、アクリル製の試験流路に接続されている。流入流路には流入配管が取り付けられており、作動流体が流入流路へと流入する。流入流路へ流入した流体は、噴流抑制板にて液面の揺動が抑制されると共に、3 段の金属メッシュにより整流された後、試験流路に流入する。一方、流出流路は試験体の左側(図中)に取り付けられており、試験流路手前側と同様に幅 150mm(R 部は最短 150mm)の流路となっている。流出流路には流出配管が取り付けられており、作動流体が試験体から流出する。

以上に述べたとおり、流体は(アクリル製)試験流路に対し、右側から流入し試験流路内部で分かれ、一部は試験流路の中板に取り付けられた吸い込み管から流出し、残りは試験流路左側へと流出する試験体系となっている。また、試験流路の上部は、大気開放となっており、水-空気系となっている。なお、試験パラメータは以下の通りに定義した。

- ・ 流入流速： 試験体流入流路(縮流後)の断面平均流速
- ・ 流出流速： 試験体流出流路(R部以前)の断面平均流速
- ・ 吸込み流速： 試験体吸い込み管の断面平均流速
- ・ 液位： 中底上面から液面までの距離

本試験装置におけるループ構成の概略を Fig. 2.2 に示す。ループは試験体とポンプ(最大吐出量  $80\text{m}^3/\text{h}$ )、各配管用流量調節弁、電磁流量計等で構成されている。ポンプ吐出側から流出した流体が、フィルタのバイパス部を経て、試験体に流入する。試験体からは、吸い込み管と流出配管の2系統で流出し、各流量調節用バルブを経て合流後、ストレーナを通り、ポンプに戻る。試験体最大液位時(50cm)でのループの全容量は約  $1.2\text{m}^3$  である。なお、今回の試験では、ポンプ吐出流量が  $0\sim40\text{m}^3/\text{h}$  の範囲で試験を実施した。なお、本試験で使用した流量計の精度は  $\pm 0.40\text{m}^3/\text{h}$  以内である。

今回の試験においては、仕切板によって流路を2分割した体系にて試験を実施したが、仕切板を取り除くことにより、せん断により渦が発生するなどの循環を生成する構造を持たない試験体系でのガス巻き込みに関する試験を行うことができる。

## 2.2 計測手法

本試験では、ガス巻き込み発生に対する影響因子の把握、ガスコア長さの評価、非定常な渦が発生する体系での渦の成長メカニズムを把握することを目的としている。そこで、水平方向の流速と下降流速を変化させた試験を実施し、発生したガス巻き込みを可視化することで、ガス巻き込み影響因子の把握と発生時の渦によるくぼみの深さ(ガスコア長さ)を調べた。また、循環の成長とガスコア長の成長の時間変化とそれらの関係を明らかにすることを目的として、渦周りの速度場とガスコア長さの同時計測を試みた。

### 2.2.1 可視化試験

#### (1) 影響因子の把握試験

はじめに、本試験装置にて発生するガス巻き込みへの影響因子を把握する目的で、可視化試験を実施した。ガス巻き込みの発生条件を調べるため、水平方向の流出流速を固定した後、吸い込み管による吸い込み流速を全流量の許す範囲で変化させ、ガス巻き込みの発生する吸い込み流速を計測した(詳細な条件については 2.3.1 項で述べる)。条件変更等によるヒステリシスの影響を緩和する目的で、条件設定後 5 分間で予備的なガス巻き込みの判定を行い、発生した場合は 10 分間の可視化計測へと移行した。ガス巻き込みの判定は、守屋ら[7]が用いた方法と同様に目視によって判定し、渦コアから気泡(目視で判断可能なサイズ: 例えば 1mm 以上)が離脱した場合にガス巻き込みが発生したと判断した。目視による判定と同時に、デジタルビデオカメラを用いて渦の可視化撮影を実施した。照明は、渦の表面での光のハレーションを抑制する目的で、Fig. 2.3 に示す通り試験体の後方に白熱灯のランプを設置し、試験体とランプとの間に光を拡散させるための紙(トレーシングペーパー)を挿入し、バックライト照明を行った。

#### (2) ガスコア長さの計測試験

ガス巻き込みの判定手法を構築する上で、ガス巻き込み時のガスコア長さを知ることは極めて重要であると考えられる。そこで、ガス巻き込み発生時の渦の様子を連続画像で捉え、画像処理によってガスコア長さを算出することによって、ガス巻き込み発生時の最大ガスコア長さの計測を実施した。渦の計測回数は、基本となる Case A は 60 回、他のケースに関しては 30 回の渦の計測を行った。

渦の連続画像は(1)で述べた、影響因子の把握試験可視化試験時と同様の機材配置によって撮影した。同様に、照明についても白熱灯によるバックライト照明を用いた。カメラは空間解像度  $648\text{Pixel} \times 482\text{Pixel}$  デジタルカメラ(プログレッシブスキャン)を使用した。計測時間は、本試験装置において

て発生する渦の生成、消滅時間を考慮して、20Hzで40秒間とした。また、収録時はガス巻き込み渦が生成し、消滅した時点でエンドトリガを入力することにより収録を行った。これにより、トリガ投入前の約40秒間のガス巻き込み渦の画像をPCに取り込んだ。本試験装置において対象としているガス巻き込み現象は非定常であり、試験条件をガス巻き込みが発生する条件に固定した状態であっても、くぼみ渦は生成と消滅を繰り返す。そのため、くぼみ渦のガスコア長の計測は、データの偏りを排除する目的で、くぼみ渦が目視によって確認された（くぼみ深さ約1cm以上）場合についてガス巻き込みの有無によらず収録し、所定の収録回数に到達するまで収録することとした。

今回、計測に使用した画角は計測領域の中心(吸込み管の奥面)で324×241mmであり、1画素あたりの大きさは0.2mmである。光学系がテレセントリック光学系でないため、撮影面までの距離により画角が異なる。渦が前後に動くことによって発生する不確かさは、計測されたガスコア長さに対して、2.5%以内である。

## 2.2.2 流速場測定試験

ガス巻き込みは非定常な現象であり、その時間的な発達、減衰過程を把握することは、ガス巻き込み現象を評価する上で重要である。本試験においては、ガス巻き込み渦の時間的発達を明らかにするために、ガスコア長さとガスコア周囲での速度分布の同時刻計測を実施した。

### (1) ガスコア長さと速度分布の同時刻計測方法

ガスコア周囲での速度分布とガスコア長さの同時刻計測は、粒子画像流速計測法(PIV[12])と空間解像度 648Pixel×482Pixel のデジタルビデオカメラ(プログレッシブスキャン)を用いた渦コアの可視化を組み合わせることによって実施した。PIVは非接触の流速測定が可能であり、平面内の流速分布を得ることが出来る計測手法である。くぼみ渦によるガス巻き込みは、流体中の渦が成長することにより発生するため、内部の流れ場に干渉しない非接触の手法が望ましい。さらに、発生する渦の位置が非定常に移動するため、点計測ではなく平面で計測できる方が有利と考えられる。以上の理由から、本計測においてはガスコア周囲での速度分布の計測にPIV計測を適用した。PIVによる流速場の計測断面は液面下1cmと5cmの2断面とした。一方、ガスコア長さは2.2項で述べた可視化試験と同様に、ガスコアのデジタルカメラ撮影によって得られた連続画像を画像処理することにより計測した。

Fig. 2.4 に計測時の機器の配置を示す。試験体の側面よりレーザーを射出し、試験体の下側から、デジタルカメラによって流れに乗ったトレーサー粒子の画像を収録することによってPIV計測を行った。計測に使用したレーザー光源はNd-YAG レーザー(波長: 532nm)である。照明された流体中の粒子の連続画像は、空間解像度 1008Pixel×1018Pixel のデジタルカメラによって撮影した。粒子画像を撮影する領域は88mm×89mmとした。速度ベクトルは、短い時間間隔で2枚のトレーサー粒子画像のペアを収録し、画像同士の相互相關処理から求めた。ペアとなる2枚の粒子画像の時間間隔は5msとした。相互相關処理では、1枚目の画像中の、ある24×24Pixelの参照領域に対して、2枚目の画像中で相関値が最大値となる24×24Pixelの領域を求め、その移動量からトレーサー粒子群の移動距離を算出し、画像間の時間間隔で割ることで速度を算出した。そのため、速度ベクトルの空間解像度は2.1mmである。なお、速度ベクトル計算点の間隔は、参照領域の周囲に2Pixel分の重なりを持たせ、20Pixel間隔(0.17mm)で算出した。また、速度分布のサンプリング速度(ペア画像と次のペア画像の収録間隔)は0.1sとした。一方、ガスコアの可視化計測は、試験体に対して、レーザー射出側にデジタルビデオカメラを配置し、反対側の側面にトロボライト(最大発光周波数: 1kHz)を設置し、バックライト照明で計測を行った。可視化用デジタルビデオカメラの画角は140mm×104mmとした。ストロボライトの光は、PIV計測に対してはノイズとなるため、同時刻での露光は避ける必要がある。そこで、PIVの計測カメラのフレーム間の不感時間内にストロボを連続発光させることで、2種類の光源からの光を同一のカメラが取り込むことを防止した。Fig. 2.5に実際の計測時に使用したタイミングチャートを示す。PIV用デジタルカメラの偶数フレームと奇数フレーム間の不感時間を利用して、30msの間ストロボライトを1kHzで発光させ、照明を行った。収録時は2.2項に示したガスコア長さの計測時と同様に、ガス巻き込み渦が生成し、消滅した時点でエンドトリガを入力し、トリガ投入前の38秒間のガス巻き込み渦の画像とトレーサーの粒子画

像を計測した。

## (2) 複雑界面を含む流れ場での流速計測

ガス巻き込み発生時の気液界面のように、複雑な形状をした物質境界面をレーザー光等により可視化しようとする場合、気液界面での光の乱反射が問題になる。この場合、乱反射によるハーリングによって、界面付近での正確な粒子画像や界面画像が得られなくなるだけでなく、反射したレーザー光が直接的にカメラに入射するために、カメラの受光素子を焼損する危険がある。このため、本試験では、トレーサー粒子として蛍光粒子を使用した。トレーサーの色素を、レーザー光によって励起し、励起された蛍光波長のみを計測することとした。一方、本来のレーザー光の波長は、特定の波長のみを反射、吸収するフィルタ(ノッチフィルタ)によってカットした。気液界面による乱反射はレーザー光本来の波長であり、フィルタによってカットされるため、トレーサー粒子のみを画像として収録することができる。以上により、界面での光の乱反射の影響を抑制した。

## 2.3 試験条件

### 2.3.1 可視化試験条件

#### (1) 影響因子の把握試験条件

Table 2.1 に影響因子の把握試験の試験条件を示す。流入流量はポンプ吐出流量から 0~40m<sup>3</sup>/h (液位 40cm の場合、流入流速が 0~18.5cm/s) の範囲で試験を実施した。本試験では、ガス巻き込みに対する影響因子として、液位、水平方向流速、下降流速について検討することとした。液位については 40cm と 25cm の 2 ケースについて実施した。水平方向流速と下降流速は、本試験装置ではそれぞれ流入流速と吸込み流速を対応するパラメータと考えて試験を実施した。ただし、本試験装置では流入流速は吸込み流速の増加に伴って増加するため、流入流速と吸込み流速は 1 対 1 の対応ではないものの、独立に制御することは出来ない。そこで、2.2.1 項で述べたとおり、試験を実施するに当たっては吸込み流速と独立な制御が可能な流出流速を試験パラメータとして設定し試験を実施した。その上で、水平流速の評価時には流入流速によって評価をすることとした。流出流速は 3cm/s 以上について試験を行った。吸込み流速については流出流速を Table 2.1 に示す値に固定した上で、流入流量と共にポンプ流量の許す限り変化させた。また、水温は 21.0~25.1°C の範囲で試験を実施した。

#### (2) ガスコア長さの計測条件

Table 2.2 にガスコア長さの計測条件を示す。試験時の液位は液位 40cm とした。また、ガス巻き込みの影響因子の把握試験の結果得られた、液位 40cm でのガス巻き込み発生条件と各試験条件の関係を Fig. 2.6 に示す。なお、ガス巻き込み発生条件の詳細は 3. 項以降に述べる。ここでは、水平方向流速と下降流速の増加が、ガスコアの長さに与える影響の把握を目的として試験を実施した。影響因子の把握試験の結果、Case A,B,C はガス巻き込みが発生する条件であり、Case D はガス巻き込みが発生しない条件である。ガス巻き込み発生限界の 1 条件を Case A とし、この条件を始点として、下降流速を増加させた条件を Case B、Case B に対して、下降流速を維持しつつ流出流速を増加させた条件を Case D、Case D に対して下降流速を増加させた条件を Case C とした。水温は 14.8~16.3°C の範囲で試験を実施した。

### 2.3.2 PIV 試験条件

#### (1) ガスコア長さと速度分布の同時刻計測条件

PIV と可視化試験を組み合わせたガス巻き込み渦周囲の流速分布計測条件を Table 2.3 に示す。試験時の液位は 40cm とした。また、ガス巻き込みの影響因子の把握試験の結果得られた、液位 40cm でのガス巻き込み発生条件と各試験条件の関係を Fig. 2.6 に示す。Case E はガス巻き込みが発生する計測条件であり、2.3.1(1) 項の Case A と同一条件である。Case F はガス巻き込みが発生しない計測条件として選定した。水温は 18.3~19.7°C の範囲で試験を実施した。

