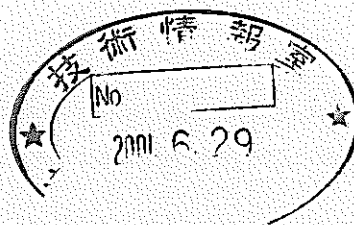


画像処理を用いた拡散律速型蒸発／凝縮モデルの検証
(研究報告)



2001年4月

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

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

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

画像処理を用いた拡散律速型蒸発／凝縮モデルの検証

(研究報告)

鈴木 徹*、山野秀将*、飛田吉春*、近藤 悟**

要 旨

高速増殖炉の炉心損傷事故を適切に評価するために開発された SIMMER-III コードの流体力学部では、多成分系多相流における相変化や伝熱などの複合現象が取り扱われる。従来の SIMMER-III の、いわゆる伝熱律速の概念に基づく蒸発／凝縮モデルでは、例えば、気相から気液界面までの熱流束と気液界面から液相までの熱流束との差を潜熱で除すことによって凝縮速度が評価される。ところで、気相に非凝縮成分が混在する場合、拡散抵抗の存在によって気相が純蒸気である場合と比べて気液界面の凝縮速度が著しく低下することが知られている。この現象を適切に記述するため、拡散律速の概念に基づく新たな蒸発／凝縮モデルの導入が行われてきた。また、このモデルを検証するための気泡凝縮実験が九州大学との共同研究として行なわれている。

本研究では、まず、この気泡凝縮実験で得られた可視化画像から気泡径やボイド率などを定量化するための画像処理プログラムを構築し、その妥当性を検討した。次に、SIMMER-III による解析を行い、解析結果を画像処理によって定量化した実験結果と比較した。その結果、拡散律速型の蒸発／凝縮モデルを導入した SIMMER-III は、伝熱律速型の蒸発／凝縮モデルを用いた従来の解析と比べて、非凝縮成分が混在する気泡の凝縮過程をより適切に再現できることが明らかになった。

* 大洗工学センター 要素技術開発部 リスク評価研究グループ

** 大洗工学センター 要素技術開発部

A Verification of Diffusion-Limited Vaporization/Condensation Model using Image-Processing

Tohru SUZUKI*, Hidemasa YAMANO*,
Yoshiharu TOBITA* and Satoru KONDO**

Abstract

Complex phenomena such as phase changes and heat transfers in multi-phase and multi-component flows are modeled in the fluid-dynamics portion of SIMMER-III, which was developed to appropriately assess core disruptive accidents in liquid-metal fast reactors. In the original SIMMER-III, the phase-change rate is evaluated based on the concept of heat-transfer-limited phase change. For example, the condensation rate is evaluated by first taking the difference between the heat fluxes from gas to interface and from interface to liquid, and then dividing it with the latent heat of vaporization. When a non-condensable component exists in a gas phase, it is known that the phase-change rate decreases remarkably due to diffusion resistance, in comparison to cases with pure vapor. In order to appropriately describe this effect, a new model using the concept of diffusion-limited phase change has been added to SIMMER-III. In order to validate this model, a series of bubble-condensation experiments is being performed as a joint research project with Kyushu University.

In the present study, an image-processing system is constructed in order to quantify bubble diameters and void fractions from visualizations of the bubble-condensation experiments. Then, the validity of the image-processing measurements are examined. Moreover, the experimental results obtained through the image-processing are compared with SIMMER-III analyses. As a result, it is found that SIMMER-III with the diffusion-limited model can more suitably represent condensation processes involving non-condensable components, than previous analysis with the heat-transfer-limited model.

* Nuclear System Safety Research Group, Advanced Technology Division O-arai, JNC

** Advanced Technology Division, O-arai, JNC

画像処理を用いた拡散律速型蒸発／凝縮モデルの検証

目 次

要 旨	i
Abstract	ii
目 次	iii
List of Figures	iv
1. 序 論	1
2. 伝熱律速型と拡散律速型の蒸発／凝縮モデル	2
3. 検証実験の概要	3
3.1. 実験装置の概略	3
3.2. 可視化画像の収録	4
4. 画像処理の概要	4
4.1. システムの構築	5
4.2. プログラムの概要	5
4.3. 気泡径とボイド率の定量化方法	6
5. 可視化画像の処理	6
5.1. 処理結果の妥当性に関する検討	7
5.2. 処理に用いる画像枚数の検討	7
5.3. 純粋な蒸気泡が凝縮する場合の処理結果	8
5.4. 非凝縮成分を含む蒸気泡が凝縮する場合の処理結果	9
6. SIMMER-III による気泡凝縮実験の解析	10
6.1. 解析体系と解析方法	11
6.2. 解析結果と実験結果との比較	11
6.3. 拡散律速型蒸発／凝縮モデルの検証に関する今後の課題	12
7. 結 論	12
記号表	13
謝 辞	14
参考文献	14
Appendix A 画像処理プログラムの使用方法	32
Appendix B 画像処理プログラム内におけるメッシュ・セルの設定	43
Appendix C 気泡重心、気泡径およびボイド率の算出方法	44
Appendix D 画像処理結果に基づく SIMMER-III の初期・境界条件	47

List of Figures

Fig. 1. Concepts of heat transfer-limited model and diffusion-limited model.	15
Fig. 2. Experimental apparatus.	16
Fig. 3. Flow chart of image processing program.	17
Fig. 4. Binary process.	18
Fig. 5. Particles for the calibration of image-processing.	19
Fig. 6. Validity of image-processing.	20
Fig. 7. Photographs of bubbly flows.	21
Fig. 8. Magnified photographs of bubbles.	22
Fig. 9. Effect of sampling time on void distribution.	23
Fig. 10. Effect of sampling time on the distributions.	24
Fig. 11. Experimental data for pure steam.	25
Fig. 12. Experimental data for steam-nitrogen mixture.	26
Fig. 13. Geometric model for analysis.	27
Fig. 14. Comparison between HTL model and experiment for pure steam system.	28
Fig. 15. Comparison between DL model and experiment for steam-nitrogen system.	29
Fig. 16. Comparison of void distributions between SIM-III analysis and experiment for steam-nitrogen system.	30
Fig. 17. Consideration of the condition which gives remarkable difference between DL and HTL models for steam-nitrogen system.	31

1. 序 論

高速増殖炉 (Fast Breeder Reactor: FBR) の炉心損傷事故 (Core Disruptive Accident: CDA) を適切に評価するために開発された SIMMER-III コードの流体力学部では、多成分系多相流の流動、伝熱および相変化が取り扱われる。損傷炉心内では、燃料、スチール、ナトリウム、FP ガスにより構成される炉心物質が熱力学状態の異なる蒸気成分として存在するため、相間の各接触界面では同時に複数の相変化が生じる。このような多成分系の相変化現象に対する評価手法の高度化を図ることは、熔融炉心物質の挙動を適切に把握する上で重要である。

従来の SIMMER-III では、例えば、気相から気液界面までの熱流束と気液界面から液相までの熱流束との差を潜熱で除すことによって凝縮速度を求めるなど、いわゆる伝熱律速の概念に基づいて相変化量が記述されている。この伝熱律速の概念によって定式化された SIMMER-III の相変化モデルの妥当性は、これまで、いくつかの検証解析によって確認されているが、一方で、蒸気に非凝縮成分が混在する場合の凝縮過程が適切に再現されないことも指摘されている^[1]。これは、非凝縮成分の存在によって蒸気側に拡散抵抗が生じるため、純蒸気の凝縮過程と比較して気液界面の凝縮速度が低下する現象が適切にモデル化されていないからである。このような基本現象は、FBR の事故解析では、特に炉心膨張過程における機械的エネルギーの緩和メカニズムである CDA 蒸気泡の凝縮効果を適切に評価する上で重要な現象である。したがって、SIMMER-III の検証研究においては、伝熱律速型の相変化モデルに加えて、非凝縮成分の拡散による影響を考慮に入れた拡散律速型の相変化モデルが導入されている。このモデルの改良と検証解析は現在の重要な課題である^[2]。

SIMMER-III の検証研究においては、サブクール水中での単一蒸気泡に関する検証解析^[1]が実施されているが、熔融炉心内で見られるような連続気泡群を対象とした蒸発/凝縮過程に関しても検証を行っておく必要がある。しかしながら、連続気泡群に対する拡散律速型の蒸発/凝縮モデルの適用性を直接検証できるような実験データは、これまでのところ見当たらない。そこで、このモデルを直接的に検証するための気泡凝縮実験がサイクル機構と九州大学との共同研究として行なわれているが、この実験においては流動状態の可視化画像から気泡群の定量的な情報をどのようにして得るかが問題となる。

本研究では、拡散律速型蒸発/凝縮モデルの検証に用いるために行われている非凝縮成分を含んだ蒸気泡群の凝縮実験において、画像処理を用いて気泡挙動を定量的に評価する方法を確立するとともに、得られた実験結果と拡散律速型の蒸発/凝縮モデルを導入した SIMMER-III の解析結果とを比較することに

よって、モデルの妥当性を検討することを目的とする。

2. 伝熱律速型と拡散律速型の蒸発／凝縮モデル

伝熱律速型と拡散律速型の蒸発／凝縮モデルの概念図を Fig. 1 に示す。現在の SIMMER-III では、気体－液体間の接触境界面で生ずる相変化挙動を界面における熱収支に基づいた伝熱律速型の相変化モデル^[2]で記述している。即ち、気液界面温度 T_{int} と気相のバルク温度 T_g との差に気相側の熱伝達係数を乗じた気相側熱流束を q_g とし、 T_{int} と液相のバルク温度 T_f との差に液相側の熱伝達係数を乗じた液相側熱流束を q_f とすると、単位界面面積あたりの相変化量は熱収支 $q_{int} (= q_g + q_f)$ を凝縮成分 M の相変化エンタルピー Δi_M で除すことによって記述されている。よって、質量移行率 Γ_M は、単位体積あたりの気液界面積を a_{int} とすると、

$$\Gamma_M = \frac{a_{int} q_{int}}{\Delta i_M} = \frac{a_{int} [h_g (T_{int} - T_g) + h_f (T_{int} - T_f)]}{\Delta i_M} \quad (1)$$

と表される。なお、式(1)において $q_{int}=0$ の場合は気液界面での相変化が生じず顕熱が交換されることになる。また、 $q_{int} > 0$ の場合は蒸気の凝縮が起こり、 $q_{int} < 0$ の場合は液相の蒸発が起こる。以上の伝熱律速型の相変化モデルでは、相変化を起こさない成分の拡散抵抗は考慮されていない。

一方、拡散律速型の蒸発／凝縮モデル^[2]では、気液界面における各蒸気成分の濃度勾配すなわち拡散抵抗が考慮されている。凝縮成分 M と非凝縮成分 N が気相側で混在するとき、対流による物質輸送を考慮した移動係数 k_M^* を用いて成分 M についての拡散方程式を変形すると、成分 M の質量流束 n_M は

$$n_M = k_M^* (\omega_{M,int} - \omega_{M,g}) + \omega_{M,int} n_M \quad (2)$$

で表される。ここで、 $\omega_{M,int}$ および $\omega_{M,g}$ はそれぞれ気液界面および気相のバルクにおける成分 M の質量分率である。 k_M^* と物質移動係数 k_M との間には

$$k_M^* = \frac{\ln(R_{mM} + 1)}{R_{mM}} k_M, \text{ where } R_{mM} = \frac{\omega_{M,int} - \omega_{M,g}}{1 - \omega_{M,int}} \quad (3)$$

の関係があるので、式(3)を式(2)に代入して整理すれば、拡散抵抗を考慮した場合の成分 M の質量移行率は次の式で表される。

$$\Gamma_M = -a_{int} n_M = -a_{int} \left\{ k_M \ln \left(\frac{1 - \omega_{M,g}}{1 - \omega_{M,int}} \right) \right\} = -a_{int} \left\{ k_M \ln \left(\frac{\omega_{N,g}}{\omega_{N,int}} \right) \right\} \quad (4)$$

本研究では、気相側には凝縮成分 M と非凝縮性分 N のみが存在している 2 成分系の場合を考えているので、

$$\omega_{M,g} + \omega_{N,g} = 1, \text{ and } \omega_{M,int} + \omega_{N,int} = 1 \quad (5)$$

である。

以上を SIMMER-III の質量、運動量およびエネルギーの各保存式と結合して解くことによって蒸発/凝縮に伴う熱および質量移行率を求め、気泡径やボイド率などの流動特性を決定する諸量を解析する。

3. 検証実験の概要

序論で述べたように、拡散律速型蒸発/凝縮モデルの気泡群への適用性を直接的に検証できるような実験データは現在のところ見当たらない。そこでサイクル機構と九州大学との共同研究として非凝縮成分を含む気泡群の凝縮過程を検討するための実験が行われている。この実験では、水を満たした矩形プールの底面から水蒸気（凝縮成分）と窒素（非凝縮成分）の混合気体を吹き込んで流動状態を観察するとともに、可視化画像から気泡径およびボイド率を定量化する。実験から得られた知見および結果を SIMMER-III の解析結果と比較し、拡散律速モデルの気泡群への適用性を検討する。

3. 1. 実験装置の概略

実験装置の概略を Fig. 2 に示す。実験で用いた矩形水槽は前面と背面がパイレックスガラス製であり、側面はステンレス製である。水槽の内側寸法は高さ 500mm、幅 300mm、奥行き 30mm である。この水槽に液位が 400mm になるように脱気した蒸留水を入れた。水槽の底部にはガス・プレナムが設けてあり、プレナムには直径 1mm のガス注入ノズルが 40mm 間隔で 5 つ取り付けられている。

水槽の背面には水槽内を加熱するためのパイレックスガラス製ジャケットが取り付けられており、ジャケット内では電気ヒータで加熱した温水を攪拌した。この電気ヒータの出力を調整することによって水槽内の温度を一定に保つ。

凝縮成分として水槽内に吹き込む水蒸気はガス・プレナムに接続した蒸気発生器で生成させた。非凝縮成分の窒素ガスはガス・ボンベから蒸気発生器に供給した。水蒸気の体積流量 Q_s は凝縮して水槽からオーバーフローした水の量から換算し、窒素ガスの体積流量 Q_n は流量計を用いて計測した。実験に際しては、気泡が分裂や合体をほとんど起こさず、さらに可視化画像上でも気泡の重なりが生じないように、蒸気発生器内の電気ヒータの出力や窒素ガスの流量を適宜、調節した。

3. 2. 可視化画像の収録

実験装置内で形成した気泡流を可視化する際には、気泡の輪郭を明瞭にとらえることができるように装置背面からの透過光照明を利用した。水槽の背面に設置した温水ジャケットは透明なので、光を散乱させるためにジャケットの背面に白色のポリプロピレンのフィルムを貼りつけた。光源はハロゲンランプである。

流動状態の可視化画像を収録する際には 2 台のビデオカメラを用いて同時撮影を行った。1 台は装置内の全体的な気泡分布を撮影するための SONY 製デジタルカメラであり、他の 1 台は画像処理を施して気泡径やボイド率を定量化するための菱光社製高速度ビデオカメラである。撮影時の露光時間はいずれのカメラも 1/10000 秒に設定した。また、高速度カメラのフレームレートはデジタルカメラと同様に毎秒 30 コマに設定し、フルスペックである毎秒 500 コマという機能は用いなかった。これは、画像処理によって気泡径やボイド率を定量化する際、時間平均値が必要なため、処理画像の枚数を少なくすることによって処理時間の軽減を図りたかったからである。

このようにして撮影した可視化画像から気泡の分布状態および流動状態を観察するとともに、次節に述べる画像処理システムを用いて気泡径とボイド率の定量化を行った。

4. 画像処理の概要

実験で得られた可視化画像に各種の処理を施し、気泡径やボイド率などの物理量を定量化するためには、まず、ビデオテープに収録した画像を連続的にデジタル化してコンピュータに取り込むシステムが必要である。次に、そのデジ

タル画像に対して種々の演算を施すための画像処理プログラムが必要である。この画像処理プログラムに関しては、市販のソフトウェアには必要な機能を備えたものがないために、RAD (Rapid Application Development) ツールである Delphi を用いて全て独自に開発した。これらの概要を以下に述べるとともに、気泡径やボイド率の定量化方法について言及する。

4. 1. システムの構築

ビデオテープに収録した画像を連続的にデジタル化してコンピュータに取り込む際には市販の画像変換ボード (MACNICA製 Videum AV) を用いた。このボードによってビデオテープに記録されたアナログ信号はデジタル動画である avi 形式のファイルとしてコンピュータに転送・保存される。ただし、後述の画像処理プログラムを用いて各種の演算を行う場合、一旦、avi形式のファイルを時間的に連続する複数の静止画 (bmp形式) に変換しなければならない。この変換には市販のアプリケーション (Canopus製 Media Studio) を用いた。このアプリケーションを用いれば、変換された bmp形式の静止画には時間的な順序に対応した通し番号が付される。本研究で作製した画像処理プログラムでは、この通し番号の順に静止画像を逐次読み込むことでフレームの更新を実行し、連続的な処理を行った。

4. 2. プログラムの概要

RAD ツールである Delphi を用いて開発した画像処理プログラムは、bmp 形式に変換された気泡流の可視化画像を連続的に読み込み、各種の演算を施して気泡流中の気泡径やボイド率を定量化することができる。このプログラムの最大の特徴は、画像上に SIMMER-III コードと全く同様のメッシュ・セルを設定し、各セル内の物理量を算出できることにある。すなわち、プログラムから出力される気泡径やボイド率の処理結果は、SIMMER-III の解析結果と直接比較を行うことができる。

プログラムを実行するにあたっては、実際の気泡流の可視化画像のほかに、気泡を吹き込まないときの背景画像が予め必要である。Fig. 3 にアルゴリズムの概要を示す。具体的な処理手順は次の通りである。まず、連続画像の 1 枚目を原画像として入力し、続いて背景画像を取り込む。次に、SIMMER-III コードの入力ファイルと同様の解析メッシュを画像上に設定する。その後、原画像から背景画像を除去して気泡のみを抽出し、2 値化処理を行う。その一例を Fig. 4 に示す。続いて、2 値化画像上で各気泡に通し番号を付ける、いわゆるラベリング処理を行い、この通し番号を媒介変数として各気泡の重心位置と直径を配列に格納する。1 枚目の原画像に対して以上の処理が終了すれば、フレームを更新し

て時間的に連続する次の画像を読み込み、同様の処理を行う。当初指定した枚数だけ画像の処理が終了すれば、設定した各セルごとに時間平均した気泡径およびボイド率が出力される。

なお、上記と同様の処理は単一の画像に対しても施すことができるようになっているが、使用方法の詳細に関しては、**Appendix A**に記載した。また、プログラム内における具体的なメッシュの設定方法については、**Appendix B**に記した。

4. 3. 気泡径とボイド率の定量化方法

2次元的に撮影した可視化画像から気泡径やボイド率のような3次元的な値を定量化する際には何らかの仮定が必要となる。この画像処理プログラムでは、可視化画像から気泡径やボイド率を定量化する際には、気泡の円相当径を用いている。すなわち、気泡径は、可視化画像上の2次元的な気泡の映像と等しい面積をもつ円の直径として定義している。実験に際しては、楕円体に近い形状の気泡が分裂や合体をほとんど起こさないように、さらに、画像上での気泡どうしの重なりもほとんど生じないように実験条件を調節しているため、このような定義が可能である。また、通常の抵抗係数モデル^[3]などでは気泡と体積が等しい球の直径が用いられていることと比較しても、本プログラムで採用した方法は妥当であると考えられる。一方、ボイド率に関しては、この円相当径を用いて算出した気泡体積を所定のセル体積で除すことによって求めている。ここで、セル体積は、画像上に設定した縦方向および横方向のメッシュサイズに水槽の奥行き方向の厚み (=30mm) を乗じて求めた。

これらの気泡径およびボイド率の算出方法に関するより具体的な記述は**Appendix C**に譲る。

また、以上のような気泡径およびボイド率の算出方法の妥当性と計測精度についての議論は5. 1.で行う。

5. 可視化画像の処理

画像処理を用いて気泡群の凝縮挙動を定量化する場合、処理結果の精度に関する検討が必要である。また、気泡径やボイド率の時間平均値を得る場合には、処理に用いる画像枚数すなわちサンプリング時間に関して予め議論しておく必要がある。これらについて以下に述べるとともに、実際に可視化画像を処理した結果を示す。

5. 1. 処理結果の妥当性に関する検討

気泡径およびボイド率に関する画像処理結果の妥当性を確認するために、気泡を模擬した回転楕円体状の固体粒子を用いて検定を行った。

まず、Fig. 5 に示すように水を満たした実験装置内に複数の固体粒子を吊り下げ、この状態を撮影した画像を処理して粒子の直径と体積率を求めた。

次に、固体粒子を実験装置から取り出し、各粒子の長軸・短軸の長さをノギスを用いて実測するとともに、水を満たしたメスシリンダー内に浸して上昇水位から粒子の体積を求めた。これらの値から固体粒子の相当直径および実験装置内での粒子の体積率を換算し、画像処理で得られた結果と比較した。

Fig. 6(a)は画像処理で求めた個々の粒子の直径 $D_p(n)_{\text{image}}$ とノギスの実測値から求めた粒子の直径 $D_p(n)_{\text{direct}}$ とを比較した結果である。この図から、 $D_p(n)_{\text{image}}$ は $D_p(n)_{\text{direct}}$ と比べて、ほぼ 10% 以内の誤差で一致していることがわかる。したがって、実際の気泡流において画像処理プログラムを用いて定量化した各気泡の大きさに関しても妥当な値が得られるものと考えられる。

また、画像処理で求めた粒子の体積率 $\alpha_{p, \text{image}}$ とメスシリンダーの計測値から換算した粒子の体積率 $\alpha_{p, \text{direct}}$ との比較を Fig. 6(b) に示す。この図から、画像処理の結果は体積率を過大評価していることがわかる。したがって、実際の気泡流の可視化画像を処理した際、得られるボイド率も過大評価されると考えられる。この原因は、個々の固体粒子（あるいは気泡）の体積が円相当径で与えられる球の体積に等しいと仮定していることに起因する。これは、2 次元的な画像から体積率のような 3 次元的な値を求めることの限界とも考えられるが、実際の気泡流においてボイド率を定量化する際には Fig. 6(b) の相関をもとにした補正係数を乗じることによって、画像処理計測の精度を向上させることができる。すなわち、実際のボイド率は画像処理で定量化した値の 0.607 倍程度であるとみなすことができる。そこで、次節以降で用いるボイド率の実験結果に関しては、画像処理の結果にこの補正係数を乗じた値を用いることとする。

5. 2. 処理に用いる画像枚数の検討

実際の気泡群の挙動を可視化した例を Fig. 7 および Fig. 8 に示す。Fig. 7 はデジタルカメラで撮影した全体的な気泡の挙動を示しており、(a) は純粋な水蒸気、(b) は 1.8% の体積割合で窒素ガスを水蒸気に混入した場合、(c) は 2.7% の体積割合で窒素ガスを混入した場合である。水蒸気のみを吹き込んだ実験では、気泡がほぼ鉛直方向に上昇し、凝縮・消滅する様子が観察された。これに対し、窒素ガスを混入した実験では、気泡が完全に消滅することはなかった。また、2.7% の窒素を混入した実験では、気泡の分布状態が時間の経過とともに左右に揺動する様子が観察された。一方、Fig. 8 は画像処理に用いるために高速度カメラで

撮影した気泡挙動を示している。この写真から、純蒸気の場合、気泡が上昇するにつれて気泡径が減少していることがはっきりと確認できる。これに対し、窒素を混入した場合、気泡径の減少を目視で確認することは難しいため、画像処理による定量化が必要となってくる。気泡径およびボイド率を画像処理で定量化した結果については、5. 3. および 5. 4. で述べる。

さて、実際の気泡群の流動では、時間とともに気泡の分布状態が変化する。したがって、気泡径やボイド率の分布を検討する際には、時間平均した値が必要となる。そこで、まず、時間平均量を求める際に必要となる画像枚数すなわちサンプリング時間に関して検討した。

Fig. 9 は、水蒸気のみを吹き込んだ実験において、サンプリング時間が変化した場合の時間平均ボイド率の空間分布 $\alpha(x, y)$ を示している。上段は市販ソフトの Delta Graph を用いて表示したものであり、下段は SIMMER-III の post-processing ツールである vcplot を用いて表示したものである。この図から時間平均に用いるサンプリング時間が長くなると、個々の気泡の輪郭が消え、気泡の分布状態が左右対称に近づいていくことがわかる。

このサンプリング時間の影響を定量的に示したのが Fig. 10 である。Fig. 10 は、Fig. 9 と同じ実験条件における気泡径の鉛直方向分布 $\langle D_b \rangle(y)$ およびボイド率の鉛直方向分布 $\langle \alpha \rangle(y)$ を示している。この図から時間平均のためのサンプリング時間が長くなると、 $\langle D_b \rangle(y)$ および $\langle \alpha \rangle(y)$ の分布形状が滑らかな曲線に近づいていることがわかる。さらに、サンプリング時間は 10 秒程度あれば充分であることがわかる。したがって、本研究では画像処理から得られる時間平均量を用いる際には 10 秒間の時間平均値を用いることにする。

5. 3. 純粋な蒸気泡が凝縮する場合の処理結果

Fig. 10 に示したように、純粋な水蒸気のみを吹き込んだ場合、十分なサンプル時間で時間平均した $\langle D_b \rangle(y)$ は、一旦増加した後、減少して 0 に漸近する。また、 $\langle \alpha \rangle(y)$ に関しても同様の傾向が認められる。このように時間平均した気泡径やボイド率の y 方向分布が極大値を持つ原因は、ノズルから離脱する前の形成途中の気泡が撮影されていたためと考えられる。実際の熔融炉心などにおいては、このような形成途中の気泡についても詳細な検討が必要であると考えられるが、本研究の主目的は拡散律速型の蒸発/凝縮モデルを検証することにあるので、解析体系の底面において気泡が完全に成長している方が検証実験のデータとして望ましい。これは、SIMMER-III コードで用いられている運動量相関式や熱伝達相関式が準定常状態の相関に基づいているために、底面より下側で準定常状態に発達した気泡流が低温場に流入して凝縮が開始すると仮定した方が、SIMMER-III で実験を再現するには合理的だからである。

そこで、Fig. 11 に示したように、画像処理から得られた気泡径分布およびボイド率分布において、極大値より右側のデータを多項式近似を用いて外挿し、その結果を実験結果として SIMMER-III の解析結果と比較することにする。特に、ボイド率を外挿する際には、 $y = 0$ におけるボイド率 $\langle \alpha \rangle(0)$ が次のドリフト相関式^[4]を満たすようにした。

$$\langle \alpha \rangle(0) = \frac{j_g}{C_0 \cdot j_g + V_{gj}} \quad (6)$$

ここで、 j_g は吹き込んだガスの体積流束であり、実測したガス流量から求めることができる。また、 C_0 は分布パラメータであり、本実験のように断面が矩形の体系では、

$$C_0 = 1.35 - 0.35 \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_f}} \quad (7)$$

で与えられる^[5]。さらに、ドリフト速度 V_{gj} には、SIMMER-III の運動量交換関数で用いられているドリフト速度と近似的に等しい次の式^[5]を用いた。

$$V_{gj} = \sqrt{2} (1 - \langle \alpha \rangle(0))^{1.75} \left(\frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_f^2} \right)^{0.25} \quad (8)$$

Fig. 11 においては、画像処理から直接得られた気泡径およびボイド率の分布を○印で示しており、上記の仮定に基づいた外挿結果を□印で示している。気泡径およびボイド率は y の値が大きくなると減少し、特に後者は急激に 0 に漸近していることがわかる。

5. 4. 非凝縮成分を含む蒸気泡が凝縮する場合の処理結果

窒素ガスを混入したときの時間平均気泡径および時間平均ボイド率の画像処理結果を Fig. 12 に示す。窒素ガスを混入した場合も、純粋な水蒸気を吹き込んだ場合と同様に、 $\langle D_b \rangle(y)$ および $\langle \alpha \rangle(y)$ は、一旦、極大値を取った後に減少する。そこで、この場合も水蒸気のみを吹き込んだ場合と同様に、画像処理から直接得られた値を式(6)~(8)をみたすように多項式近似で外挿し、その結果を実験結

果として次節以降で用いることにする。

Fig. 12 に示した結果を Fig. 11 の結果と比較すると、窒素ガスの混入により気泡の凝縮の仕方が顕著に異なっていることがわかる。すなわち、純粋な蒸気のみを吹き込んだ場合には、 y の増加とともに $\langle D_b \rangle(y)$ および $\langle \alpha \rangle(y)$ は 0 に漸近していたが、窒素を混入した場合には、 $\langle D_b \rangle(y)$ は 4mm 程度、 $\langle \alpha \rangle(y)$ は 0.015 程度の値にそれぞれ漸近していることがわかる。

6. SIMMER-III による気泡凝縮実験の解析

サイクル機構で開発中の SIMMER-III コードは 2 次元、3 速度場、多相多成分、オイラー座標系の流体力学部を空間依存の核的動特性計算部と有機的に結合させた核熱流動の総合コードである^[6]。流体力学部の大まかなアルゴリズムは AFDM コード^[7]で開発された半陰解法の時間積分法 (4 ステップ法) に基づいており、ステップ 1 でセル内の境界面積のソース項、熱と物質の移行および運動量交換関数を計算した後に、ステップ 2~4 でセル間の対流を計算する。すなわち、セル内とセル間の計算を分離して行う。