### 3. 剪断流条件下でのガス巻き込み試験結果

キャビティ的な流れ場に発生するくぼみ渦型ガス巻き込みに対して、発生形態と支配パラメータを把握するため、液面の可視化試験を実施した。発生パターンと初生条件を把握した結果を以下に示す。

#### 3.1 ガス巻き込み影響因子の把握

ガス巻き込み渦の発生条件の把握に先立って、全体的な流況を把握する目的で染料(水性絵具)を液面から渦中心近傍に注入し、ガスコアから吸込み管までの渦の挙動を可視化し、得られた可視化画像を Fig. 3.1 に示す。流体は図中の右側から左側に向かって流れている。染料によって染められた渦糸がガスコアの先端から、吸込み管の入口まで繋がっている様子が確認できる。渦糸は吸込み管の入口付近では、ほぼ水平方向に伸びており、その後大きく曲がって液面に到達していることが確認できる。ガスコアが吸込み管に達していない場合においても、渦そのものは吸込み管まで連続して繋がっている場合があることがわかる。

本試験においては、2.2 項で述べた目視判定方法に基づいて、気泡がガスコアから離脱するか又は、ガスコアが直接吸込み管まで到達した場合にガス巻き込みが発生したと判定した。今回の可視化試験ではガス巻き込みは気泡離脱時の様相に従って、大きく 3 形態が見られた。以下に各形態の定義を示す。

- I ガスコアが直接吸込み管まで到達する
- II ガスコアが吸込み管に到達しないがガスコアの先端から気泡が離脱する
- III 成長したガスコアが途中で崩壊し、気泡が液中に取り残される

Fig.3.2 に形態 I のガスコアが直接吸込み管まで到達する場合のガス巻き込み渦の様子を示す。渦は、水平方向流速に伴って移動する為、吸込み配管に対して、下流側で発生することが多かった。ガスコアは、Fig.3.1 に示す渦糸の形状と同様に液面付近では鉛直に発達し、徐々に曲がっていき、吸込み管の近傍で水平に近い状態で成長していることがわかった。吸込み流速が過大な場合、ガスコアが吸込み管に到達すると連続的にガス巻き込みを続けることを確認した。一方、ガスコアが吸込み管に到達する限界付近の吸込み流速の場合、時間とともに渦が減衰し、連続的なガス巻き込み状態からガス巻き込みの無い状態に戻る場合もあることがわかった。この場合、一度渦が減衰した後も繰り返し間欠的に渦が成長し、吸込み管に到達してガス巻き込みが発生する場合が多かった。Fig. 3.3 に形態 II のガス巻き込みを示す。ガスコアからの気泡の離脱は、ガスコアが成長し伸びきった状態で、1~3mm 程度の比較的小さい径の気泡が連続的にガスコアから離脱することを確認した。この形態でのガス巻き込みに関しては、渦糸に沿って吸込み管まで気泡が到達する場合が多かった。Fig.3.4 に形態 III のガス巻き込み発生例を示す。ガス巻き込み渦が急激に減衰する場合にガスコアが崩壊し、壊れたガスコアの一部が気泡として液中に取り残される場合が見られた。この形態のガス巻き込みに関しては、離脱した気泡が自由液面に戻り、吸込み管に到達しないことが多かった。

本試験でのガス巻き込みの発生条件を Fig. 3.5 に示す。横軸に流入流速、縦軸に吸込み流速を取っており、●が液位 40cm、△が液位 25cm での計測結果を示している。先に述べた定義の通り、本試験では、流入流速は流入流量を流入流路断面積で平均したものであり、吸込み流速は吸込み流量を吸込み管の断面積で平均したものである。流量は電磁流量計によって計測しており、計測精度は平均量として、流入流速が  $3.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  以下、吸込み流速が  $5.7 \times 10^{-2} \text{ m/s}$  以下である。図中の点に対して上側の領域がガス巻き込み発生領域である。今回の試験では、同一の流入流速に対して、ガス巻き込み発生時の吸込み流速より吸込み流速を増加させた場合には、ガス巻き込みが必ず発生することがみられた。また、流入流速が増加するにつれて、ガス巻き込み発生時の吸込み流速が増加しており、この傾向は、試験時の液位に関わらずみられた。液位の依存性に関しては、高液位条件でガス巻き込みが発生しにくい傾向が確認されているもの、水平流速の依存性と比較すると、液位の依存性が小さい結果となった。

### 3.2 ガスコア長さの計測

ガスコア長さの計測結果を Fig. 3.6-3.9 に示す。ガスコア長さは、可視化によって得られた連続画像に対して、画像処理による界面の検出を行うことによって算出した。画像処理による界面の検出では、気液界面において輝度勾配が大きく変化することを利用した。可視化計測によって得られた連続画像に対して背景ノイズの除去[13]を行った後、各画素の輝度値の勾配を計算した。得られた輝度値勾配に対してしきい値を設定し、しきい値を超える輝度勾配を持つ点を気液界面と定義した。決定された気液界面位置から、深さが最大となる点を探し、その点をガスコアの先端と定義した。また、試験装置を止めた時点での液面位置を別途計測し、液面位置(静止時)からガスコア先端までの距離をガスコア長さと定義した。以上を連続画像に対して適用し、時刻毎にガスコア長さを算出し、ガスコアの時間的な成長、減衰の様子を把握した。特に、計測された一つ一つの渦でのガスコア長さの最大値を最大ガスコア長さと定義した。

Table 3.1 にガスコア長さの平均値(最大ガスコア長の平均値)、ケース毎に計測されたすべての渦の中で最も発達した場合の最大ガスコア長、くぼみ渦の計測回数(カッコ内はガス巻き込み回数)を示す。Case B と Case D との比較から、高流入流速条件では、ガスコアが長く発達しにくく短いガスコアが多くなる傾向があった。また、Case A と Case B の比較から高吸込み流速条件では、ガスコアが長く発達する傾向があった。Case A に対して、先に述べた手法を用いてガスコア長さを算出し、計測された個々の渦に対するガスコア長さの最大値の分布を Fig. 3.6 に示す。ガスコアが長くなるにつれてガス巻き込みが発生する頻度が大きくなる傾向が確認された。Fig.3.7, Fig. 3.8 にそれぞれ、Case B, Case C でのガスコア長の分布を示す。いずれのケースにおいても、ガスコアが長くなるにつれ、Case A と同様にガス巻き込みが発生する頻度が大きくなる傾向が確認された。また、Case B では、渦の計測回数に対してのガス巻き込み頻度が多くなる傾向が確認された。一方、Case C では、比較的短いガスコアにおいても気泡離脱が確認された。Case A では 1 割程度がガス巻き込みに至ったのに対し、Case B では 5 割程度に増加した。さらに、Case B では気泡離脱によるガス巻き込みだけでなく、ガスコアが直接吸込み管に到達するガス巻き込みが 30 回の計測に対して 4 回確認された。Fig.3.9 は、今回の全計測ケースの結果を同一の図にまとめた結果である。ガスコアが長く発達するにつれて、ガス巻き込みが発生しやすくなることがわかる。発生限界に関しては、今回の試験ではガスコア長さ 8cm 以上の場合、100%ガス巻き込みが発生していることが確認された。ただし、Case C で比較的短いガスコアに対して、ガス巻き込みの発生が確認されたように、ガス巻き込み発生時のガスコア長さに関しては、水平流速の影響が大きく、水平流速を上昇させた場合、ガスコアが短くなる傾向が見られた。なお、今回の試験では、ガス巻き込み発生渦の最大ガスコア長さの中で最も短いものは 3.6cm であり、発生時の試験条件は Case C であった。

### 3.3 ガスコア長さと速度分布の同時計測結果

Fig.3.10 にガスコア長さと速度分布の同時計測を実施した結果を時系列に示す。右側にカメラで捉えた気液界面の画像、左側に液面下 1cm での渦周辺での速度分布図を示しており、図の上から下に向かって 3 秒毎の結果を示している。図中の秒数は、一番上に示した図を 0 秒とした場合の相対的な時間を示す。0 秒時の界面に記された、白の破線は液面位置を示しており、黄の実線は PIV 計測位置の目安を示す。計測時の試験条件は Case E(Case A と同一条件)であり、ガス巻き込みが発生する条件である。すなわち、Fig. 3.10 はガス巻き込みの発生する条件にて、ガス巻き込みが発生した渦に対しての計測結果を示している。渦に対する周方向流速と界面の挙動に関しては、0 秒時はガスコアが伸び始める前であり、渦周囲の流速は小さかった。3 秒後、渦周囲の流速は最大となり、その後徐々に弱くなった。一方、界面の様子に関しては、6 秒後の図でガスコア長さが最大となつており、9 秒の時点ではガスコア長さが短くなる過程にある。同時に 9 秒時の図では気泡が離脱する様子が渦の連続画像からわかる。すなわち、ガスコアの成長に先立って周方向流速が増大する傾向があることがわかった。ガス巻き込み発生時は、渦の周囲の周方向流速は極大値を過ぎた時刻であり、気泡離脱時(9 秒前後)には、液面直下に関しては、必ずしも渦に対する周方向流速が最大となっていないことが確認された。くぼみ渦の成長後は、くぼみ渦中心部分はガスコアとなり、気相部分となっているため、計測が出来ない領域となる。また、レーザーは速度分布図中の下から上に向かって入射しているため、渦の背後の部分はガスコアの影となり、レーザー光が入射しづらいた

め、トレーサーの輝度が充分に確保できないことから、誤ベクトルが多い領域となっている。

ガス巻き込みの発生しない場合の同時刻計測を実施した結果を Fig.3.11 に示す。試験条件は Case F であり、ガス巻き込みが発生しない条件である。Fig. 3.11 は Case F の試験条件において、渦のみが発生し、わずかにくぼみが発生したがガス巻き込みに至らなかった場合の計測結果である。Fig. 3.10 と同様に、右側に界面の様子、左側に液面下 1cm での渦周辺での速度分布を示している。一方、時間については、渦の発達、減衰時間が短かった為、図の上から下に向かって 2.5 秒毎の結果を示している。0 秒時の界面に記された、白の破線は液面位置を示しており、黄の実線は PIV 計測位置の目安を示す。図中の秒数は、一番上に示した図を 0 秒とした場合の相対的な時間である。界面形状に関しては、ガス巻き込み未発生時の様子であるため、変化量は非常に小さい。また、Fig.3.10 と比較すると、渦周囲の流速が小さいことがわかる。一方、渦周囲の流速はガス巻き込み発生、未発生に依らず渦の成長に先立って増加する傾向が見られた。

## 4. 考察

### 4.1 Burgers の渦モデル

ガスコア長さ  $L_g$  は、代表的な定常渦のモデルである Burgers モデル[14]では、次式で表される[7]。

$$L_g = K \times \frac{\alpha \Gamma_\infty^2}{g \nu} \quad (4.1)$$

ここで、 $\alpha$ は下降流速勾配、 $\Gamma_\infty$ は無限遠での循環、 $g$ は重力加速度、 $\nu$ は動粘性係数を示している。また、 $K$ は定数であり、 $K=4.389 \times 10^{-3}$ である。ここからわかるように、ガスコア長さは動粘性係数が一定である場合、下降流速勾配と無限遠での循環に依存していることを示している。本試験で対象とした非定常の渦に関しても、渦近傍でのガスコア長さを特徴づける物理量として、下降流速勾配と渦周囲での循環(水平方向)に着目して考察を行った。

### 4.2 せん断流れ場でのガス巻き込み

#### (1) 渦の可視化による影響因子の考察

本試験装置でのガス巻き込み渦に対する可視化による観察の結果から、3.1 項で述べたとおり、ガス巻き込みの発生形態としては、3パターンに大別できる。形態 I~IIIについて、可視化によって確認された過渡的変化の代表例を Fig. 4.1~4.3 に示す。各ガス巻き込み形態の過渡変化の時間スケールに合わせて、写真の時間間隔は選択している。

まず、形態 I のガス巻き込みに関して考察する。Fig. 4.1 から明らかなように、形態 I のガス巻き込みに関しては、くぼみ渦が吸込み管に発達し、最終的には吸込み管に到達している。すなわち、吸込み管から液面まで渦が繋がっていると考えられ、下降流速がくぼみ渦の成長のための支配因子となっていることを示している。

続いて、形態 II と形態 III のガス巻き込みに関して考察する。形態 II に関しては、巻込まれた気泡が渦糸に沿って吸込み管まで到達する場合が殆どであった。さらに、Fig. 4.2 から確認できるように、ガス巻き込みの後もガスコアは維持されている。一方、形態 III に関しては、気泡が浮力によつて気液界面まで到達して消滅する場合が多く、Fig. 4.3 では、時間と共にガスコアが減衰していく傾向がみられる。すなわち、前者に関しては下降流速が渦糸に沿う形で維持されているのに対し、後者に関しては、気泡が分離した時点で既に気泡を降下させるだけの下降流速が維持されていないという違いがある。さらに、3.1 項で述べたとおり、形態 II と形態 III については、ガス巻き込みの発生時にガスコアの急激な減衰がないのに対し、後者はガスコア減衰時にガスコアが崩壊することでガス巻き込みが発生しているという違いがある。ガスコアは液相側の渦中心での圧力降下によつて伸長すると考えられる。すなわち、形態 II のガス巻き込みに関しては、液相側の渦が維持されているのに対して、形態 III でのガス巻き込みに関しては液相側の渦(循環)が維持されていないと考えられる。以上より、形態 II ではガス巻き込み後も下降流速と渦が維持されているのに対し、形態 III では、下降流速と渦が維持されていないと考えられる。これは、Burgers モデルが示すように、渦(循環)の存在と下降流速の存在がくぼみ渦を成長、維持させるための条件であることを示している。

#### (2) 発生条件とガスコア長さに関する考察

3.2 項で述べたとおり、ガスコア長さの計測の結果から、水平方向の流入流速が増加するに伴つて、ガスコアが伸びにくくなる傾向を確認した。同時に、Fig.3.5 で示したように、流入流速のみを上昇させた場合、ガス巻き込み発生に必要となる吸い込み流速は増加する傾向が見られた。過去の実験[15]では、流面の揺らぎが増加すると、ガス巻き込みが抑制されることが明らかになっており、今回の試験では、水平方向流速を増加させることにより、液面の揺らぎが増加したことが、ガス巻き込みが発生しにくくなった要因の一つであると考えられるが、詳細については今後検討する必要がある。このことは、システム量としての水平方向流速を抑制することが、必ずしもガス巻き込みを抑制するわけではないことを示している。Burgers モデルから示唆されるように、渦周囲の循環(水平方向)がガス巻き込みに対して、重要な支配因子であると考えられるが、システム量としての水平流速の増加が局所的な循環の増加に必ずしもつながっていないと考えられる。

一方、下降流速が増加した場合、ガスコア長さが伸びやすくなる傾向を Fig. 3.6 と Fig. 3.7 の比較

によって確認した。同時に、ガス巻き込みが発生しやすくなることを Fig.3.5 より確認した。すなわち、水平流速と異なりシステム量としての下降流速の増加はガス巻き込みを発生させる方向に働くことを示している。以上より、くぼみ渦によるガス巻き込み防止に関しては、下降流速の抑制が有効であると考えられる。

ガス巻き込みが発生する可能性がある限界のガスコア長さを見ると、Fig. 3.6 と Fig. 3.8 から、水平流速を増加させた場合、ガスコアが短い状態でもガス巻き込みが発生する傾向があることを確認した。しかしながら、今回の試験ではくぼみ渦のサンプル数が Fig. 3.8 の Case C ではガス巻き込み発生、未発生をあわせて 30 個と少ないため、より定量的に示すためには、今後データ数を増やす必要がある。

#### 4.3 ガスコア長さと循環の関係

Burgers モデルから、循環はガスコア長さに依存して変化すると考えられる。ここでは、くぼみ渦が発達する過程における循環とガスコア長さの関係について検討した。

##### (1) 循環の算出

PIV を用いた速度分布の計測試験結果から、ガス巻き込みが発生した場合は発生しない場合と比較して、渦周囲での周方向流速が大きい傾向が見られた。時刻毎の循環の変化とガスコアの発達との関係を明らかにするため、瞬時の速度場の計測結果から得られた循環の値と、対応する時刻でのガスコア長との比較を行った。循環の算出は、積分経路として渦中心に対して円を仮定して、中心からの距離と周方向流速との積から次の式を用いて求めた。なお、誤ベクトルの影響を緩和するため、周方向数点での速度と中心からの距離の積を平均化し循環を算出している。

$$\Gamma(r_j) = \frac{2\pi}{N} \sum_{i=1}^N (V(r_j, \theta_i) \times r_j) \quad (4.2)$$

$\Gamma$  は循環、 $r$  は渦中心からの距離、 $\theta$  は偏角、 $V$  は渦中心を中心とした座標系における周方向流速を示す。N は、速度と渦中心からの距離の積の和を平均化し循環を計算する点数を示す。添え字の  $i$  は周方向の位置を示し、 $j$  は径方向の位置を示している。周方向での平均化時に使用する、N 個の速度定義点( $r_j, \theta_i$ )は、周方向に等間隔で選ぶこととした。すなわち、 $\theta_i = 2\pi i/N$  ( $0 \leq i \leq N-1$ )とした。PIV から得られた速度ベクトルは、離散データとして得られているため、必ずしも PIV の速度分布定義点と式 4.2 での速度の定義点( $r_j, \theta_i$ )は一致しない。よって、式 4.2 の定義点( $r_j, \theta_i$ )での速度として、最近接の PIV の速度分布定義点での速度を使用した。今回は、N=16、 $2 \leq j \leq 20$  として循環の計算を実施した。

この定義方法により循環を算出するためには、流速ベクトルに対する渦中心からの距離を算出する必要がある。そのためには、各時刻における速度分布から渦中心を決定する必要がある。計測ノイズ等や PIV によって得られた速度の空間分解能の問題から、渦度や第二不変量等の微分を用いた手法で渦中心を正確な位置を求めることが困難である。そこで、渦周囲の速度ベクトルについて、周方向成分が支配的であり、径方向成分が小さいという仮定を置き、各速度ベクトルの法線同士の交点から渦中心を定義した。すなわち、各速度ベクトルの法線の交点をすべてのベクトルの組み合わせについて算出し、ある領域毎に交点の数密度(個数)を求め、得られた交点密度分布から交点密度が最大となる点を渦中心と定義した。この方法を用いて、渦中心を求めた例を Fig. 4.4 に示す。上に示す速度分布(Fig. 3.10 の 3 秒時)に対して交点密度分布を計算した結果、下に示す交点密度分布が得られた。交点密度分布算出は、元になる速度ベクトル計算の間隔を考慮して 0.17mm 間隔(速度ベクトルと同じ間隔)で算出した。この場合、点線で示す位置で交点密度の最大となっているため、この点を渦中心とした。

以上の方法から半径方向の循環分布を求め、その最大値を最大循環と定義した。

##### (2) ガスコア長さと循環の関係

(1)に示した計算方法をガス巻き込み発生時の渦に対して適用し、得られた各時刻での最大循環とガスコア長さの時間変化を Fig. 4.5, 4.6 に示す。グラフの横軸は時間、縦軸の第 1 軸(左軸)はガスコア長さ、縦軸の第 2 軸(右軸)は最大循環の値をそれぞれ示している。速度ベクトルの計測断面は液

面下 1cm である。計測されたガス巻き込みは 3.1 項の分類では、形態Ⅲに相当する。ガスコア長さが一定時間一定となる領域が見られるが、これは、ガスコアの先端部分が計測レンジを超えたことにより、計測できていないためである。Fig. 4.5, 4.6 から、ガスコアは循環の値が  $0.01\text{m}^2/\text{s}$  を越えたあたりで成長を始めており、ガスコアは循環の増加に対して遅れを持って成長していることがわかる。また、ガス巻き込みの発生に関しては、Fig. 4.5 中の矢印で示す時刻でガスコアからの気泡離脱が発生しており、形態Ⅲの特徴として、循環やガスコアが最大値に達した後で遅れてガスコアからの気泡離脱が発生していることがわかる。一方、Fig. 4.6 では時刻 12~20 秒で、循環が大きく減衰しているが、これは渦が計測領域から外れ、循環が算出できなかつたためである。これを考慮すると、Fig. 4.6 においても渦の成長に先立つて循環が成長していると考えられる。また、液面下 5cm での計測結果について、Fig. 4.7, 4.8 に示す。計測されたガス巻き込みは 3.1 項の分類では、1cm での計測結果と同様に形態Ⅲに相当する。いずれの場合も液面下 1cm での計測結果と同様に、循環の増加に対してガスコア長が遅れを持って成長していることがわかる。

Fig. 4.9 にガス巻き込み未発生時の液面下 1cm での循環とガスコア長さとの関係を示す。ガス巻き込み発生時と比較して、ガスコアの最大長さは 1cm 未満と、大幅に小さいものの、ガス巻き込み発生時と同様にガスコアの成長は循環の発達に対して時間遅れを持っていることが確認できる。一方、最大の循環値に関しては、ガス巻き込み時と比較すると、小さいことがわかる。このことから、時間遅れが見られるものの、Burgers モデルが示すように、ガスコアの成長は、循環に依存していることがわかる。Fig. 4.10 にガス巻き込み未発生時、液面下 5cm での循環とガスコア長さとの関係を示す。いずれの場合も液面下 1cm での計測結果と同様に、循環の増加、減少に対してガスコアが遅れを持って成長、減衰していることがわかる。

以上より、ガス巻き込みの発生、未発生によらず、ガスコアは循環の増加に対して遅れを持って成長し、循環の減少と共にガスコアも減衰していることが分かった。すなわち、非定常な渦においても、Burgers モデルが示す定常渦と同様に、ガスコアは循環の増加、減少に従属して成長、減衰をしており、循環はガス巻き込みに関する重要な支配因子であると考えられる。よって、数値計算等により、液面付近での循環の値を高精度で予測することが出来れば、循環の増加に追従してガスコアは成長する関係にあるためガス巻き込みの予測が可能であると考えられる。また、4.2 項で述べたように、形態Ⅲのガス巻き込みは、ガスコアの減衰時にガスコアが崩壊することにより発生する。循環が減衰することによりガスコアが減衰し、ガスコアの崩壊によるガス巻き込みにつながっているといえる。すなわち、流体側の渦(循環)の急激な減衰がガス巻き込み発生要因となる場合があるといえる。

なお、今回は循環とくぼみ渦(ガスコア長さ)の成長関係は液面直下について着目して試験を行ったが、今後、液面からの深さによる水平方向流速の違いや、下降流速についての定量的な評価が必要である。

## 5. 結言

非定常渦によって発生するガス巻き込みを評価するめ、1/1.8縮尺部分モデル試験装置で見られた、比較的淀んだ流れ場において、循環と下降流速が陽的に与えられた場合に発生するガス巻き込みを対象として、基礎的な試験を実施した。得られた結論を以下に示す。

- くぼみ渦により発生するガス巻き込みとして、以下のパターンがあることを明らかにした。
  - I ガスコアが直接吸込み管まで到達する
  - II ガスコアが吸込み管に到達しないがガスコアの先端からの気泡が離脱する
  - III ガスコアが崩壊し気泡が取り残される
- 液位を増加させた場合、ガス巻き込みが発生しにくくなることを確認した。
- 水平方向の流入流速を増加させた場合、ガス巻き込みが発生しにくくなる傾向が見られた。
- 液面下方に置いた吸込み管の吸込み流速を増加させた場合、ガス巻き込みが発生しやすくなつており、下降流速の抑制は、くぼみ渦によるガス巻き込み抑制に対して有効であることを確認した。
- ガスコアが長くなるほどガス巻き込みが発生しやすくなる傾向が見られた。今回の試験で確認したガス巻き込みでは、最大ガスコア長が最も短かった場合は3.6cmであった。
- 液面下1cmと5cmの循環の変化とガスコア長さの時間変化の関係を調べた結果、ガスコアの成長は循環の変化に対して時間遅れを持っていることが分かった。
- ガス巻き込み発生時には最大循環値が増大する傾向があり、Burgers モデルが示すように、ガスコアの成長、減衰に関して、循環が大きく影響することを明らかにした。
- ガス巻き込み発生時刻と循環の時間変化との比較から、形態IIIのガス巻き込みは循環の減衰局面で発生しており、流体側の渦の急激な減衰がガス巻き込み発生要因となる場合がある。

### 謝辞

本研究を実施するにあたり、ガス巻き込みワーキンググループの委員の皆様にご助言を頂きました。ここに深く感謝いたします。また、試験の実施にあたり、常陽産業(株)の皆様に頂きました多大なご協力に感謝いたします。

### 参考文献

- [1] 大野勝巳、小竹庄司、難波隆司、中井良大他、高速増殖炉実用化戦略調査研究フェーズⅡ中間とりまとめ、サイクル機構技報、No.24 別冊 2004.11(2004)
- [2] M.Ueta, et al., The development of demonstration fast breeder reactor (DFBR), ICONE-3, Vol.2, p771 (1995)
- [3] Y.Eguchi, N.Tanaka, et al., Gae entrainment in the IHX vessel of top entry-type LMFBR, Nucl. Eng. Design, Vol.146,pp,373-381 (1994)
- [4] 山本一彦、江口譲、他、トップエントリー型ループ型炉の中間熱交換器ガス巻き込み試験、日本機械学会論文集、(B編) 59卷 565号
- [5] T.Hiranuma, K.Iwashige, et al., Experimental study of liquid properties effect on gas entrainment phenomena induced by vortices, Proc. of NURETH-8, Kyoto, Japan, Vol.3, pp 1735(1997)
- [6] 平沼健、岩重健五、他、Na 中の旋回渦によるガス巻き込み発生限界の評価(I),(II)、1998年原子力学会秋の大会予稿集, G20-21 (1998)
- [7] 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)
- [8] 酒井清吾、班目春樹、岡本孝司 有限容器内に形成されるくぼみ渦周りの流れ場の測定、日本機械学会論文集、(B編) 63卷 614号
- [9] 木村暢之、林謙二、他 炉容器コンパクト化に関する流動特性試験(炉内流況の把握と流動適正化方策の考案)、サイクル機構報告書 JNC TN9400 2001-117(2002)
- [10] 木村暢之、飛田昭、他 1/1.8 縮尺部分モデルによる原子炉容器内ガス巻き込み特性の評価-ガス巻き込み現象の把握-、サイクル機構報告書 JNC TN9400 2004-067
- [11] 1/1.8 縮尺部分モデルによる原子炉容器内ガス巻き込み特性の評価-ガス巻き込み発生条件と発生メカニズムの把握-、JAEA-Research 2006-005
- [12] Adrian, R., J., Particle-Imaging techniques for experimental fluid mechanics, Ann Rev. Fluid Mech., Vol.23,261, 1991.
- [13] 木村暢之、他 可視化画像による流速測定技術の開発”-ノイズ処理手法を用いた計測精度の向上-、JNC TN9400 99-078、(1999)
- [14] J.M.Burgers, A mathematical model illustrating the theory of turbulence, Advances in applied mechanics edited by R.Mises, T.Karman, Academic Press ING, New York,(1948)
- [15] 辻義之、他 ナトリウム冷却高速炉のガス巻込みに関する研究(6) ガス巻き込み渦に与える界面ゆらぎの効果 日本原子力学会 2005年原子力学会秋の大会予稿集, G52 (2005)