SIMMER-III で用いられている質量、運動量およびエネルギーの各基礎方程式はそれぞれ次の通りである^[8]。

$$\frac{\partial \bar{\rho}_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho}_m \mathbf{v}_q) = -\Gamma_m \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho}_q \mathbf{v}_q}{\partial t} + \sum_{m \in q} \nabla \cdot (\bar{\rho}_m \mathbf{v}_q \mathbf{v}_q) + \alpha_q \nabla p - \bar{\rho}_q \mathbf{g} + K_{qS} \mathbf{v}_q - \sum_{q'} K_{qq'} (\mathbf{v}_{q'} - \mathbf{v}_q) - VM_q \\ = - \sum_{q'} \Gamma_{qq'} [H(\Gamma_{qq'}) \mathbf{v}_q + H(-\Gamma_{qq'}) \mathbf{v}_{q'}] \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho}_M e_M}{\partial t} + \sum_{m \in M} \nabla \cdot (\bar{\rho}_m e_m \mathbf{v}_q) + p \left[\frac{\partial \alpha_M}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_M \mathbf{v}_q) \right] \\ - \frac{\bar{\rho}_M}{\rho_q} \left[\sum_{q'} K_{q'q} (\mathbf{v}_q - \mathbf{v}_{q'}) \cdot (\mathbf{v}_q - \mathbf{v}_{q'}) + K_{qS} \mathbf{v}_q \cdot (\mathbf{v}_q - \mathbf{v}_{qS}) - VM_q \cdot (\mathbf{v}_q - \mathbf{v}_{GL}) \right] \\ = Q_N + Q_{MF}(\Gamma_{MF}) + Q_{VC}(\Gamma_{VC}) + Q_{HT}(h, a, \Delta T) \end{aligned} \quad (11)$$

これらの各保存式を式(2)~(5)と結合して、拡散律速型の蒸発/凝縮モデルを用いた解析を行う。

6. 1. 解析体系と解析方法

解析は直角座標 2 次元体系で行った。すなわち、実験装置の水槽内では奥行き方向に物質、運動量およびエネルギーの輸送が行われないものと仮定した。

解析体系の概略を Fig. 13 に示す。解析体系は高さ 440mm、幅 300mm に設定した。水平方向には両端に幅 10mm のセルを設定し、それらの間に幅 8mm のセルを等間隔に 35 個設定した。また、鉛直方向には底面から高さ 8mm のセルを 51 個、その上に高さ 16mm のセルを 2 個設定した。なお、実験ではガスを吹き込む前の装置内の液位は 400mm であったが、ガス注入ノズル先端からの水位は 384mm であった。したがって、SIMMER-III の解析体系では、解析開始時に下から 48 番目のセルまでが单相の水で満たされているとし、それより上側はカバーガスで覆われているものとした。水槽内の温度条件は実験と同じである。体系上端の圧力は大気圧で与えた。また、体系下端の圧力は、大気圧、水頭圧およびガスがノズルを通過する時の圧力損失の和で与えた。ガスは体系底面の中央 200mm の領域から実験条件から換算した流量で一様に吹き込むことを想定した。吹き込んだガスの温度は体系下端の圧力における飽和温度で与えた。以上のガス吹き込み口における初期・境界条件の与え方の詳細は Appendix D に記載した。なお、実際の実験では気泡の分裂や合体がほとんど認められなかったため、解析においても分裂・合体に伴う気液界面積の変化は考慮していない。また、気泡径およびボイド率の時間平均値を求める際には、ガスが体系全体に拡がった後の 10 秒間で解析結果を平均した。

6. 2. 解析結果と実験結果との比較

水蒸気のみを吹き込んだ場合の気泡群の凝縮過程を、伝熱律速モデルを用いた従来の SIMMER-III で解析した結果を Fig. 14 に示す。Fig. 14 より気泡径の鉛直方向分布およびボイド率の鉛直方向分布の双方に関して実験結果が適切に再現されていることがわかる。すなわち、水蒸気のみを吹き込んだ場合の気泡群の凝縮過程は、伝熱律速型の蒸発／凝縮モデルを用いている従来の SIMMER-III で適切に再現できるものと考えられる。

一方、水蒸気に窒素を混入した場合の凝縮過程を解析した結果を示したものが Fig. 15 である。従来の伝熱律速モデルを用いた SIMMER-III による解析結果は、気泡径およびボイド率を若干、過少評価していることがわかる。これは、非凝縮成分である窒素の拡散抵抗が考慮されていないため、水蒸気の凝縮速度が過大評価された結果と考えられる。これに対し、拡散律速モデルを組み込んだ解析結果は、伝熱律速モデルを用いた場合と比べて、より実験結果に近い値を与えていることがわかる。これは、窒素の拡散抵抗が考慮されているため、水蒸気の凝縮速度が伝熱律速モデルより適切に評価された結果であると考えら

れる。

この拡散律速型の蒸発凝縮モデルを用いて解析した瞬時的なボイド率分布の時間変化を実験結果と比較したものが Fig. 16 である。Fig. 16 において上段は実験の可視化画像を処理して得られた結果を SIMMER-III の post-processing ツールである vcplot で表示したものであり、下段は拡散モデルの解析結果を同じく vcplot で表示したものである。窒素を混入した実験では、水蒸気のみを吹き込んだ場合と異なり、体系内の気泡分布が時間とともに左右に揺動する状態が観察されたが、解析結果からも同様の傾向が得られていることがわかる。この揺動の周期は実験においても SIMMER-III の解析においても約 12 秒であった。

以上より、時間平均した気泡径やボイド率の定量的な分布だけでなく、瞬時的なボイド挙動も拡散律速モデルを用いた SIMMER-III によって定性的に再現可能であると考えられる。

6. 3. 拡散律速型蒸発／凝縮モデルの検証に関する今後の課題

Fig. 15 に示したように、拡散律速モデルは従来の伝熱律速モデルと比べて、より適切に実験結果を再現できることが明らかになった。しかし、今回の実験条件では、モデルの違いが解析結果の差異に与える影響はあまり顕著ではなかった。そこで、モデルの違いが顕著に現れる条件を検討した。Fig. 17 にその一例を示す。この図から初期気泡径が大きい方が顕著な差異は現れやすいと考えられる。また、吹き込むガスの温度とプールの水温の差、即ちサブクール度が大きい方が差異は現れ易いと考えられる。今後は、このような予備的な解析に基づいて、より適切な条件のもとで実験を行い、データを取得する必要がある。

7. 結 論

SIMMER-III コードに導入された拡散律速型の蒸発／凝縮モデルを検証するために行った本研究の成果をまとめると、以下のようになる。

- (1) 非凝縮成分を含む気泡群の凝縮実験において、気泡径およびボイド率を定量化するための画像処理プログラムを開発し、その妥当性を検討した。
- (2) 開発した画像処理プログラムを用いて、実際の気泡凝縮実験から定量的な実験データを得た。
- (3) SIMMER-III コードによる解析結果と実験結果とを比較検討した。その結果、拡散律速型の蒸発／凝縮モデルを導入した SIMMER-III は、伝熱律速モデルを用いた従来の SIMMER-III と比べて、非凝縮成分が混在する気泡群の凝縮過程をより適切に再現できると考えられる。

記号表

a_{int}	単位体積あたりの気液界面積	[1/m]
C_0	分布パラメータ	[-]
D_b	気泡径	[m]
$\langle D_b \rangle$	断面平均気泡径	[m]
$D_p(n)_{direct}$	実測した n 番目の固体粒子の相当径	[m]
$D_p(n)_{image}$	画像処理で求めた n 番目の固体粒子の相当径	[m]
h_g	気相側熱伝達係数	[J/m ² ·s·K]
h_f	液相側熱伝達係数	[J/m ² ·s·K]
j_g	気相の体積流束	[m/s]
k_M	成分 M (凝縮成分) の気相側物質移動係数	[kg/m ² ·s]
k_M^*	対流を考慮したときの成分 M の気相側物質移動係数	[kg/m ² ·s]
n_M	成分 M (凝縮成分) の質量流束	[kg/m ² ·s]
Q_n	窒素の体積流量	[m ³ /s]
Q_s	水蒸気の体積流量	[m ³ /s]
q_f	液相側熱流束	[J/m ² ·s]
q_g	気相側熱流束	[J/m ² ·s]
q_{int}	気液界面における熱収支 (= $q_g + q_f$)	[J/m ² ·s]
T_f	液相バルク温度	[K]
T_g	気相バルク温度	[K]
T_{int}	気液界面温度	[K]
V_{gj}	ドリフト速度	[m/s]
y	水槽底面からの鉛直方向距離	[m]
α	ボイド率	[-]
$\langle \alpha \rangle$	断面平均ボイド率	[-]
$\alpha_{p, direct}$	実測した固体粒子の体積率	[-]
$\alpha_{p, image}$	画像処理で求めた固体粒子の体積率	[-]
Δi_M	成分 M (凝縮成分) の凝縮エンタルピー	[J/kg]
$\Delta \rho$	気液密度差	[kg/m ³]
Γ_M	成分 M (凝縮成分) の質量移行率	[kg/m ³ ·s]
ρ_f	液体密度	[kg/m ³]
ρ_g	気体密度	[kg/m ³]
σ	表面張力	[N/m]
$\omega_{M, g}$	気相バルクにおける成分 M (凝縮成分) の質量分率	[-]

$\omega_{M, int}$	気液界面における成分 M (凝縮成分) の質量分率	[-]
$\omega_{N, g}$	気相バルクにおける成分 N (非凝縮成分) の質量分率	[-]
$\omega_{N, int}$	気液界面における成分 N (非凝縮成分) の質量分率	[-]

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、有用なご助言を賜りました九州大学・福田研二教授ならびに守田幸路助教授に感謝致します。また、実験データの取得に関してご協力を頂きました九州大学・松元達也助手、同大学院生・高江俊介氏、宇山孝士氏に御礼申し上げます。

参考文献

1. Kondo, Sa., et al., "Status and Achievement of Assessment Program for SIMMER-III, A Multiphase, Multicomponent Code for LMFR Safety Analysis," *Proc. 8th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-8)*, Vol. 3, pp. 1340-1348, Kyoto, Japan (1997).
2. 守田他, "多成分多相流の熱流動現象の数値シミュレーションに関する研究," JNC TY9400 2000-013 (2000).
3. Ishii, M. and Zuber, N., "Drag Coefficient and Relative Velocity in Bubbly, Droplet or Particulate Flow," *AICHE J.*, Vol. 25, pp. 843-855 (1979).
4. Kataoka, I. and Ishii, M., "Drift Flux Model for Large Diameter Pipe and New Correlation for Pool Void Fraction," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 30, pp. 1927-1939 (1987).
5. Ishii, M. and Chawla, T. C., "Local Drag Lows in Dispersed Two-Phase Flow," *Argonne National Laboratory report*, ANL-79-105 (1979).
6. Kondo, Sa., et al., "SIMMER-III: An Advanced Computer Program for LNFBR Severe Accident Analysis," *Proc. International Conference on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plant (ANP-92)*, Vol. IV, 40-5, Tokyo, Japan (1992).
7. Bohl, W. R., et al., "The AFDM Program: Scope and Significance," *Proc. International Fast Reactor Safety Meeting*, Snowbird Utah, U. S. A. (1990).
8. Morita, K., et al., "SIMMER-III Applications to Key Phenomena of CDAs in LMFR," *Proc. 8th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-8)*, Vol. 3, pp. 1332-1339, Kyoto, Japan (1997).

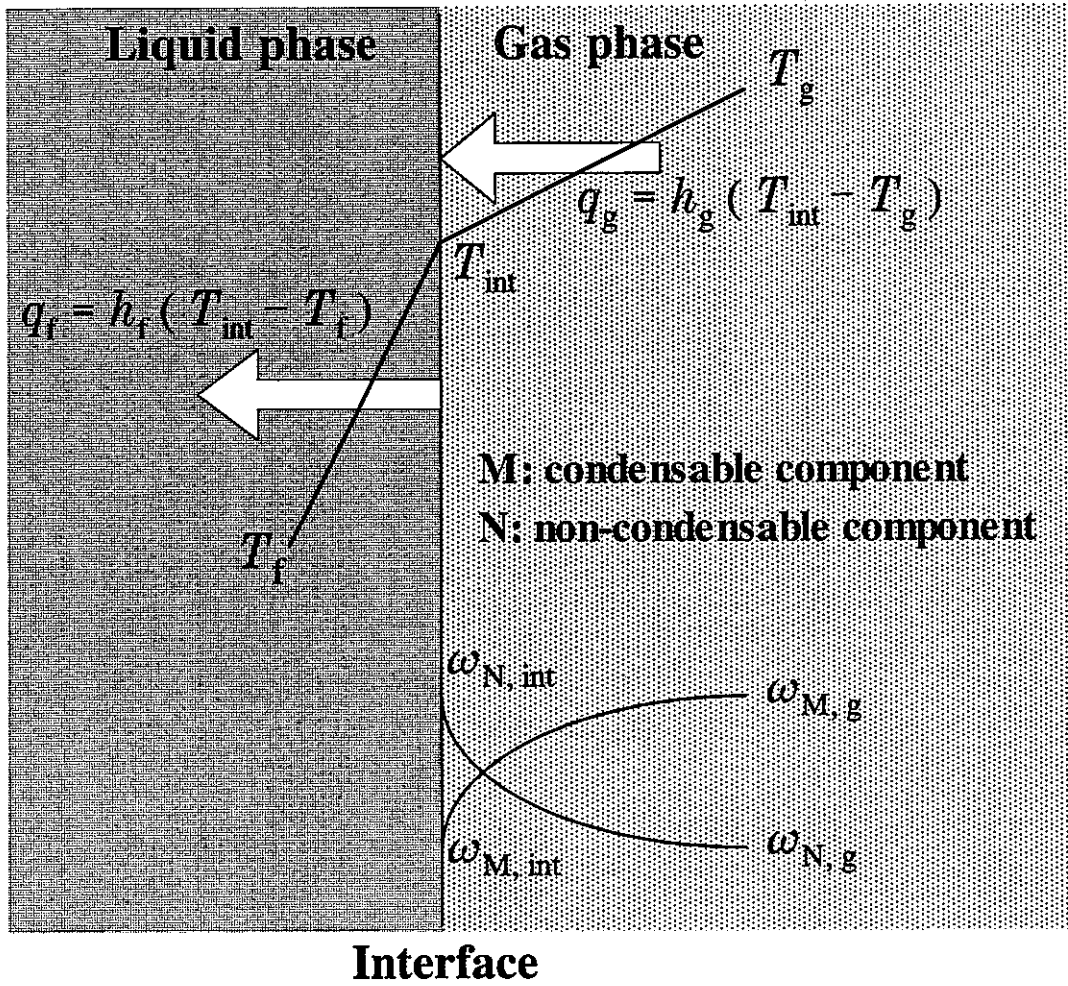


Fig. 1. Concepts of heat transfer-limited model and diffusion-limited model.