Table 2.1 ガス巻き込み影響因子の把握試験条件

Case 名	液位 (mm)	流出流速 (cm/s)	流入流速 (cm/s)	吸込み流速 (m/s)
Case1-1	250	6.00	6.00~29.6	0~1.8
Case1-2	250	8.96	8.96~29.6	0~1.8
Case1-3	250	12.0	12.0~29.6	0~1.8
Case1-4	250	15.0	15.0~29.6	0~1.8
Case2-1	400	3.01	3.01~18.5	0~1.8
Case2-2	400	6.02	6.02~18.5	0~1.8
Case2-3	400	8.98	8.98~18.5	0~1.8
Case2-4	400	11.6	11.6~18.5	0~1.8

Table 2.2 ガスコア長さの計測条件

Case 名	液位 (mm)	流出流速 (cm/s)	流入流速 (cm/s)	吸込み流速 (m/s)
Case A	400	3.01	5.8	0.85
Case B	400	3.01	6.9	1.20
Case C	400	8.98	13.5	1.40
Case D	400	8.98	12.9	1.20

Table 2.3 ガス巻き込み渦周囲の流速分布とガスコア長さの計測条件

Case 名	液位(mm)	流出流速 (cm/s)	流入流速 (cm/s)	吸込み流速 (m/s)
Case E	400	3.01	5.8	0.85
Case F	400	2.41	4.7	0.68

Table 3.1 ガスコア長さの平均、最大ガスコア長さ(最大に発達した場合)、計測回数

Case 名	ガスコア長さの平均 (mm)	最大ガスコア長さ (mm) (最大に発達した場合)	計測数
Case A	34.1	80.5	60(6)
Case B	100	300	30(16)
Case C	31.5	107	30(3)
Case D	13.5	23	30