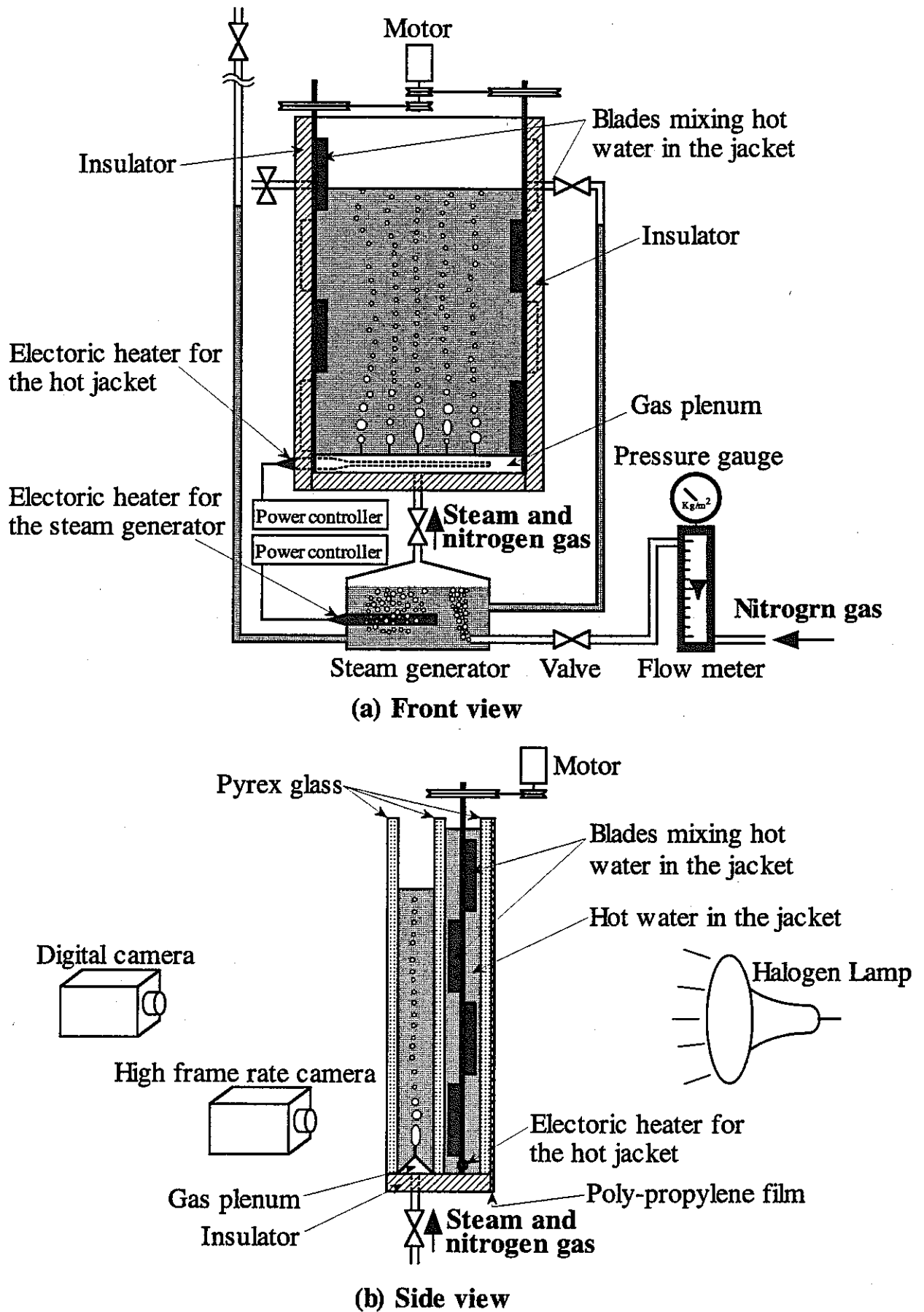


Fig. 2. Experimental apparatus.

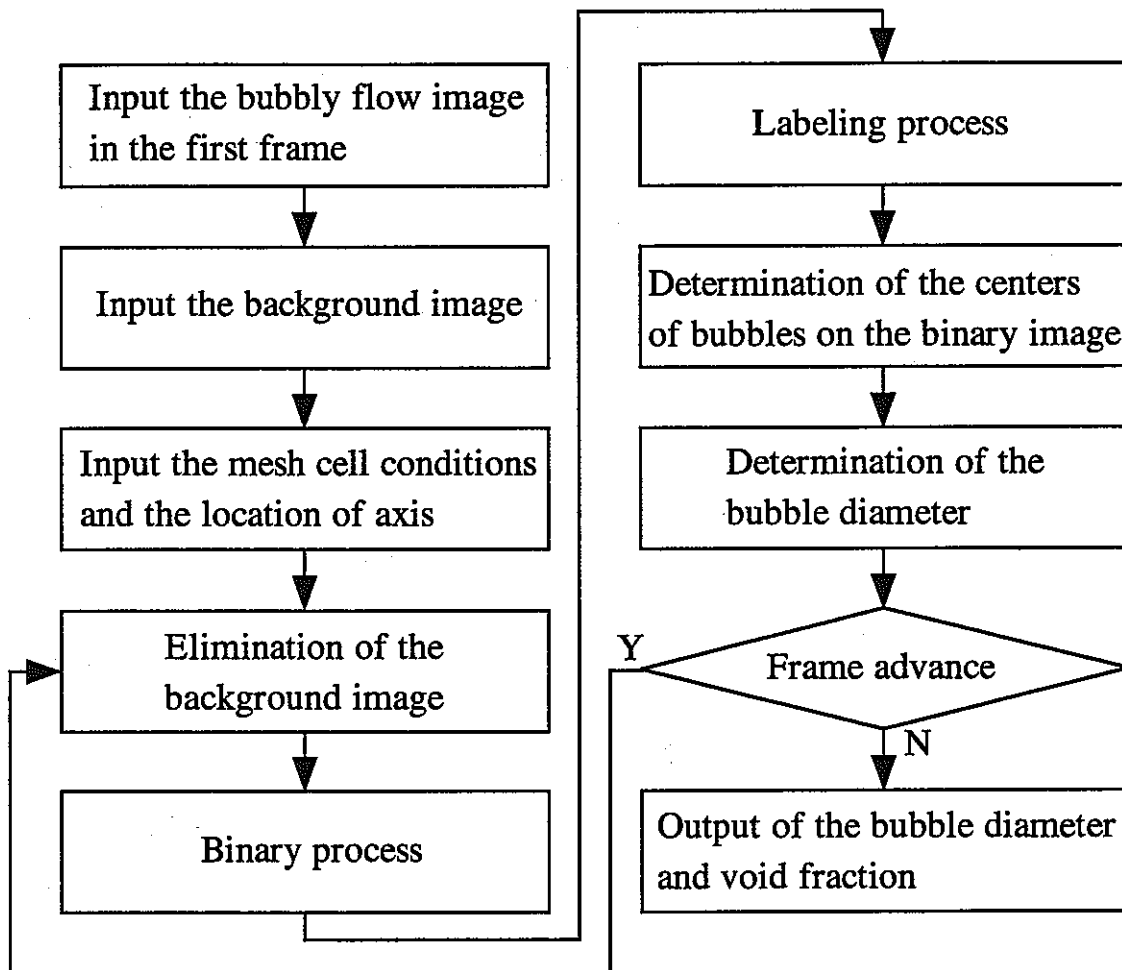
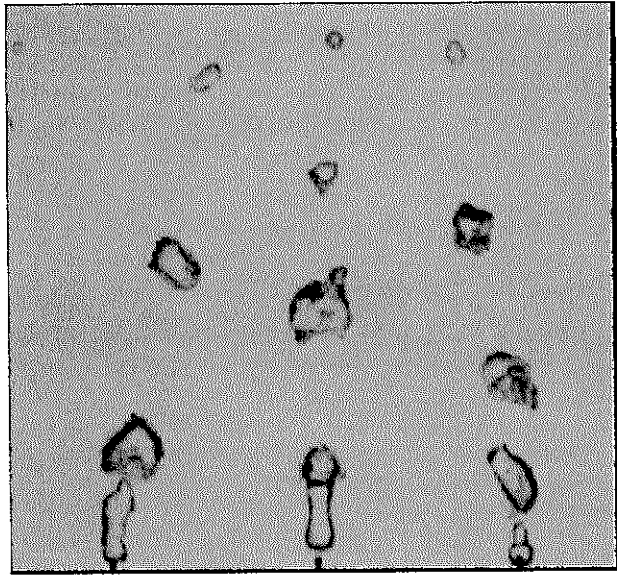
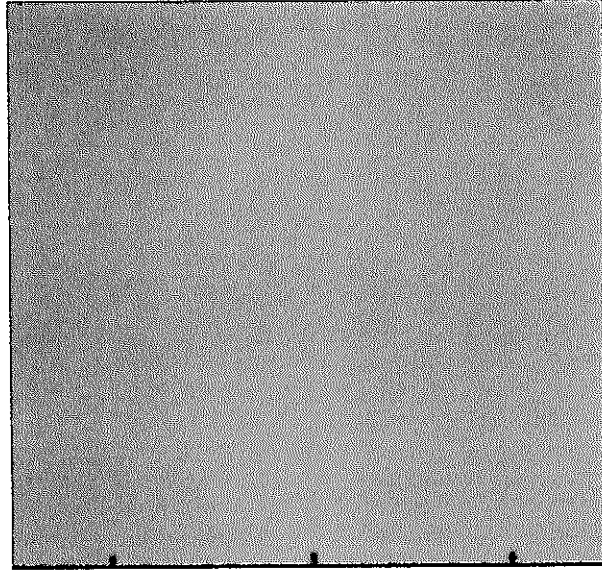


Fig. 3. Flow chart of image processing program.



(a) original image

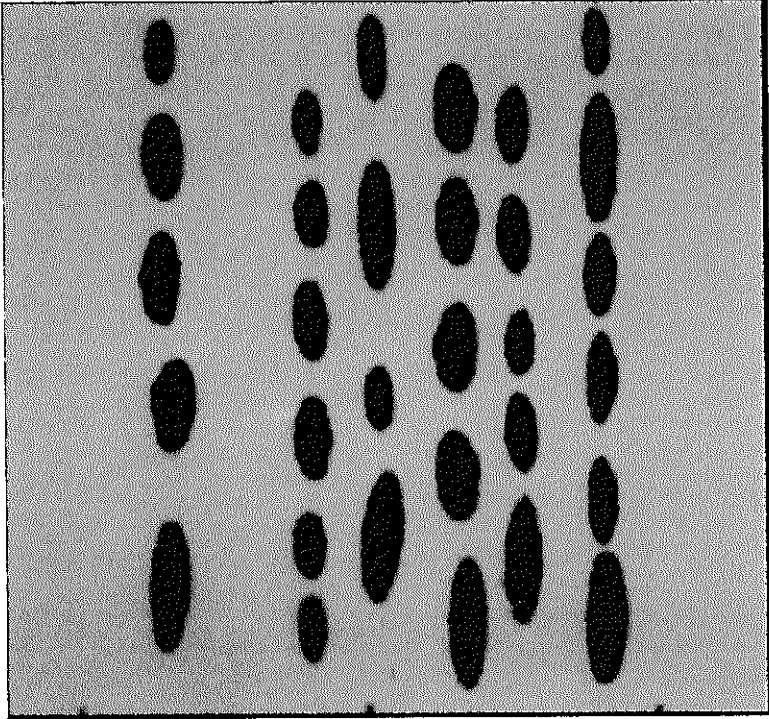


(b) background image

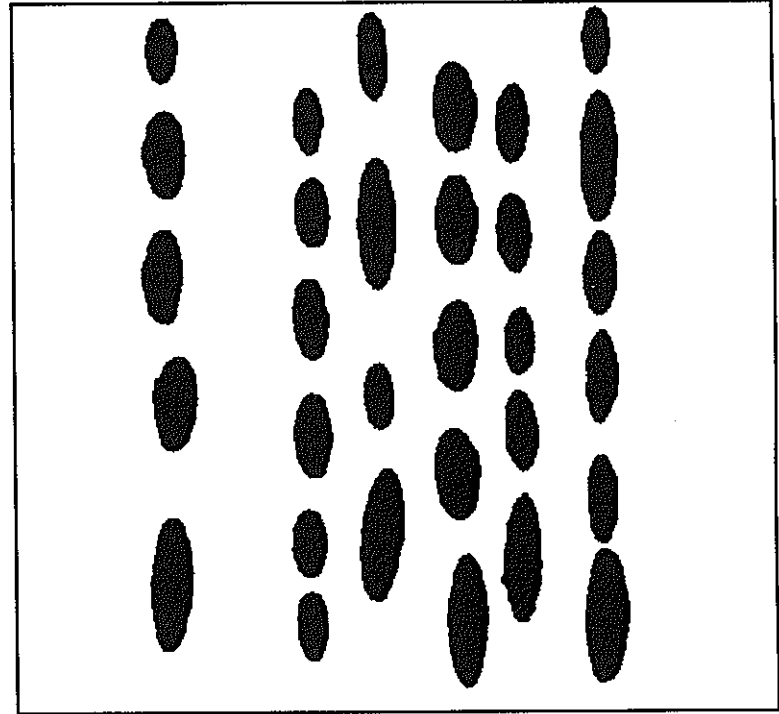


(c) binary image

Fig. 4. Binary process.

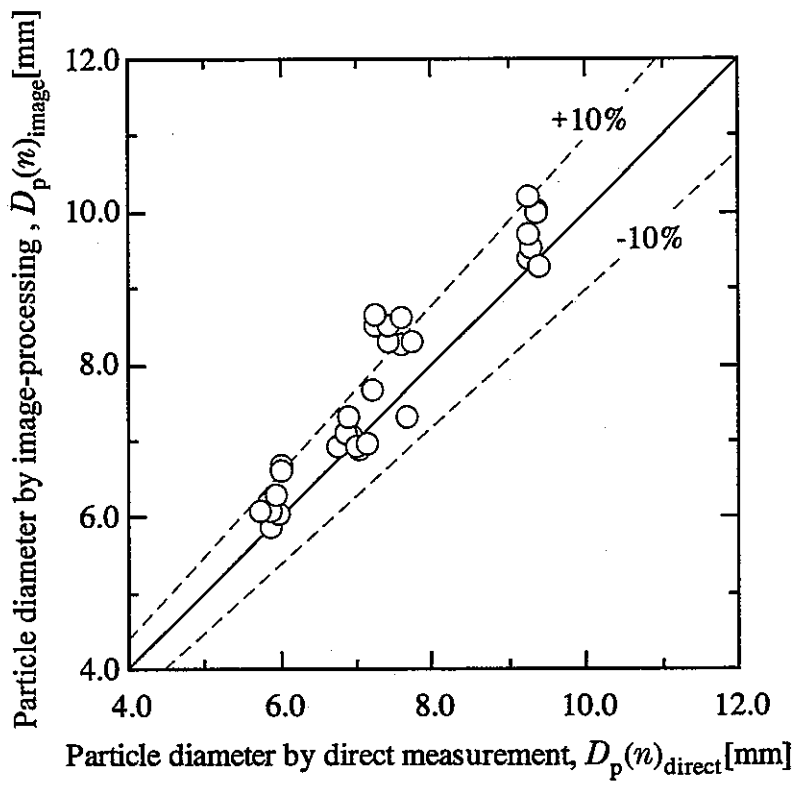


(a) original image

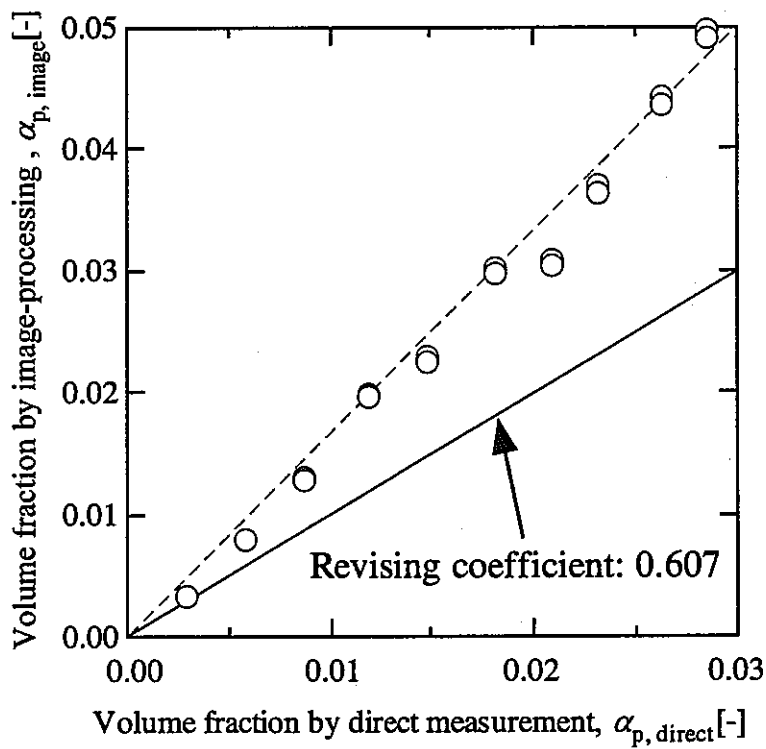


(b) binary image

Fig. 5. Particles for the calibration of image-processing.

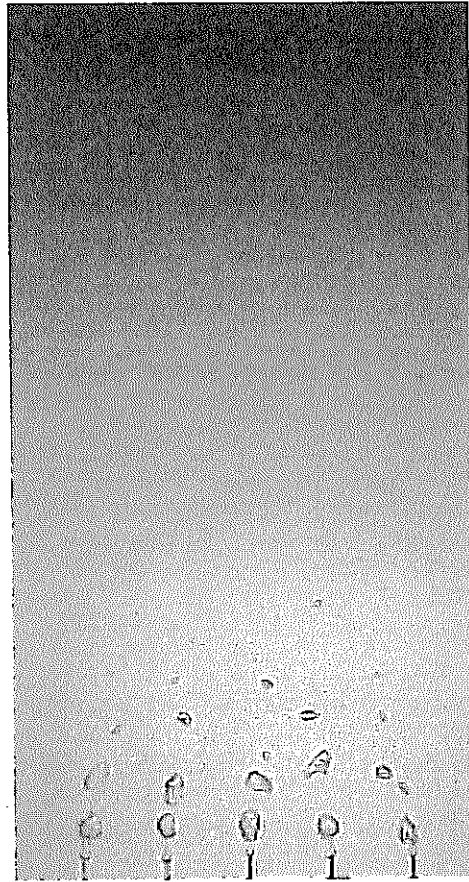


(a) calibration for particle diameters.

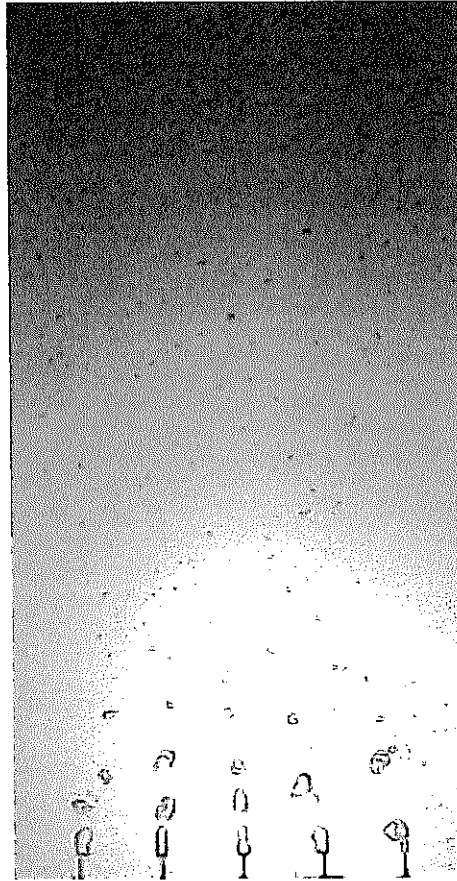


(b) calibration for volume fractions.

Fig. 6. Validity of image-processing.



(a) pure steam
($T_f = 99^\circ\text{C}$, $Q_s = 671 \text{ L/hr}$, $Q_n = 0 \text{ L/hr}$)
Volume fraction of nitrogen: 0%

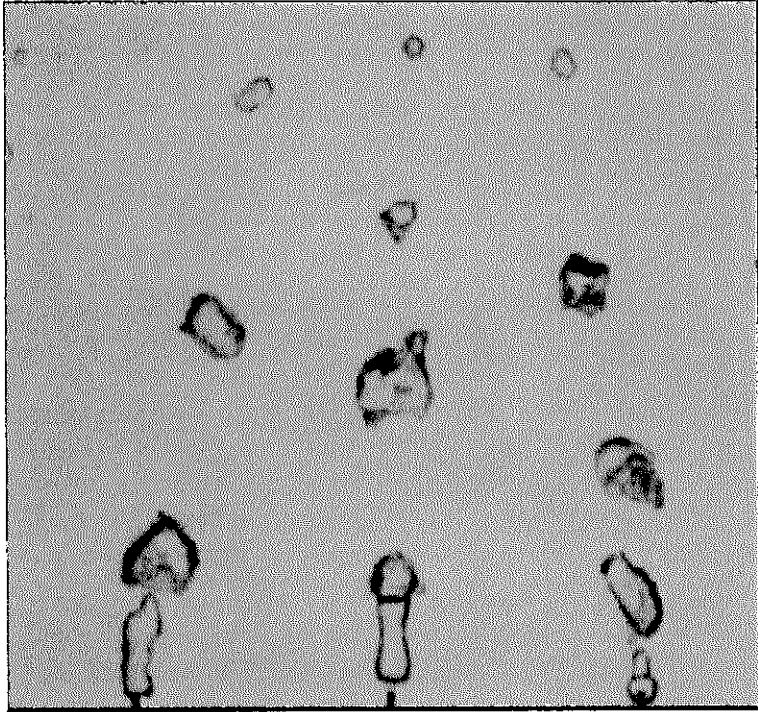


(b) steam and nitrogen gas
($T_f = 99^\circ\text{C}$, $Q_s = 555 \text{ L/hr}$, $Q_n = 10 \text{ L/hr}$)
Volume fraction of nitrogen: 1.8%



(c) steam and nitrogen gas
($T_f = 99^\circ\text{C}$, $Q_s = 539 \text{ L/hr}$, $Q_n = 15 \text{ L/hr}$)
Volume fraction of nitrogen: 2.7%

Fig. 7. Photographs of bubbly flows.



(a) pure steam

$(T_f = 99^\circ\text{C}, Q_s = 671 \text{ L/hr}, Q_n = 0 \text{ L/hr})$

Volume fraction of nitrogen: 0%

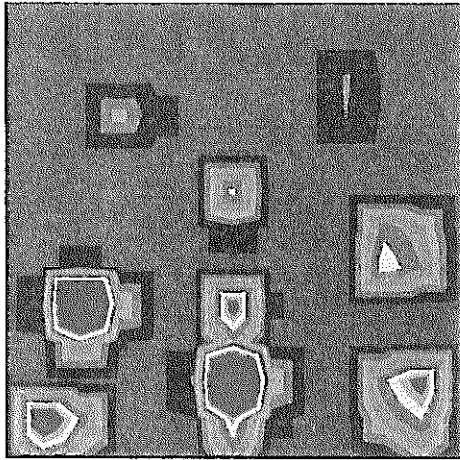


(b) steam and nitrogen gas

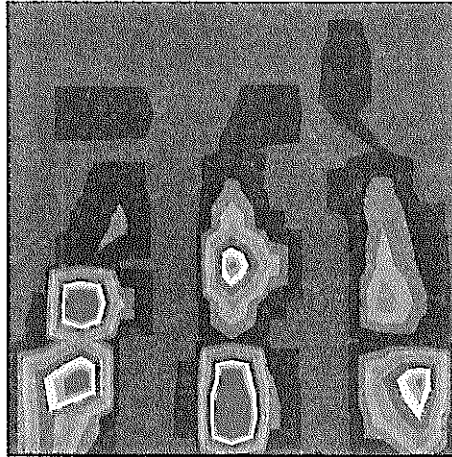
$(T_f = 99^\circ\text{C}, Q_s = 539 \text{ L/hr}, Q_n = 15 \text{ L/hr})$

Volume fraction of nitrogen: 2.7%

Fig. 8. Magnified photographs of bubbles.

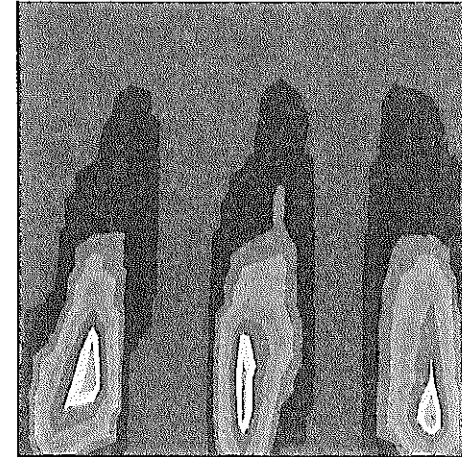


Sampling time = 1/30 sec

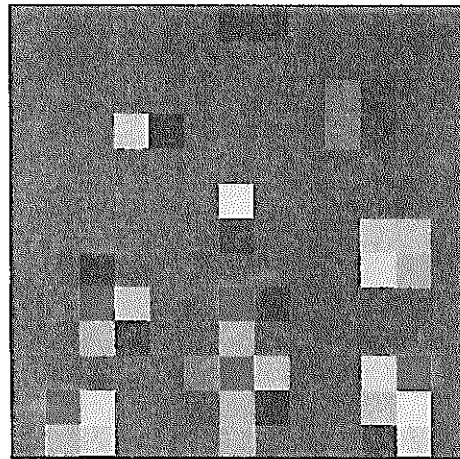
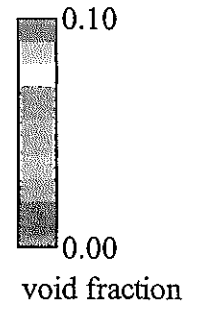


Sampling time = 1/3 sec

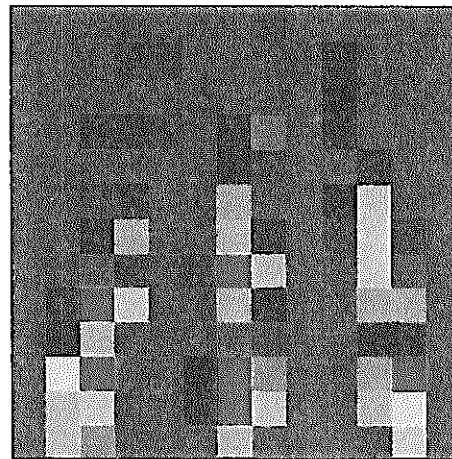
(a) expression with Delta-Graph



Sampling time = 10 sec

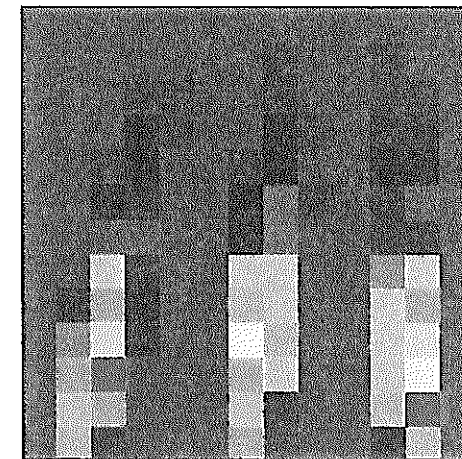


Sampling time = 1/30 sec



Sampling time = 1/3 sec

(b) expression with vcplot



Sampling time = 10 sec

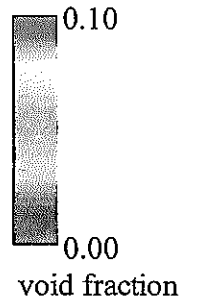
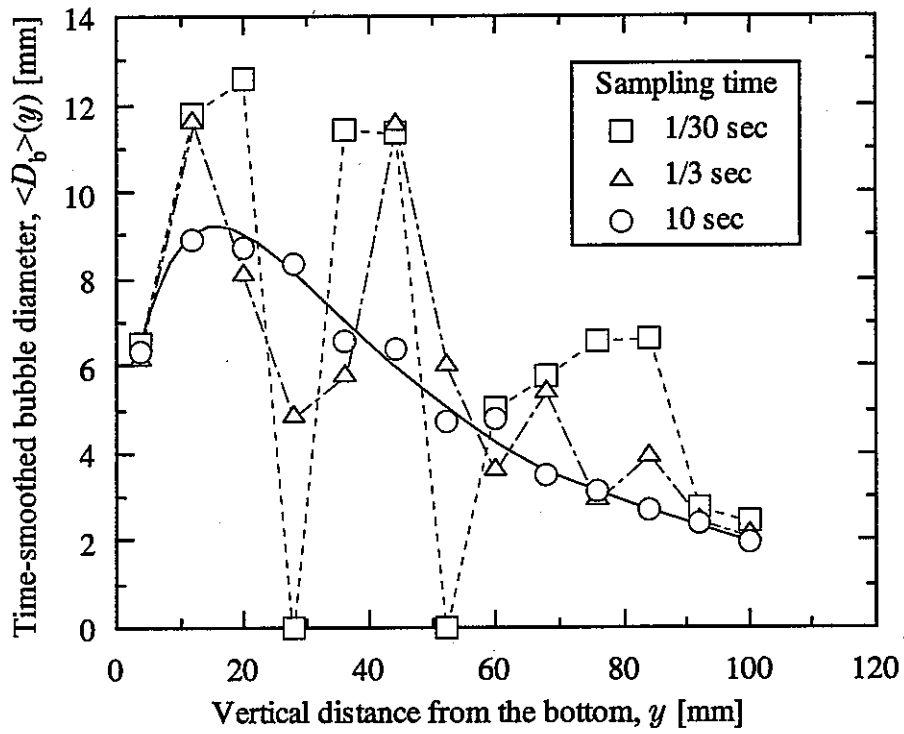
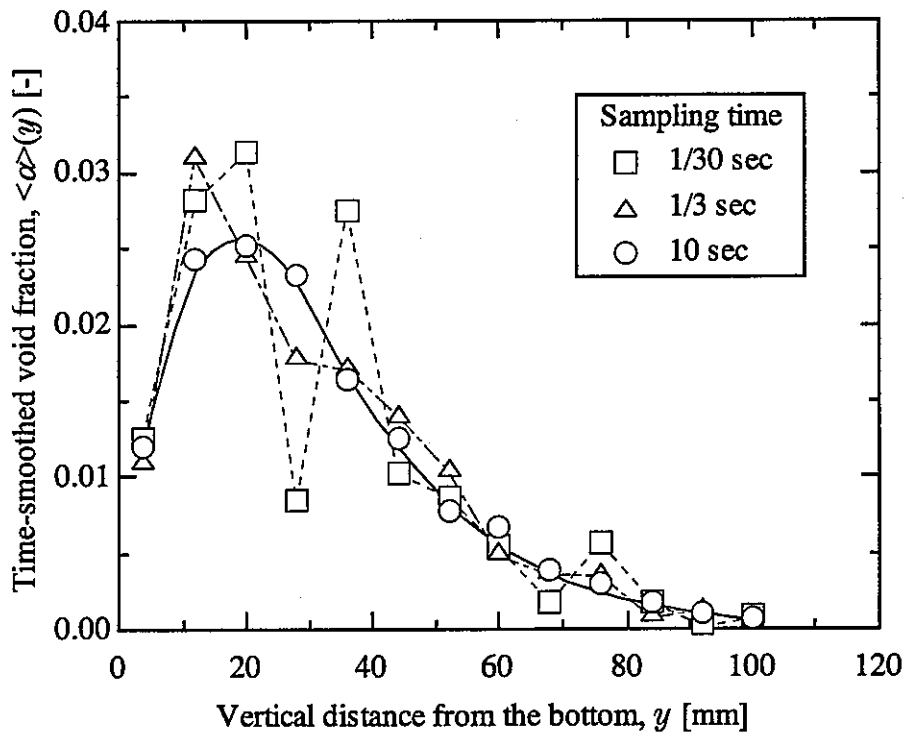


Fig. 9. Effect of sampling time on void distribution.