計測数の()内はガス巻き込みに至ったものの数を示す。

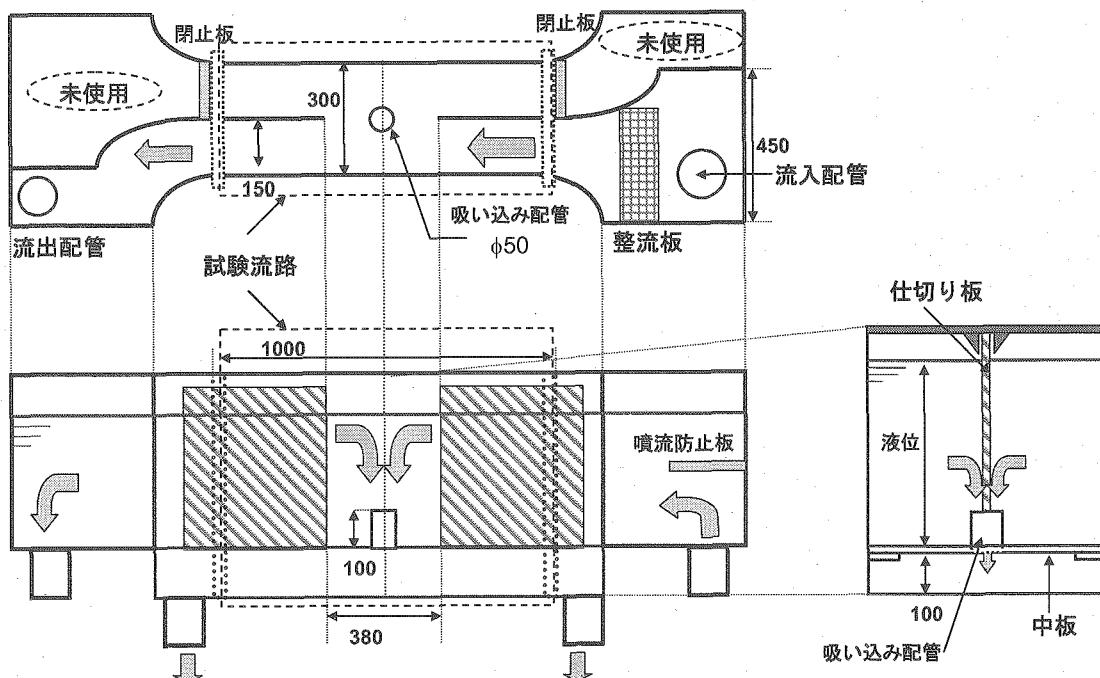


Fig. 2.1 ガス巻き込み基礎試験装置の概略

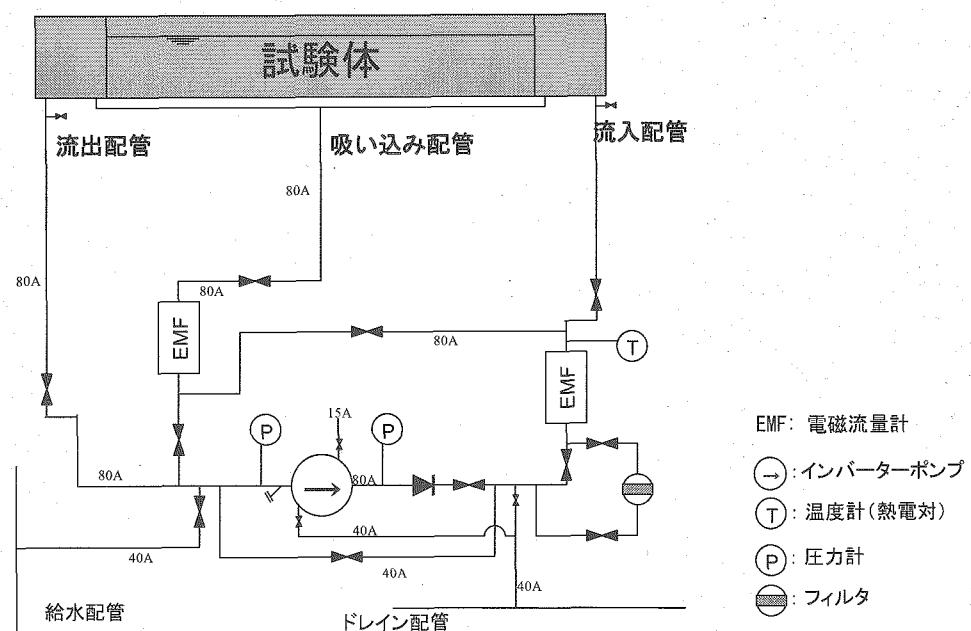


Fig. 2.2 ガス巻き込み基礎試験装置ループ図

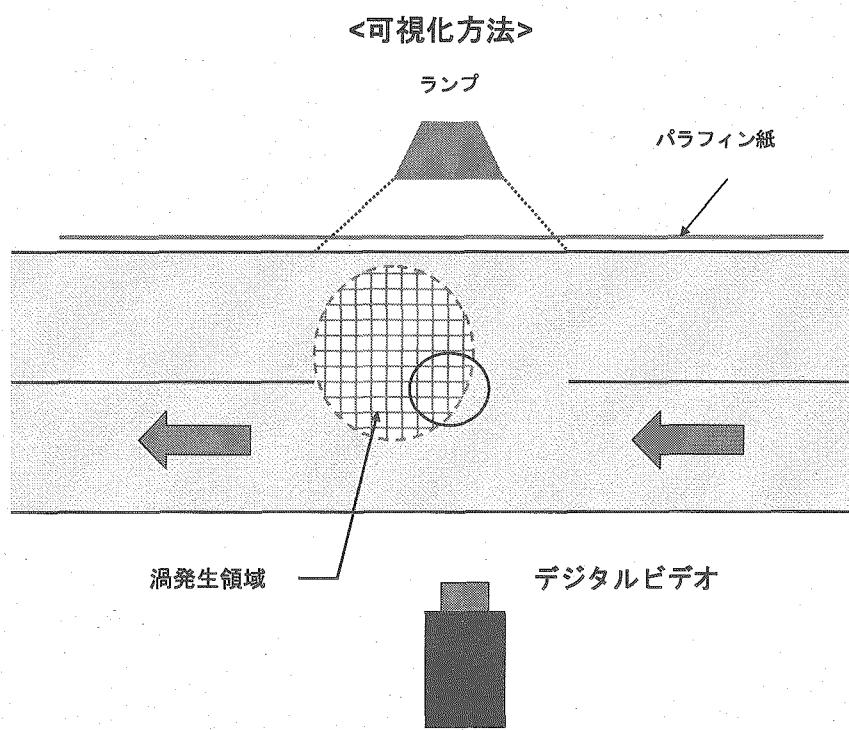


Fig. 2.3 可視化試験時の機材配置

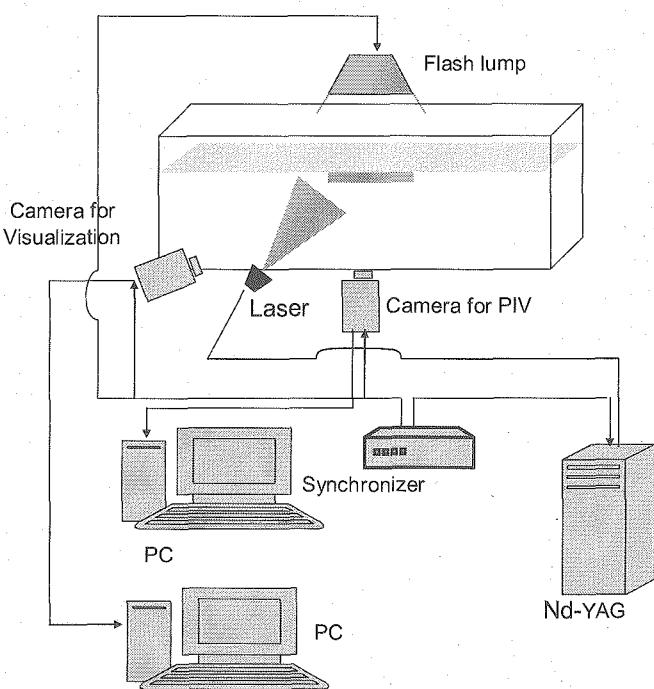


Fig. 2.4 流速分布一ガスコア同時計測セッティング

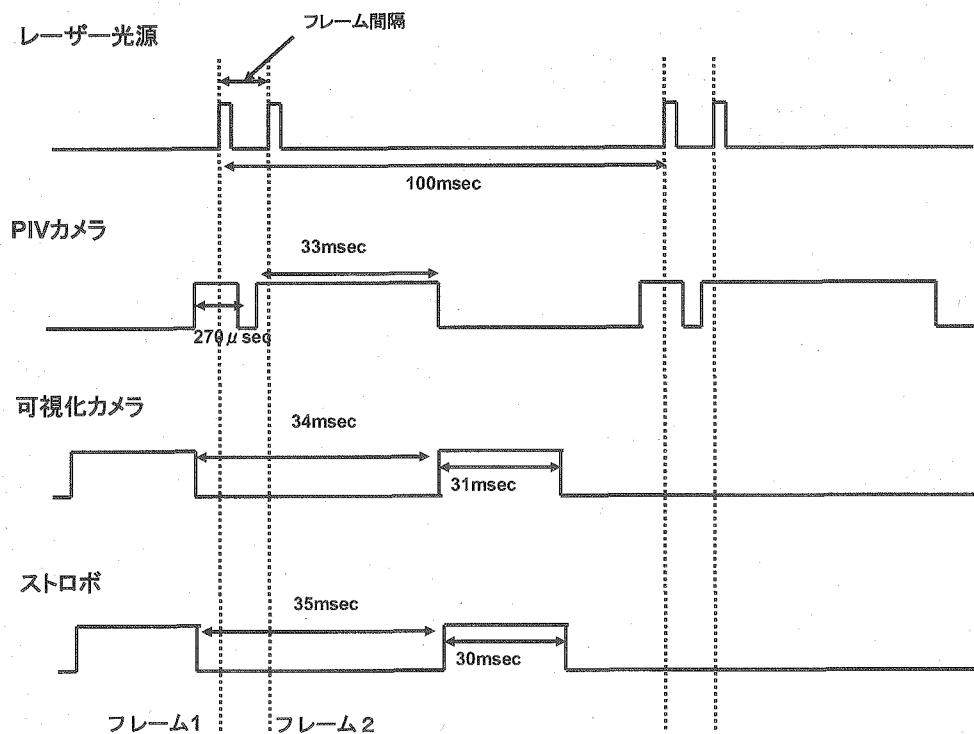


Fig. 2.5 流速分布—ガスコア同時計測時の機器動作のタイミングチャート

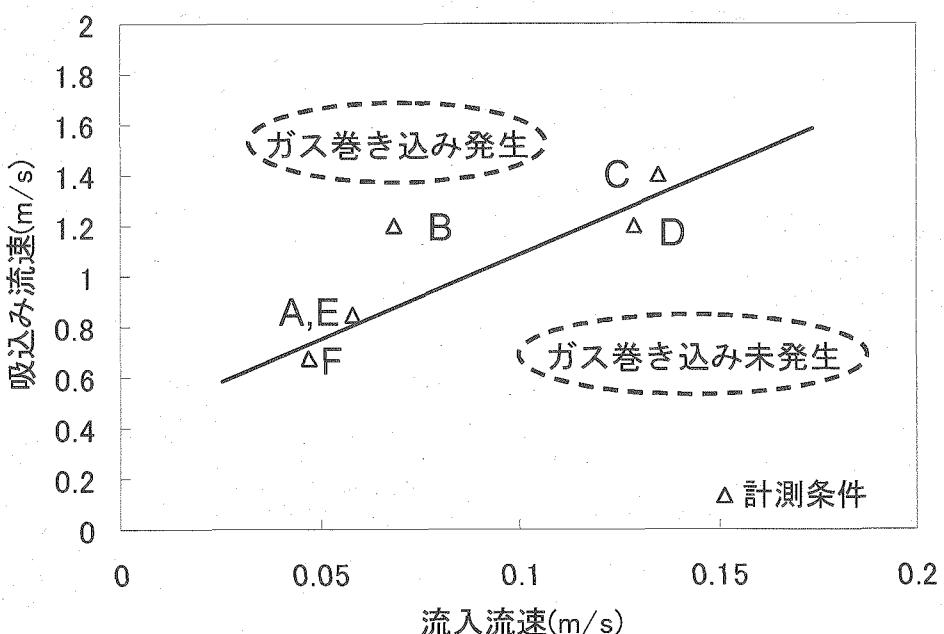


Fig. 2.6 ガス巻き込み発生条件と試験条件の関係

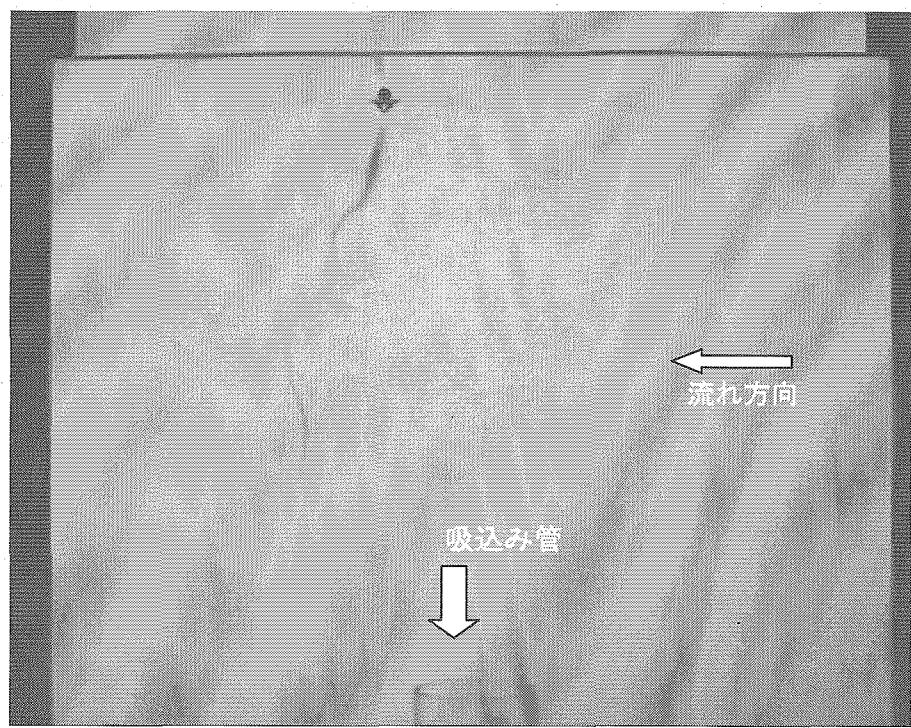


Fig. 3.1 染料による渦の可視化 (Table 2.2, Case A)

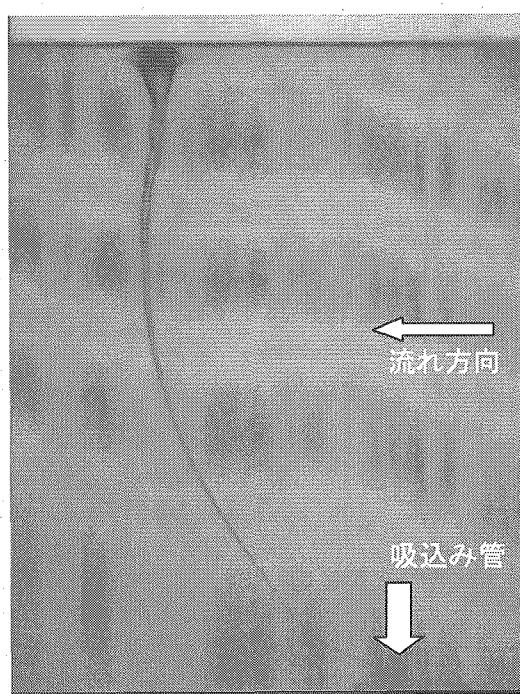


Fig. 3.2 形態 I ガス巻き込み例 (Table 2.2, Case E)

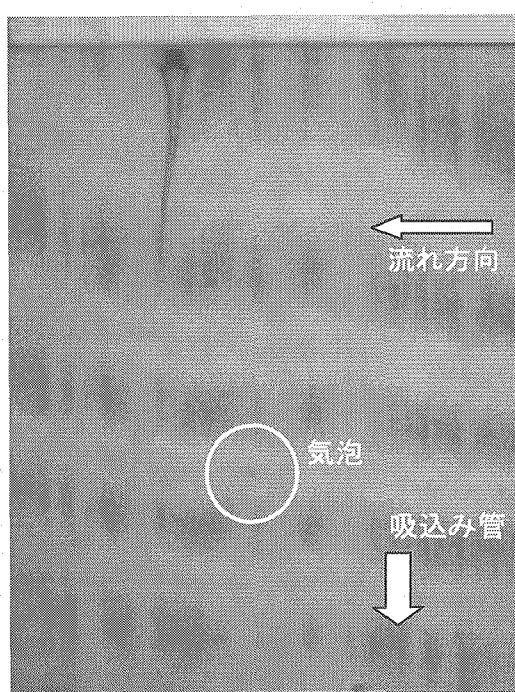


Fig. 3.3 形態 II ガス巻き込み例 (Table 2.2, Case E)

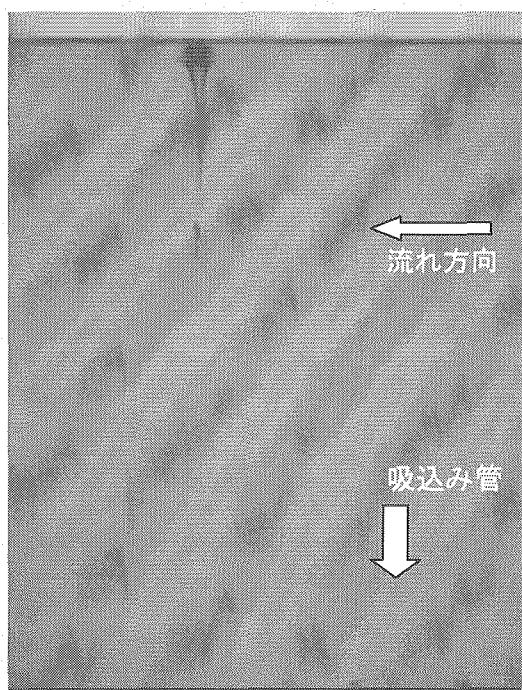


Fig. 3.4 形態IIIガス巻き込み例 (Table 2.2, Case A)

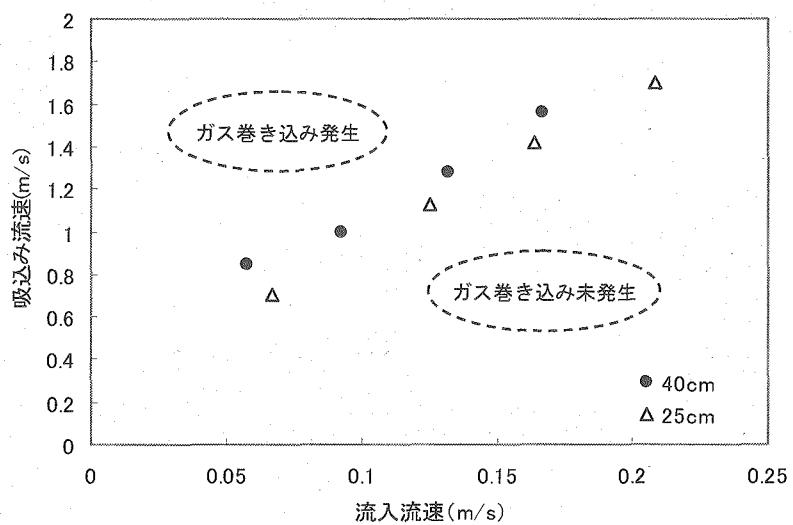


Fig. 3.5 ガス巻き込み発生時の流入流速と吸込み流速の関係

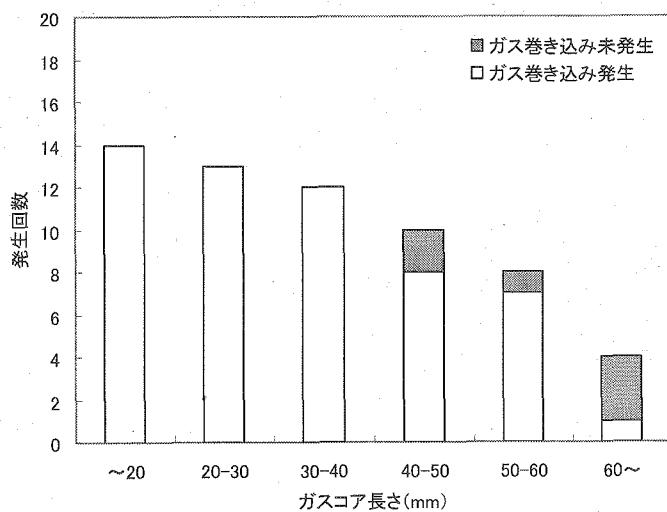


Fig. 3.6 ガスコア長さの計測結果 Case A

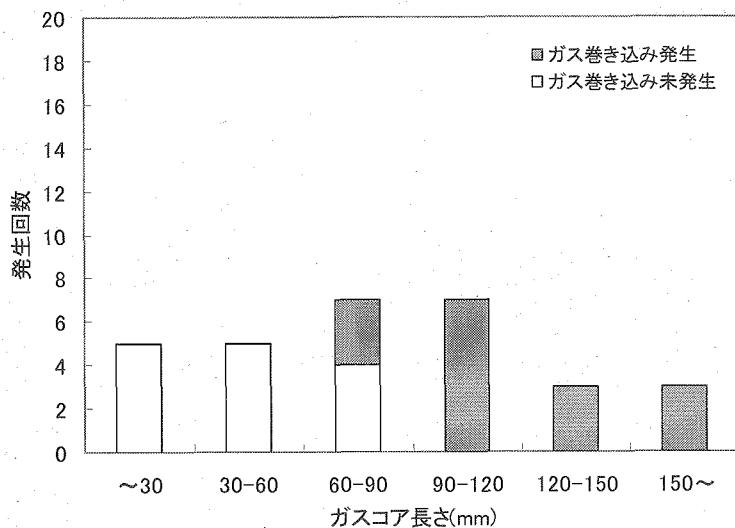


Fig. 3.7 ガスコア長さの計測結果 Case B

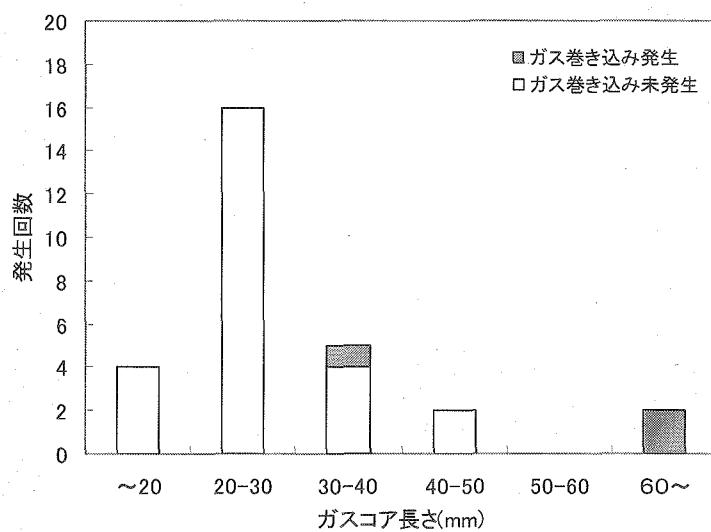


Fig. 3.8 ガスコア長さの計測結果 Case C

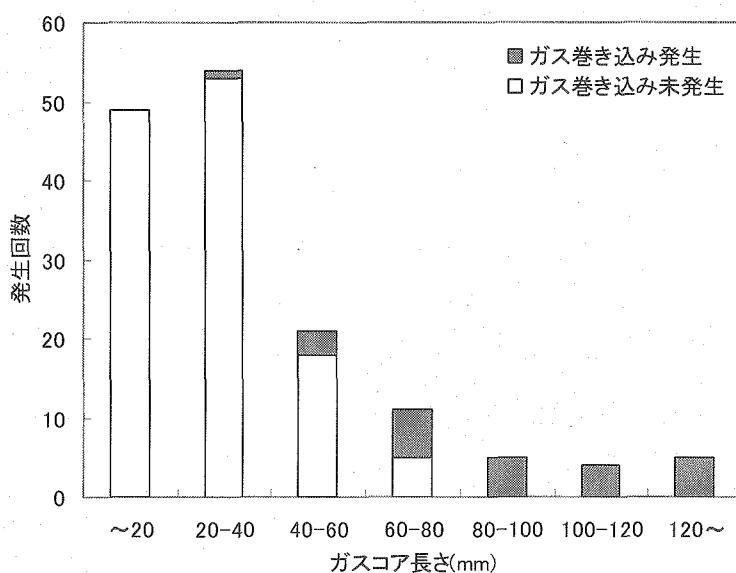


Fig. 3.9 ガスコア長さの計測結果 CaseA-D

This is a blank page.