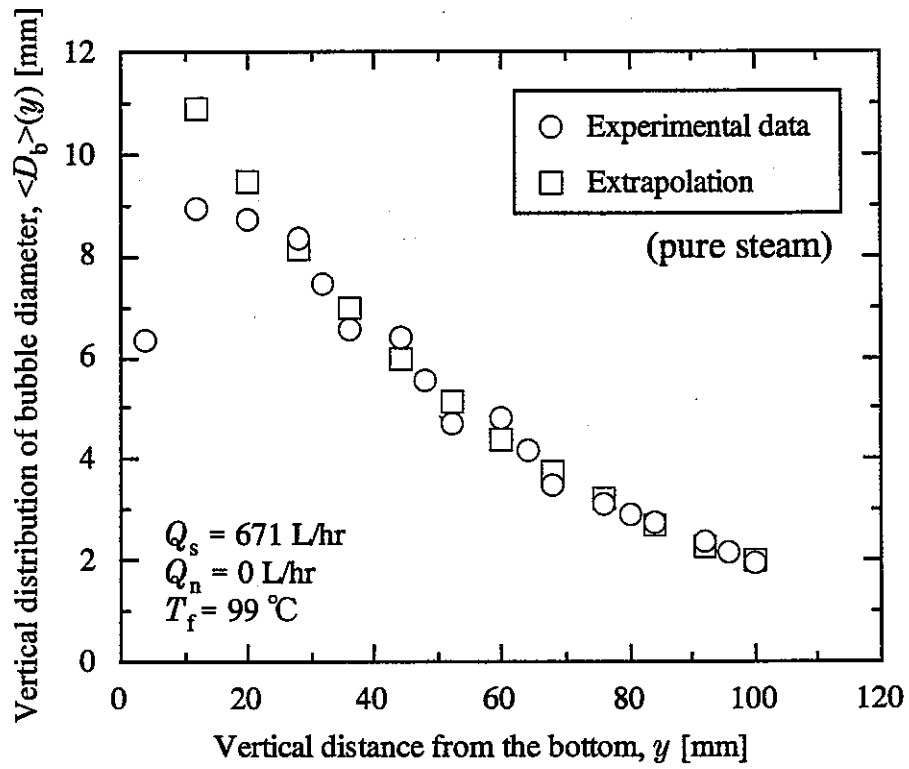


(a) time-smoothed bubble diameter.

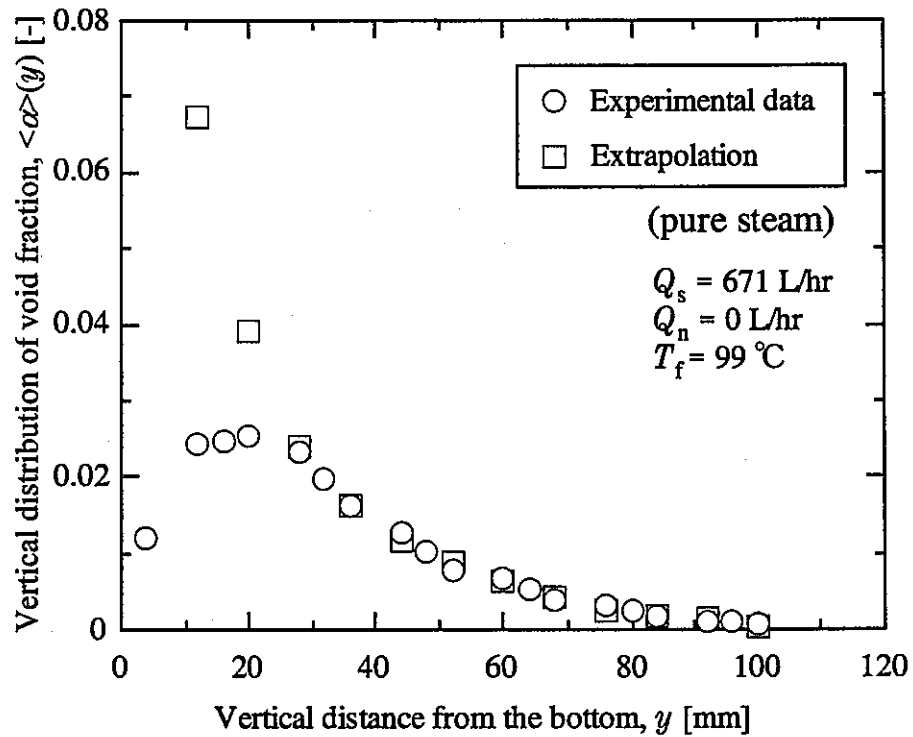


(b) time-smoothed void fraction.

Fig. 10. Effect of sampling time on the distributions.

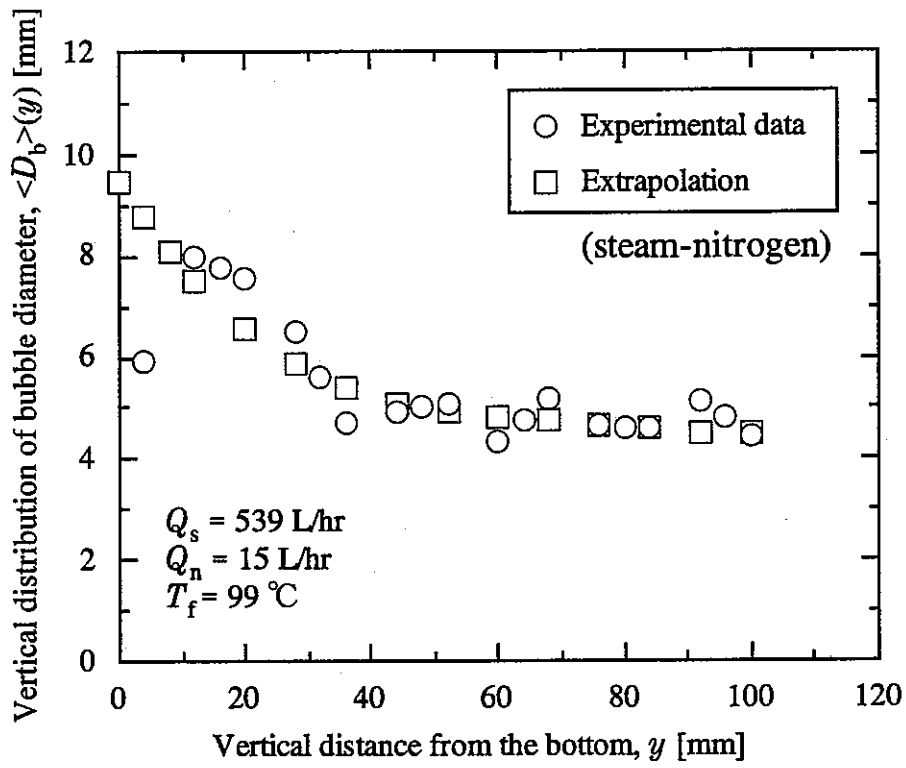


(a) vertical distribution of bubble diameter.

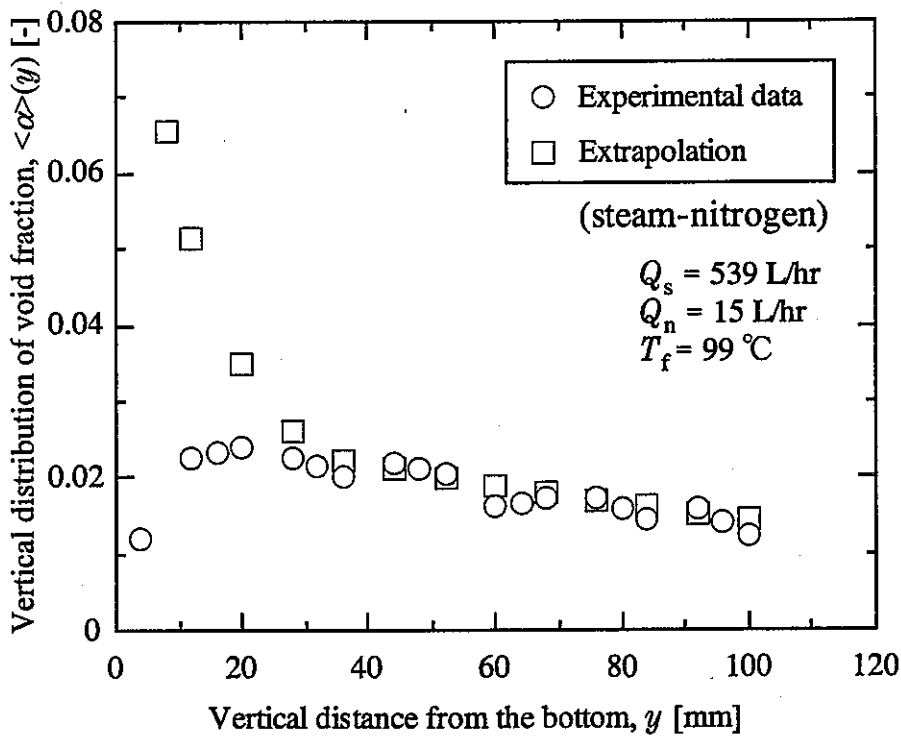


(b) vertical distribution of void fraction.

Fig. 11. Experimental data for pure steam.



(a) vertical distribution of bubble diameter.



(b) vertical distribution of void fraction.

Fig. 12. Experimental data for steam-nitrogen mixture.

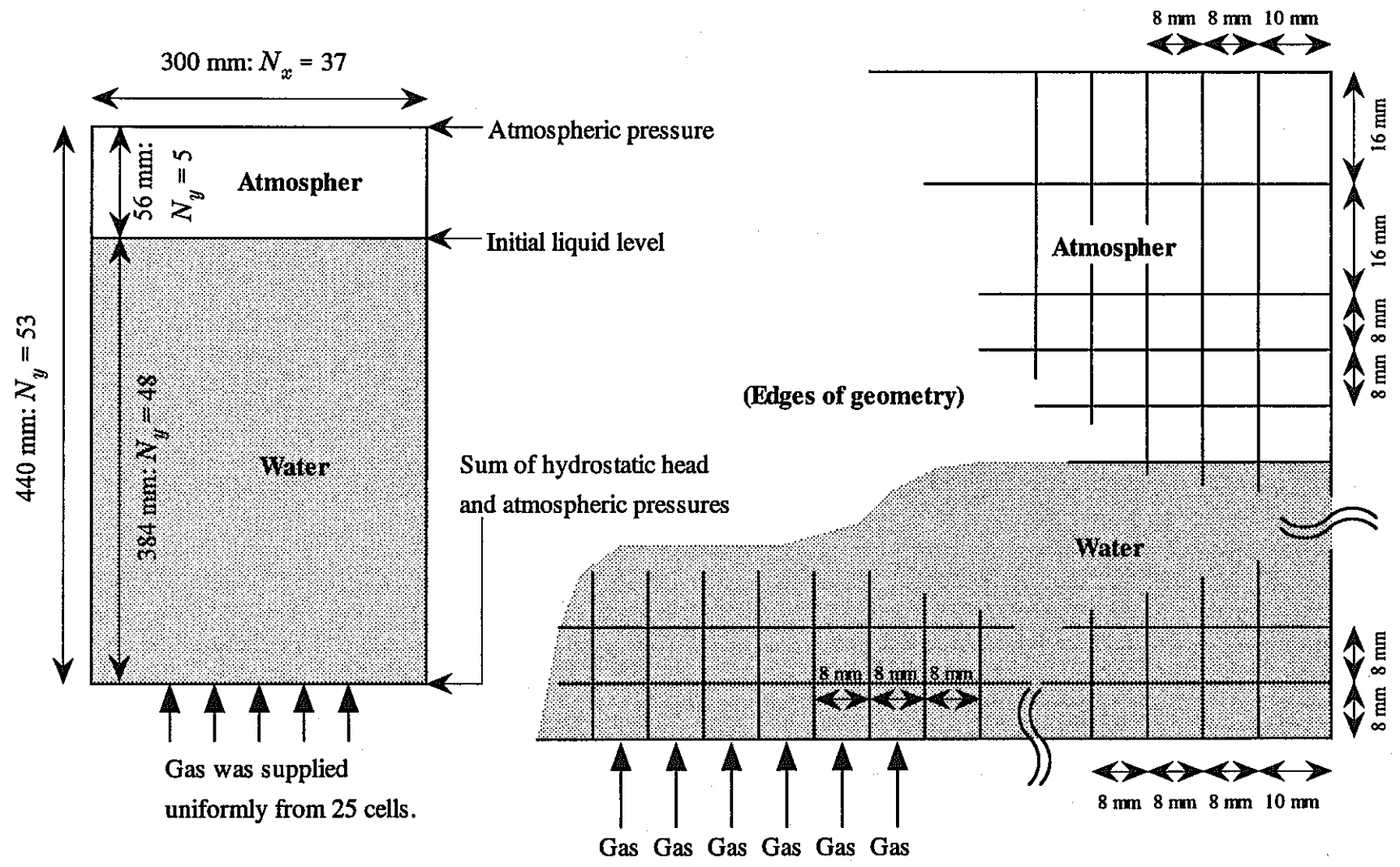
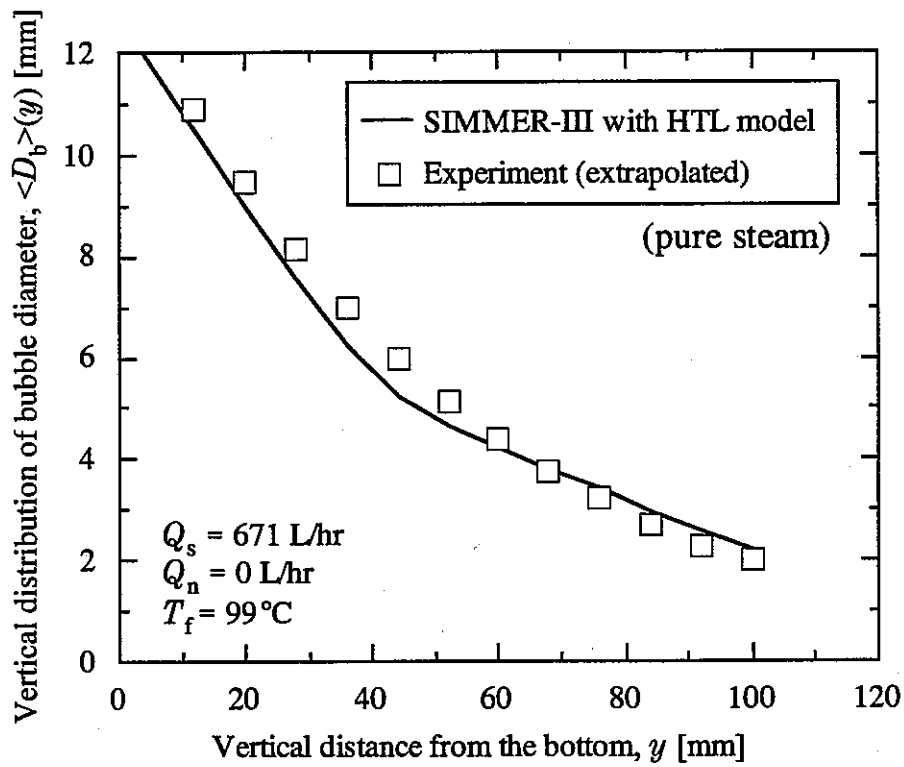
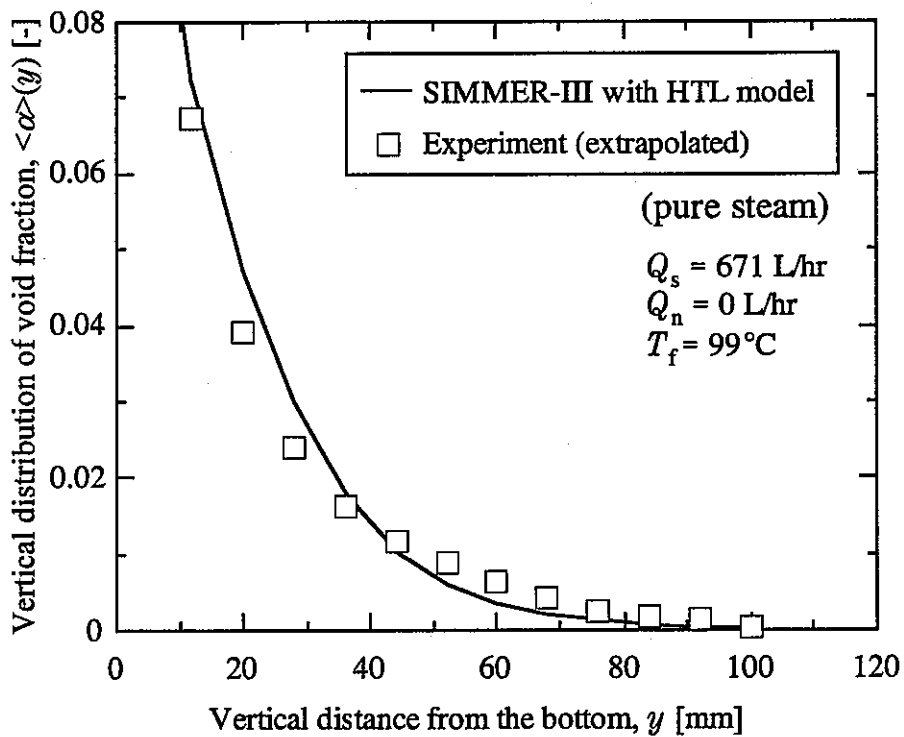


Fig. 13. Geometric model for analysis.

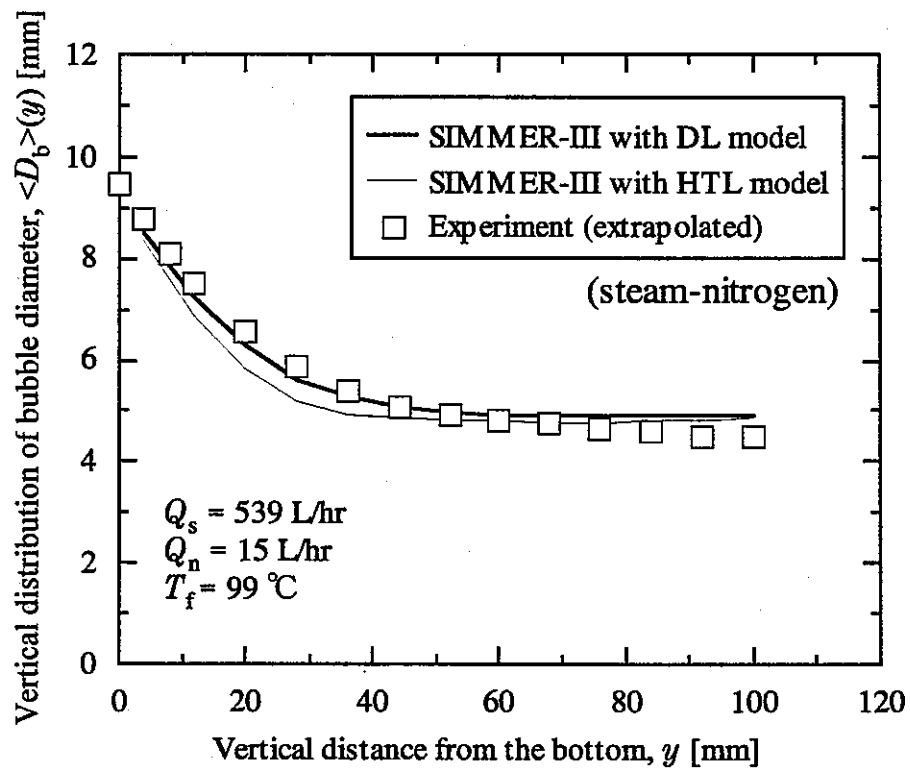


(a) vertical distribution of bubble diameter.

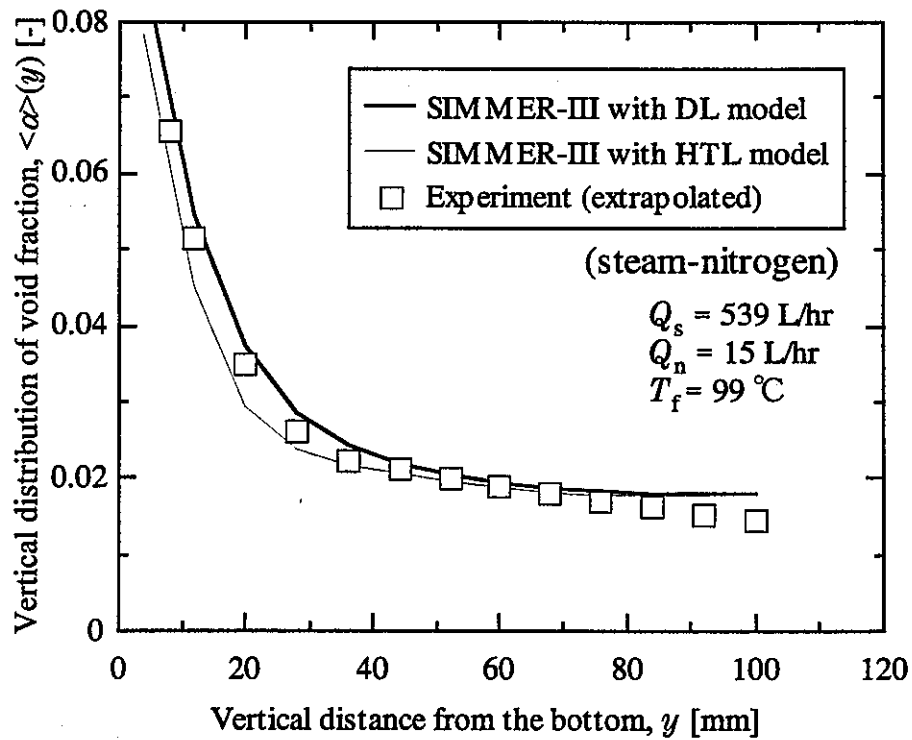


(b) vertical distribution of void fraction.

Fig. 14. Comparison between HTL model and experiment for pure steam system.



(a) vertical distribution of bubble diameter.



(b) vertical distribution of void fraction.

Fig. 15. Comparison between DL model and experiment for steam-nitrogen system.

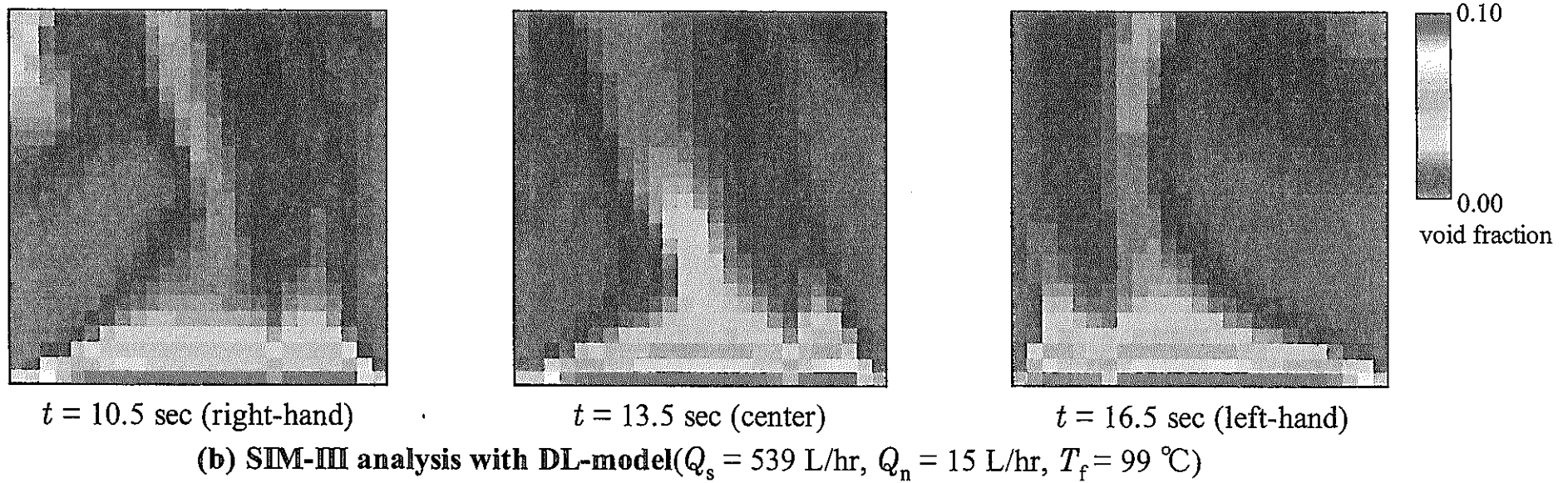
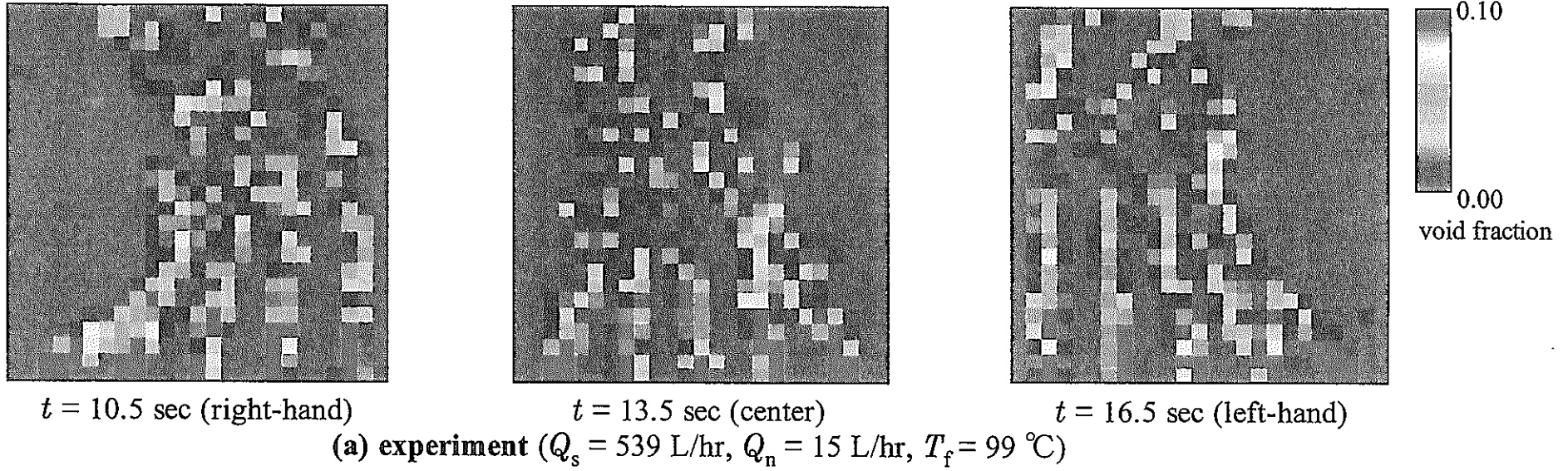
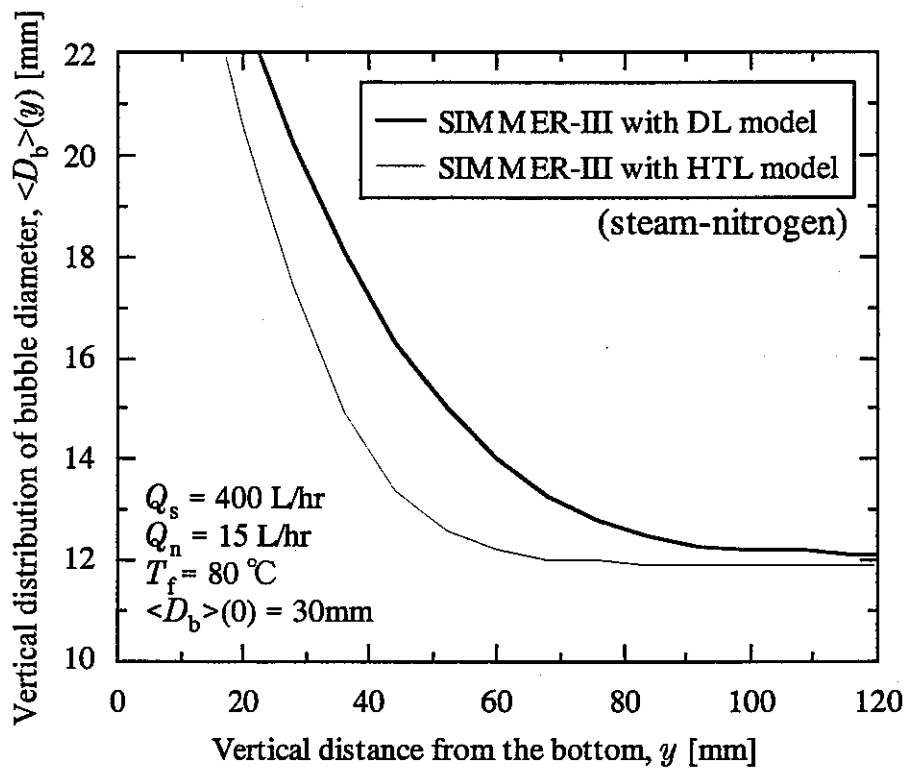
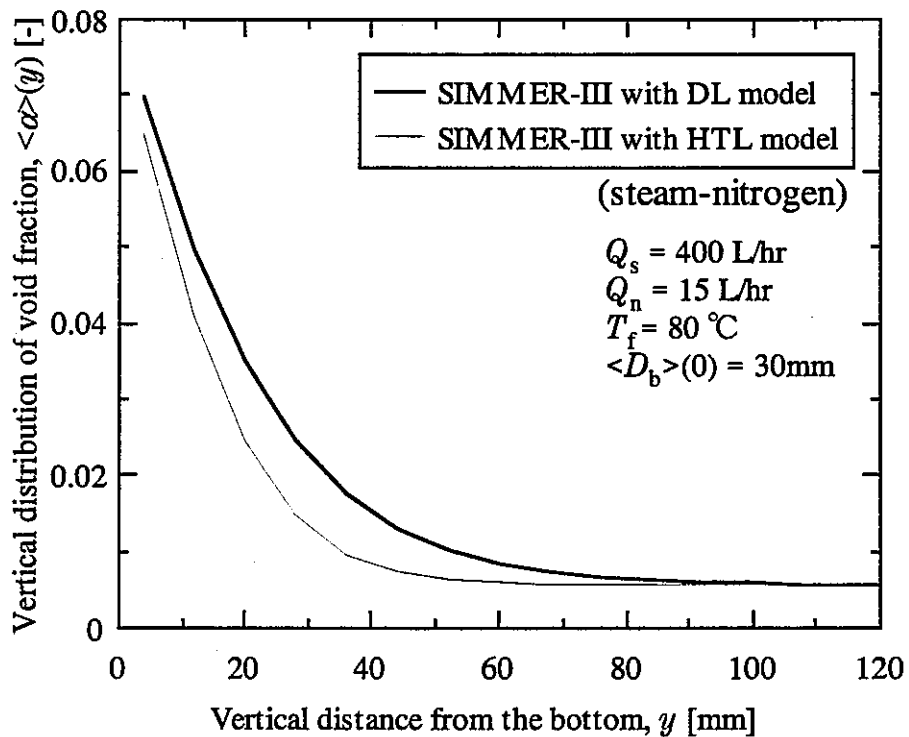


Fig. 16. Comparison of void distributions between SIM-III analysis and experiment for steam-nitrogen system.