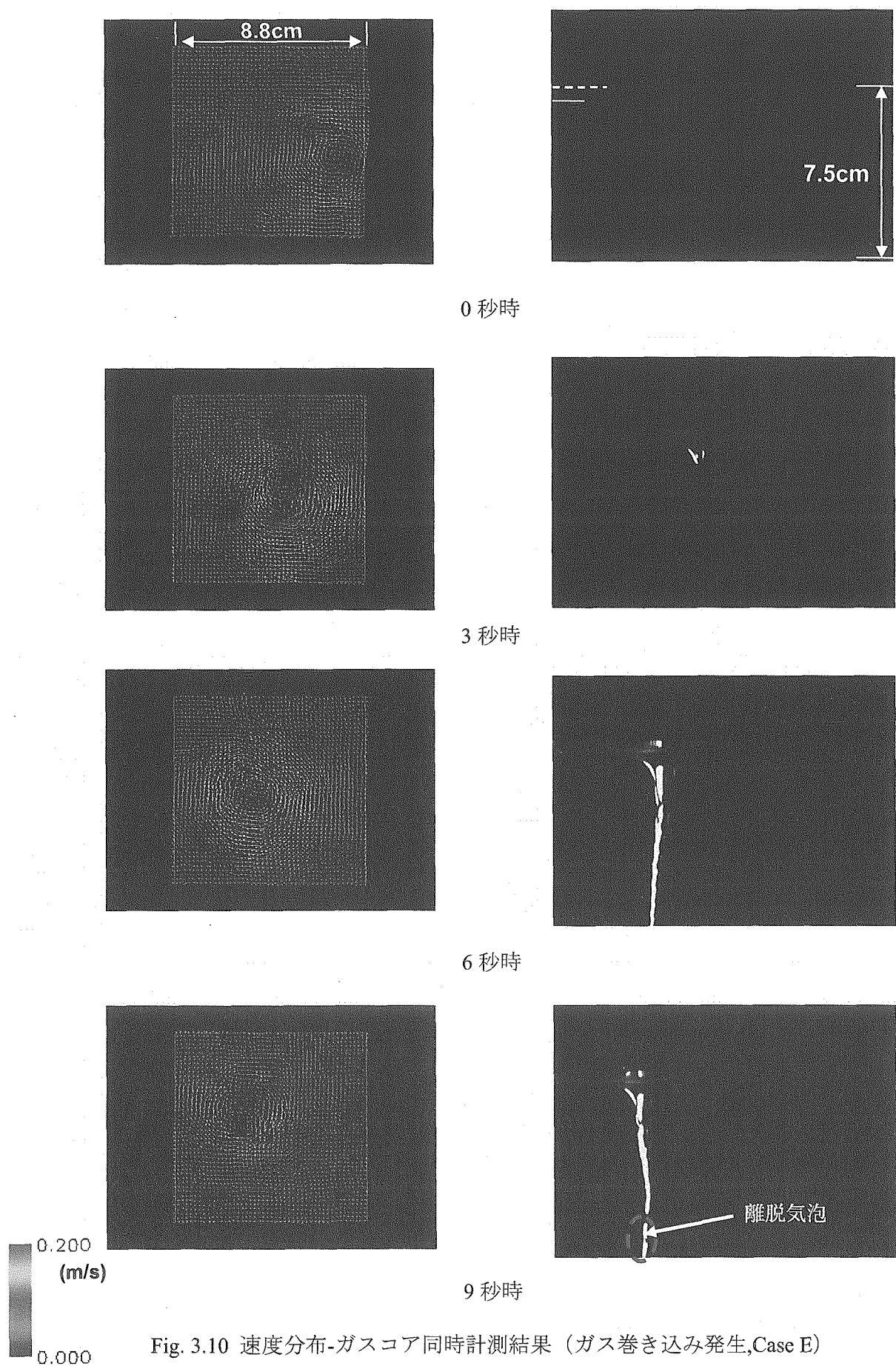


Fig. 3.10 速度分布-ガスコア同時計測結果（ガス巻き込み発生, Case E）

This is a blank page.

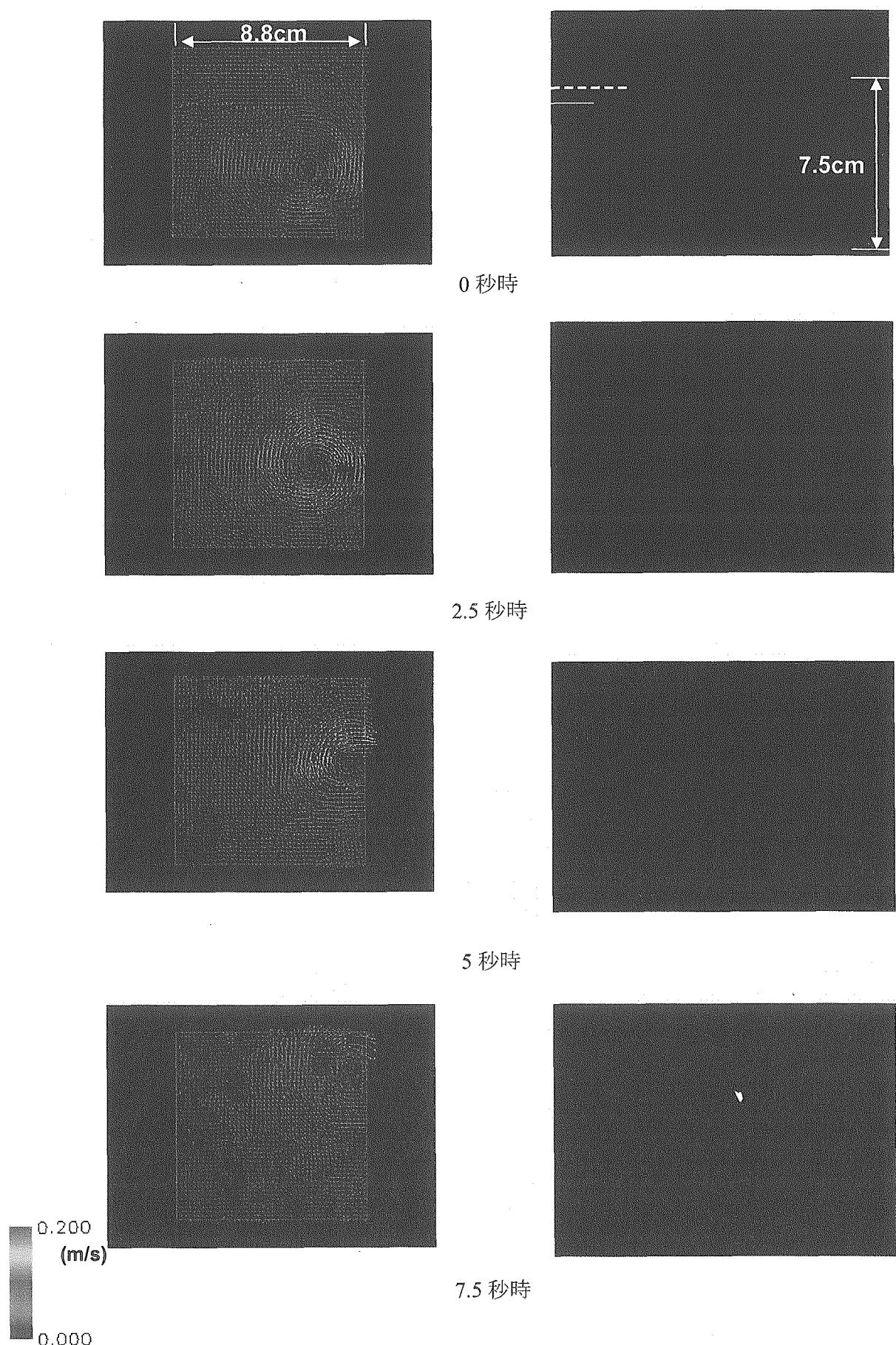


Fig. 3.11 速度分布-ガスコア同時計測結果 (ガス巻き込み未発生, Case F)

This is a blank page.

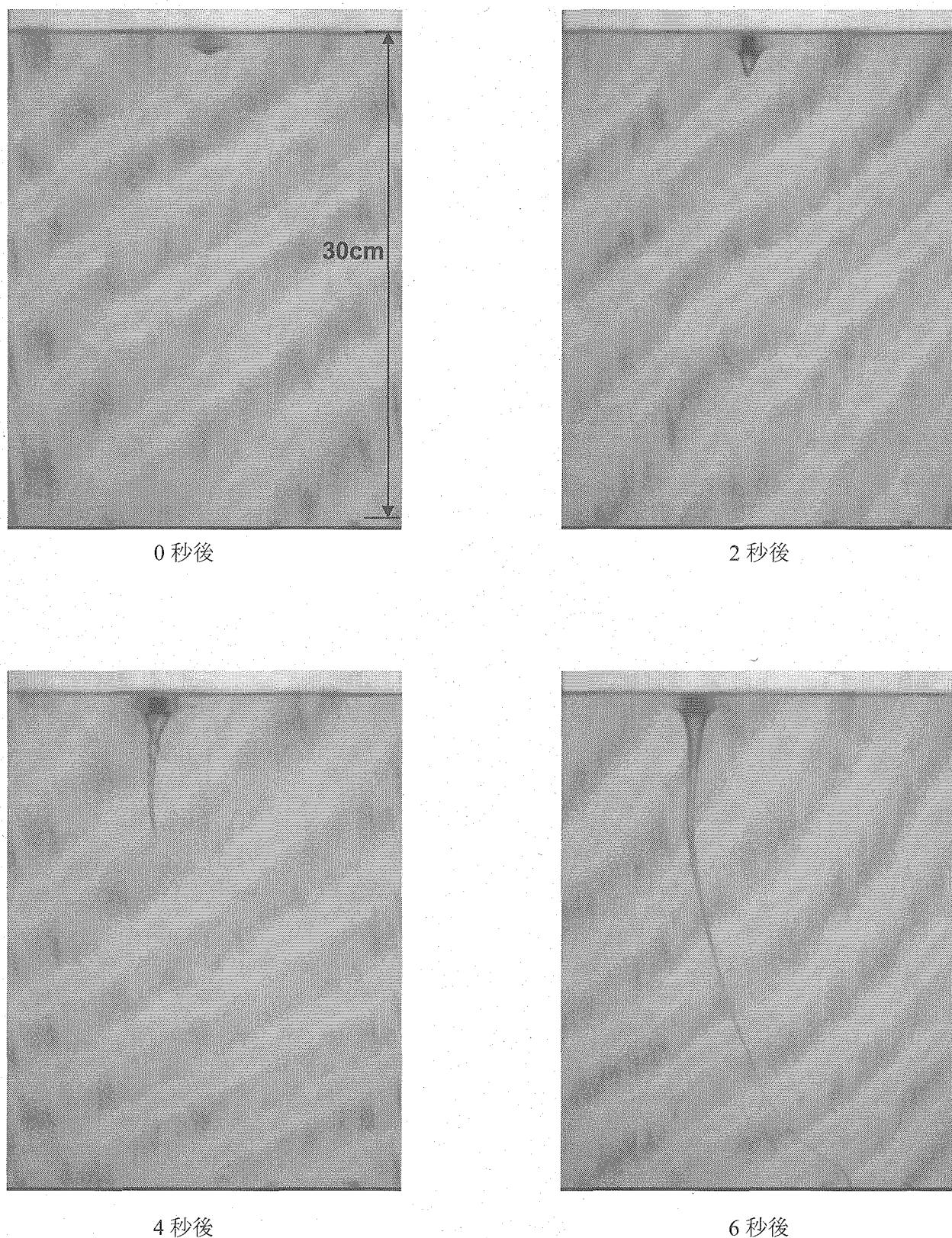


Fig. 4.1 形態 I のガス巻き込み過渡変化 (Table 2.2, Case B)

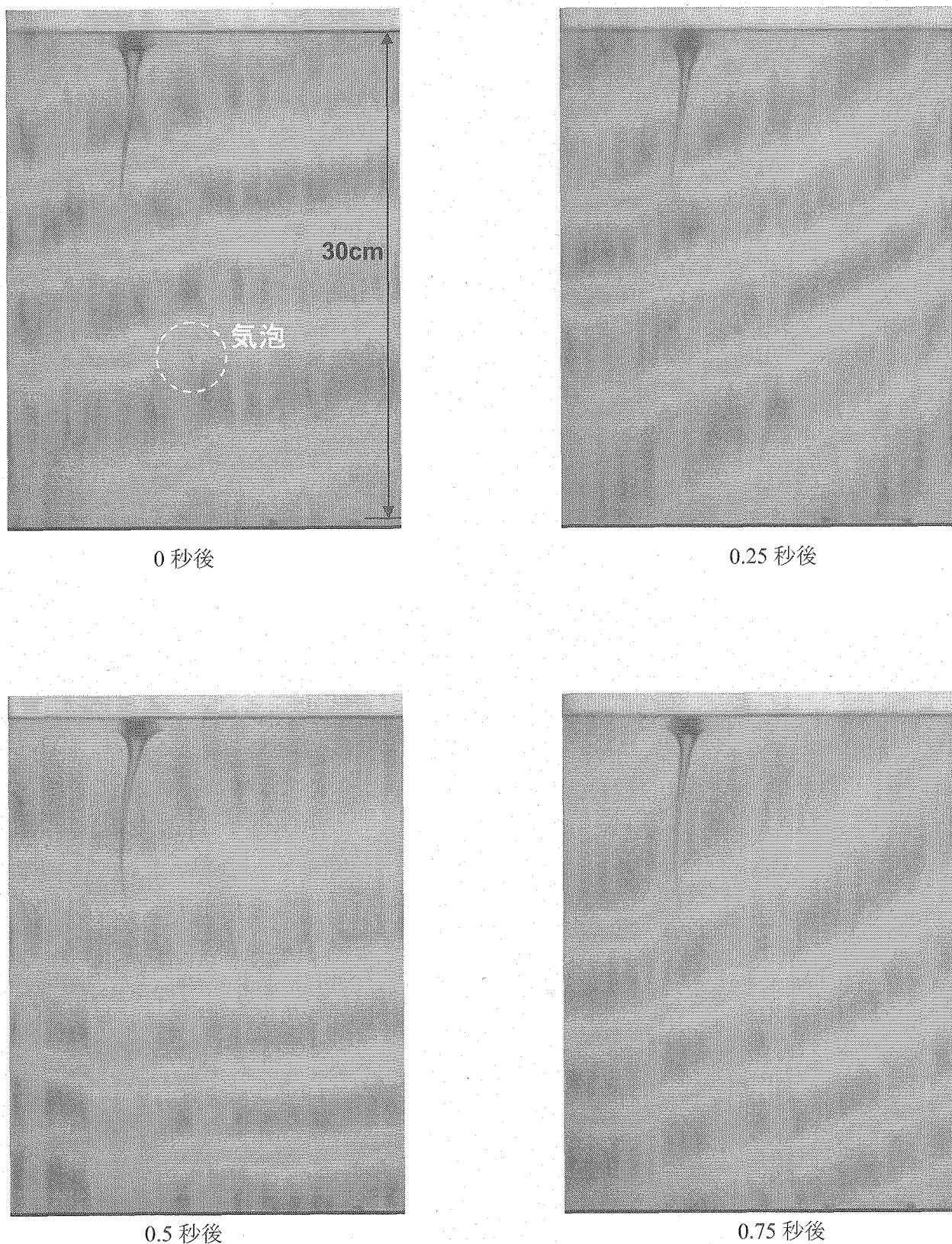


Fig. 4.2 形態IIのガス巻き込み過渡変化 (Table 2.2, Case B)

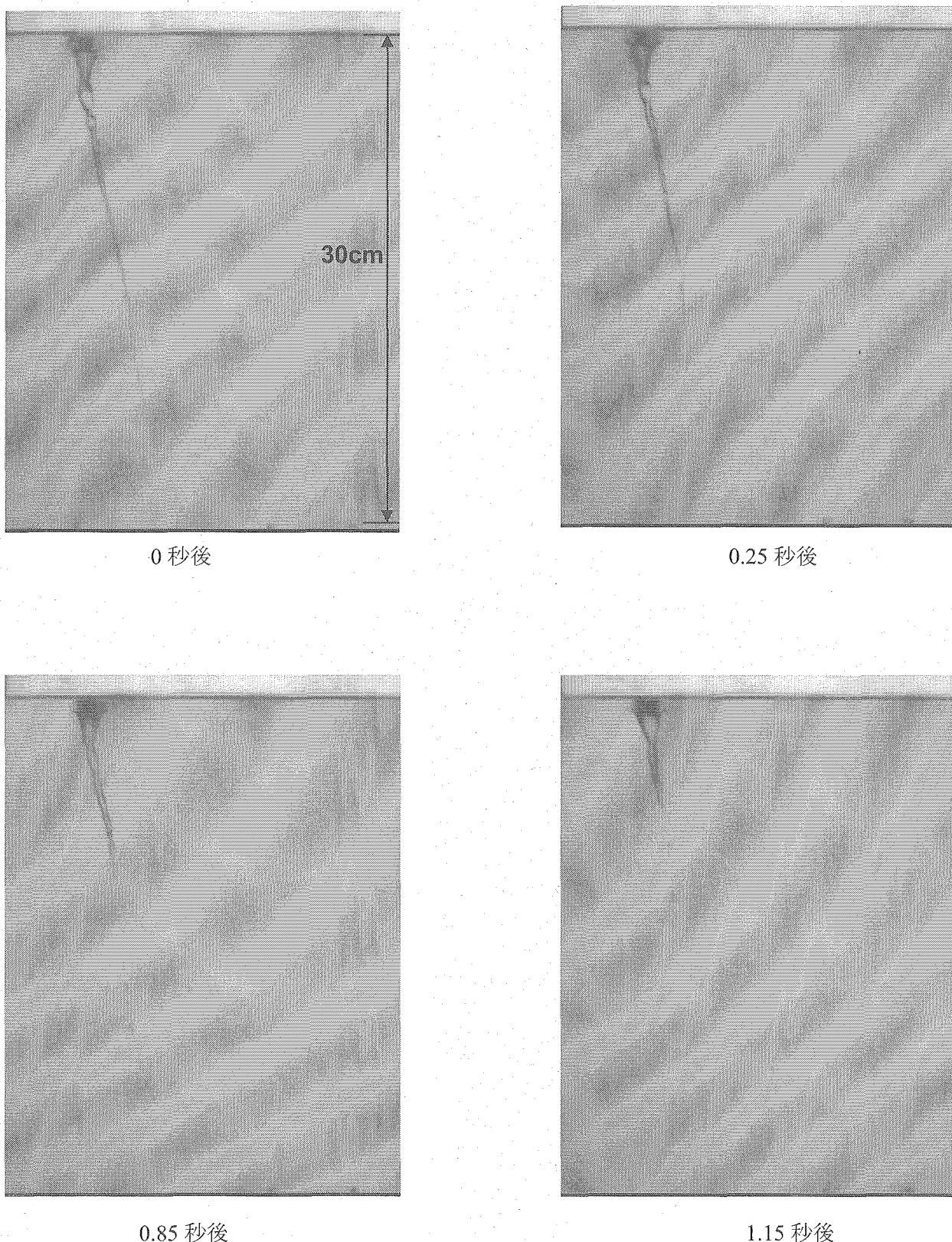
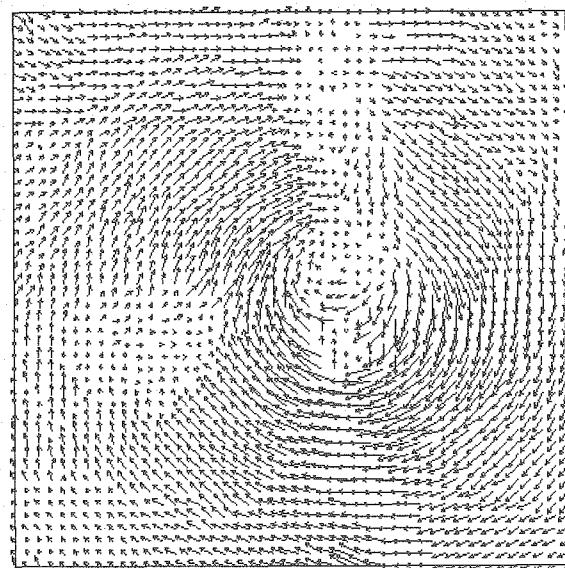


Fig. 4.3 形態IIIのガス巻き込み過渡変化 (Table 2.2, Case B)



速度分布(渦中心を求めるデータ)

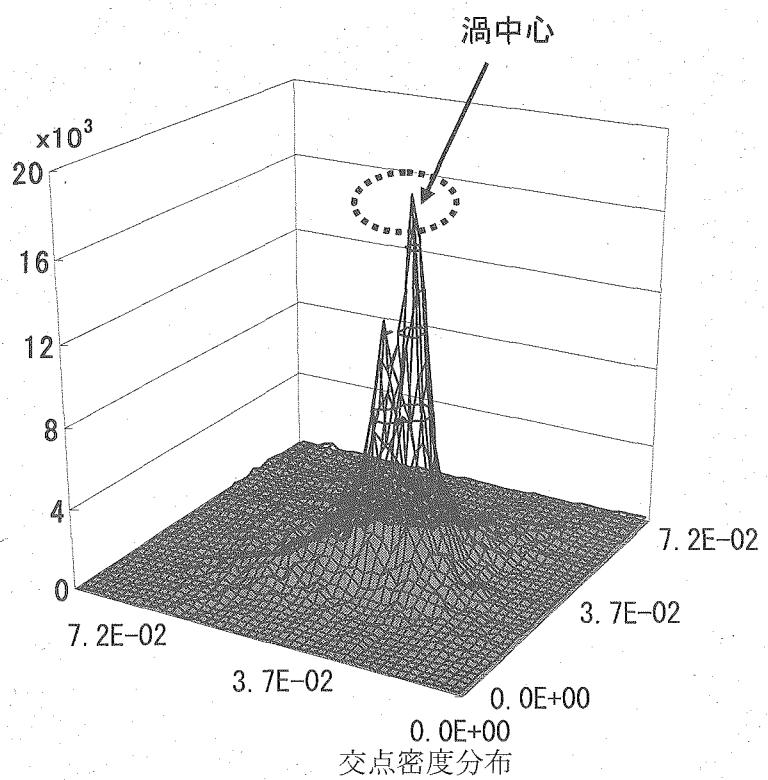


Fig. 4.4 渦中心の決定手法適用例 (Fig. 3.10 3秒時の速度分布に適用)

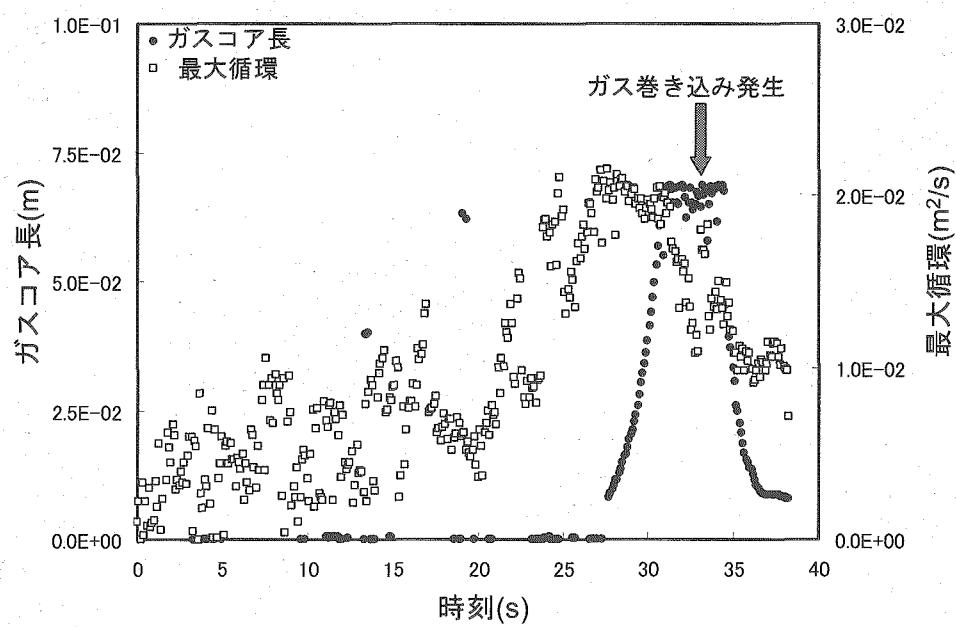


Fig. 4.5 循環-ガスコア長同時計測 1 (ガス巻き有り、液面下 1cm)

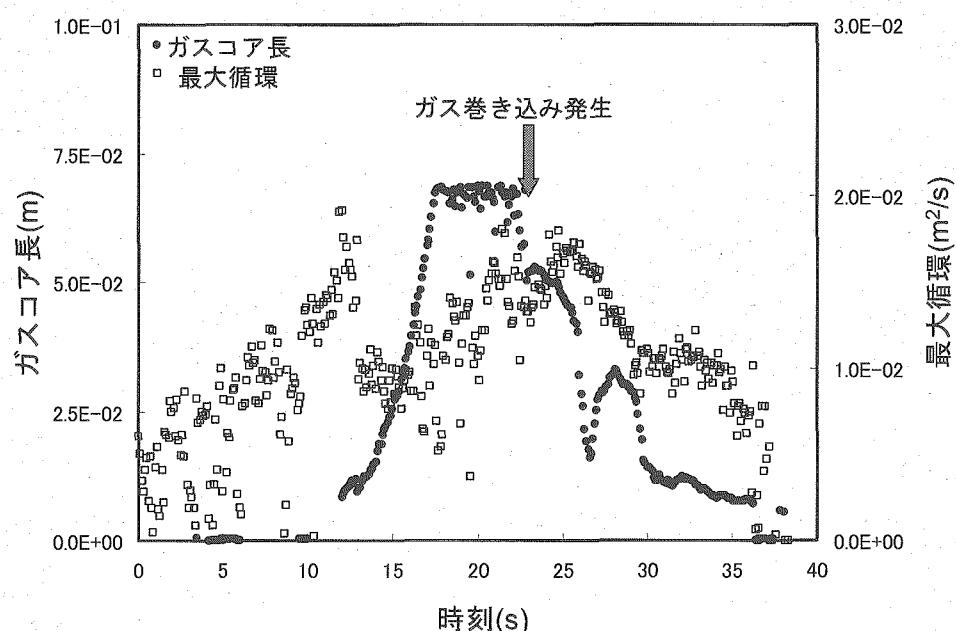


Fig. 4.6 循環-ガスコア長同時計測 2 (ガス巻き有り、液面下 1cm)

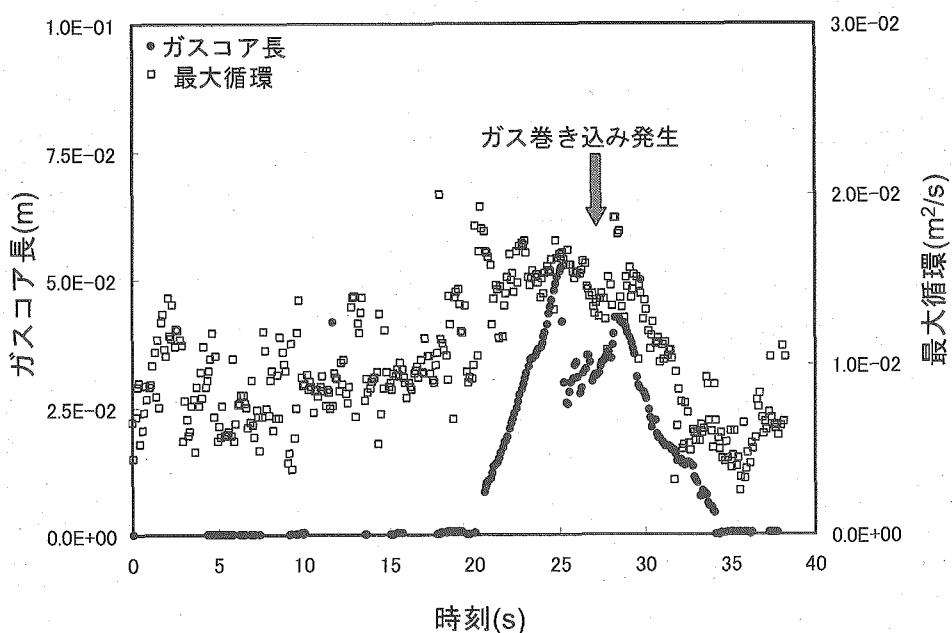


Fig. 4.7 循環-ガスコア長同時計測 3 (ガス巻き有り、液面下 5cm)

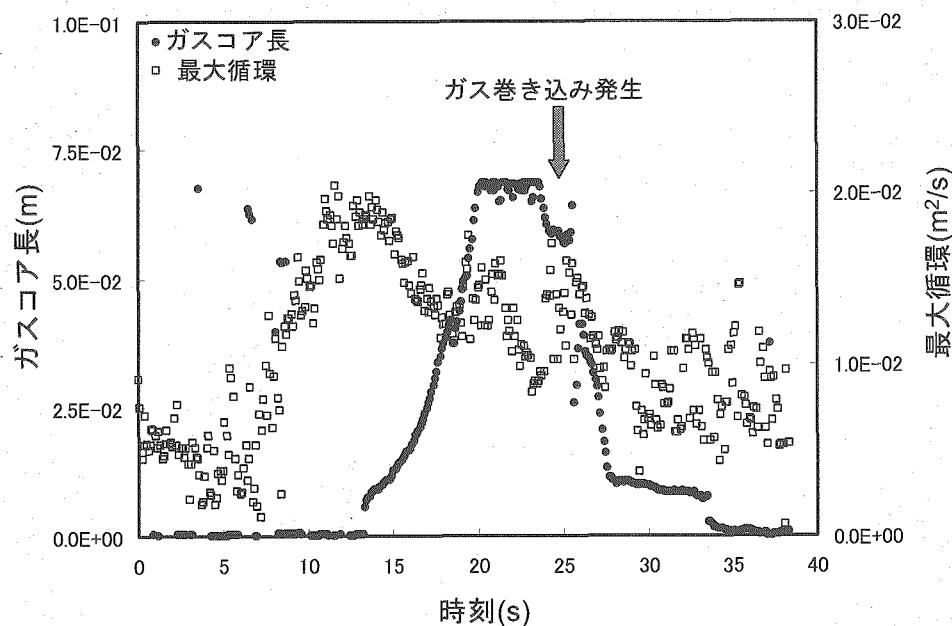


Fig. 4.8 循環-ガスコア長同時計測 4 (ガス巻き有り、液面下 5cm)

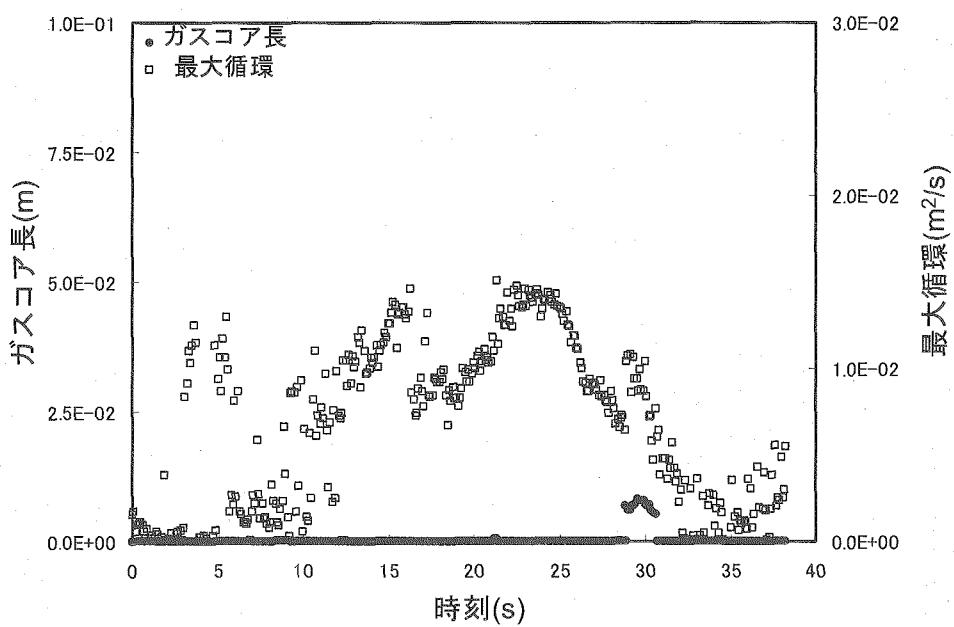


Fig. 4.9 循環-ガスコア長同時計測 5 (ガス巻き無し、液面下 1cm)

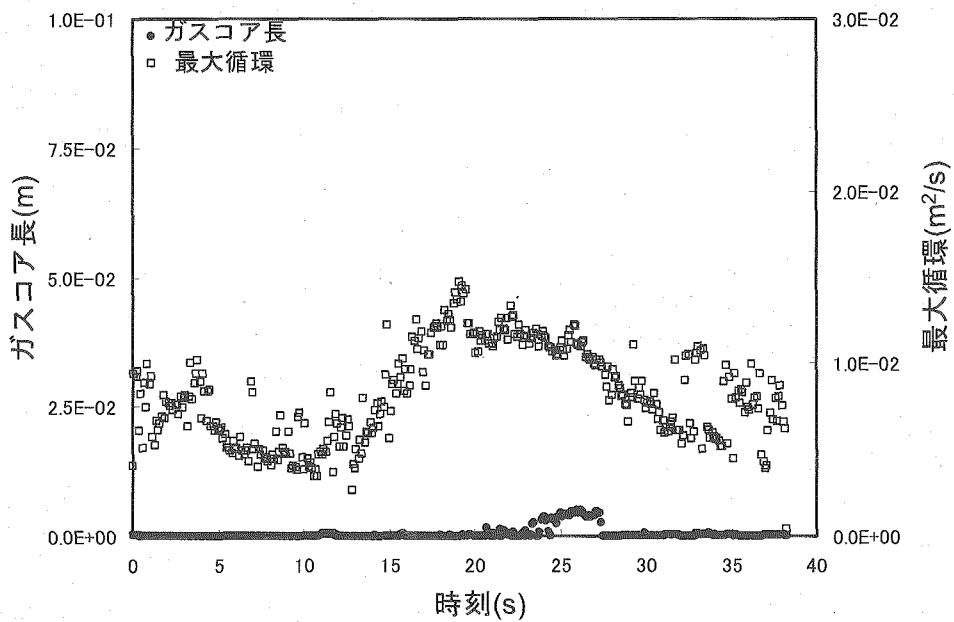


Fig. 4.10 循環-ガスコア長同時計測 6 (ガス巻き無し、液面下 5cm)

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位		
	名称	記号	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>	
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>	
速度	メートル毎秒	m/s	
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>	
波数	メートル毎秒	m <sup>-1</sup>	
密度(質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>	
質量体積(比体積)	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg	
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>	
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m	
(物質量)濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>	
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>	
屈折率(数の)	1	1	

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨーダ	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エク	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼット	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(a)</sup>	rad	$m \cdot m^{-1}$ <sup>(b)</sup>
立体角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	$m^2 \cdot m^{-2} = 1$ <sup>(b)</sup>
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
圧力	ニュートン	N	$N \cdot m^2$
応力	パスカル	Pa	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー、仕事、熱量	ジユール	J	$N \cdot m$
功率、放射束	ワット	W	$J/s$
電荷、電気量	クーロン	C	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	$C/V$
電気抵抗	オーム	Ω	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^2$
コンダクタンス	シemenス	S	$V/A$
磁束密度	テスラ	T	$A/V$
インダクタンス	ヘンリイー	H	$Wb/m^2$
セルシウス温度	セリヌシウス度 <sup>(d)</sup>	°C	$Wb/A$
照度	ルーメン	lm	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
(放射性核種)放射能吸収線量、質量エネルギー一分与、カーマ	ベクレル	Bq	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd$
線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個	シーベルト	Sv	$lm \cdot m^2$
人線量当量、組織線量当量			$m^2 \cdot s^{-2}$

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもつた量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa · s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
の分子濃度	ニュートンメートル	N · m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表面張力	ニュートンメートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} = s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s <sup>2</sup>	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量、エンタルピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム	J/(kg · K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エネルギー	モル毎ケルビン	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m · K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラード毎メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg \cdot s^{-4} \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol · K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
モル熱容量	ビン	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-2}$
放射強度	ワット毎平方メートル	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> · sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	L	1L=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1t=10 <sup>3</sup> kg
ネーベル	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2)ln10(Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49)×10 <sup>-19</sup> J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 <sup>-27</sup> kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 <sup>11</sup> m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1海里=1852m
ノット	ト	1ノット=1海里每時=(1852/3600)m/s
アーチル	a	1a=1 dam <sup>2</sup> =10 <sup>-2</sup> m <sup>2</sup>
ヘクタール	ha	1ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
バル	bar	1bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 <sup>5</sup> Pa
オンストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 <sup>-10</sup> m
バン	b	1b=100fm <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイナ	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ボアズ	P	1 P=1 dyn · s/cm <sup>2</sup> =0.1Pa · s
ストーカス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> /s=10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s
ガウス	G	1 G=10 <sup>-4</sup> T
エルステッド	Oe	1 Oe=(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 <sup>8</sup> Wb
スチル	sb	1 sb=1cd/cm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> cd/m <sup>2</sup>
ホル	ph	1 ph=10 <sup>4</sup> lx
ガル	Gal	1 Gal=1cm/s <sup>2</sup> =10 <sup>-2</sup> m/s <sup>2</sup>

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
X線単位	IX unit	1X unit=1.002×10 <sup>-3</sup> mm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 <sup>-26</sup> W · m <sup>-2</sup> · Hz <sup>-1</sup>
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット	Torr	1 metric carat = 200 mg = 2×10 <sup>-4</sup> kg
標準大気圧	atm	1 Torr = (101 325/760) Pa
カリ	cal	1 atm = 101 325 Pa
ミクロ	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m