(a) vertical distribution of bubble diameter.



(b) vertical distribution of void fraction.

Fig. 17. Consideration of the condition which gives remarkable difference between DL and HTL models for steam-nitrogen system.

Appendix A : 画像処理プログラムの使用方法

流動状態の可視化画像を解析するためのプログラムは Delphi (デルファイ) ver. 5 を用いて作成した。Delphi はインプライズ株式会社(旧ポーランド株式会社)が提供する RAD (Rapid Application Development) ツールである。Delphi で作成したアプリケーションは一般の市販アプリケーションのようにメニューバーやダイアログから必要な情報を選択・入力することが出来るため、その扱いは極めて簡便である。

アプリケーションを起動するには、全てのソースを同一のディレクトリ内に収納しておき、“climber.exe” をダブルクリックすればよい。

プログラムの使用法や各物理量の算出方法について以下に述べるが、これらの説明では、座標を表す変数として画像上の画素の座標を表す場合には (i, j) を使い、画像処理によって得られた物理量を表す場合には (x, y) を用いる。 (i, j) 座標では画像の一番左上の画素が $(0, 0)$ であり、右に進めば i が大きくなり下に進めば j が大きくなる。また、 (x, y) 座標の設定に関しては A. 2. 5. 1. で述べるが、画像上で右に進めば x が大きくなり上に進めば y が大きくなる。

A. 1. メインウィンドウの構造

“climber.exe” をダブルクリックすると、メニューバー、「原画像」ウィンドウおよび「処理済み画像」ウィンドウからなるメインウィンドウが現れる (Fig. A-1)。

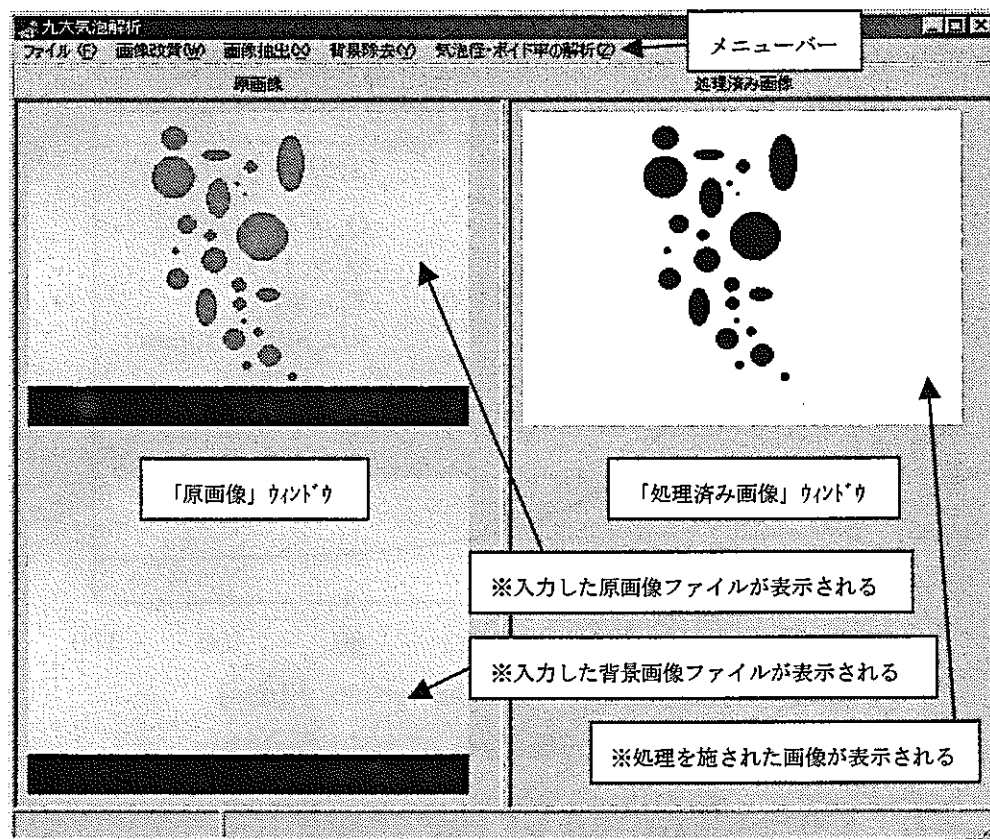
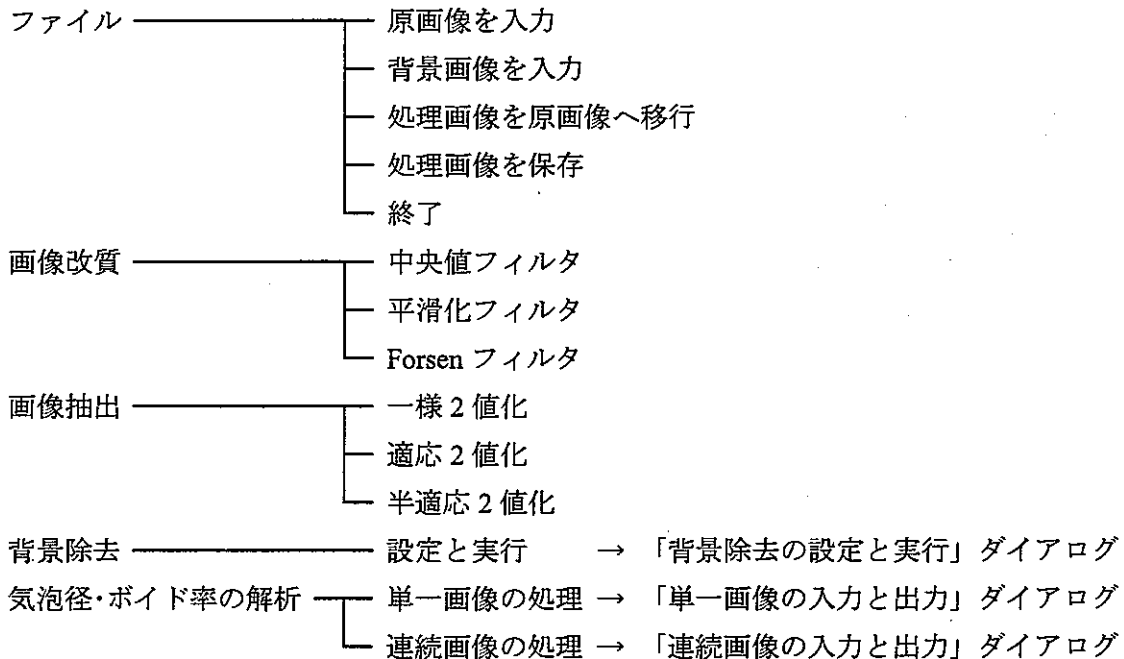


Fig. A-1. メインウィンドウの構造.

メニューバーの構成は「ファイル」、「画像改質」、「画像抽出」、「背景除去」および「気泡径・ボイド率の解析」からなる。それぞれのメニューは次のような構造を持っている。



これらのうち、「画像改質」、「画像抽出」および「背景除去」は可視化画像を解析可能な画像（2 値化画像）に変換する際の条件を決定するためのメニューである。これらを用いて決定した条件を「気泡径・ボイド率の解析」で入力し、気泡径やボイド率の解析を行う。

A. 2. 各メニューの構造

各メニューの具体的な内容は次の通りである。

A. 2. 1. 「ファイル」メニュー

「ファイル」メニューをドラッグすると「原画像を入力」、「背景画像を入力」、「処理画像を原画像に移行」、「処理画像を保存」および「終了」の各メニューが現れる。各メニューを選択すると、以下の処理が行われる。

A. 2. 1. 1. 原画像を入力

入力する原画像（気泡が写った画像）を指定する。指定できる画像ファイルの形式はビットマップ (bmp) のみである。入力ファイルを指定すると「原画像」ウィンドウ内の上半分に画像が表示される。

A. 2. 1. 2. 背景画像を入力

入力する背景画像（気泡が写っていない画像）を指定する。指定できる画像ファイルの形式は bmp のみである。画像ファイルを指定すると「原画像」ウィンドウ内の下半分に画像が表示される。精度の良い 2 値画像を得るためには、この背景画像を原画像から除去し

て気泡の輪郭を際立たせることが必要である。

A. 2. 1. 3. 処理画像を原画像に移行

後述する諸々の処理を経て得られた処理済画像にさらに新たな処理を加える場合、メインウィンドウ右半分の「処理済み画像」ウィンドウに表示された画像を左半分の「原画像」ウィンドウに転送する。転送後、新たな処理をこの画像に加えると、その結果が再び「処理済み画像」ウィンドウに表示される。

A. 2. 1. 4. 処理画像を保存

メインウィンドウ右半分の「処理済み画像」ウィンドウに表示された画像を bmp 形式のファイルに保存する。

A. 2. 1. 5. 終了

アプリケーションを終了する。

A. 2. 2. 「画像改質」メニュー

「画像改質」メニューをドラッグすると「中央値フィルタ」、「平滑化フィルタ」および「Forsen フィルタ」のメニューが表示される。これらは、原画像のノイズ除去に用いられる。各メニューを選択すると、入力した原画像に対して以下の処理が施され、その処理結果が「処理済み画像」ウィンドウに表示される。

A. 2. 2. 1. 中央値フィルタ

原画像中の (i, j) 座標における画素の階調値 $f_{i,j}$ を次式で表される階調値 $g_{i,j}$ に変換する。

$$g_{i,j} = \text{Med.} [f_{i-1,j-1}, f_{i-1,j}, f_{i-1,j+1}, f_{i,j-1}, f_{i,j}, f_{i,j+1}, f_{i+1,j-1}, f_{i+1,j}, f_{i+1,j+1}] \quad (\text{A-1})$$

A. 2. 2. 2. 平滑化フィルタ

原画像中の (i, j) 座標における画素の階調値 $f_{i,j}$ を次式で表される階調値 $g_{i,j}$ に変換する。

$$g_{i,j} = [f_{i-1,j-1} + f_{i-1,j} + f_{i-1,j+1} + f_{i,j-1} + f_{i,j} + f_{i,j+1} + f_{i+1,j-1} + f_{i+1,j} + f_{i+1,j+1}] / 9 \quad (\text{A-2})$$

A. 2. 2. 3. Forsen フィルタ

画像の輪郭を強調するために階調値 $f_{i,j}$ を次式で表される階調値 $g_{i,j}$ に変換する。

$$g_{i,j} = |f_{i,j} - f_{i+1,j+1}| + |f_{i,j+1} - f_{i+1,j}| \quad (\text{A-3})$$

A. 2. 3. 「画像抽出」メニュー

「画像抽出」メニューをドラッグすると「固定2値化」、「適応2値化」および「半適応2値化」のメニューが表示される。これらは、原画像を2値化する際に用いられる。各メニューを選択すると、入力した原画像に対して以下の処理が施され、その処理結果が「処理

「処理済み画像」ウィンドウに表示される。

A. 2. 3. 1. 固定 2 値化

画像中の全画素の階調値を平均した値を閾値として 2 値化する。処理時間は最も短い。

A. 2. 3. 2. 適応 2 値化

ある注目画素を中心とする 51×51 画素のマスク領域内で平均した階調値を閾値としてその注目画素を 2 値化する。この演算を画像上のすべての画素に対して行う。即ち、閾値は画素ごとに異なる。処理時間は最も長い。2 値化画像の精度は最も良い。

A. 2. 3. 3. 半適応 2 値化

画像を 51×51 画素のタイル状領域に分割し、各領域内の階調値の平均値を領域中央の画素の閾値とする。このようにして各領域の中央に割り当てられた閾値を共 1 次内挿によって補間し、全画面に閾値の連続曲面を作成する。この閾値曲面をもとにして 2 値化を行う。処理時間および 2 値化精度は固定 2 値化と適応 2 値化の中間程度。

A. 2. 4. 「背景除去」メニュー

「背景除去」メニューをドラッグすると「設定と実行」メニューが表示され、これを指定すると「背景除去の設定と実行」ダイアログが表示される (Fig. A-2)。このダイアログ上で「背景画像の階調値に乘じる係数」および「背景画像を平行移動する画素数」を入力し、「実行」ボタンをクリックすると、原画像から背景画像を除去した画像が「処理済み画像」ウィンドウに表示される。「背景画像の階調値に乘じる係数」は正の実数を入力し、「背景画像を平行移動する画素数」には正負の整数を入力する。

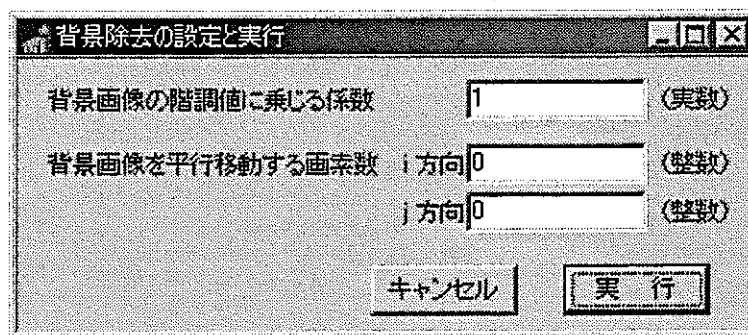


Fig. A-2. 「背景除去の設定と実行」ダイアログ。

なお、「背景画像の階調値に乘じる係数」は背景画像の階調値に適当な実数を乗じて自然光変化の影響を緩和するために入力する。原画像と背景画像の間に自然光の変化がないような理想的な撮影条件では 1.0 となるので、この値をデフォルト値として設定している。また、「背景画像を平行移動する画素数」は原画像と背景画像の撮影時の画素のズレを補正するために必要である。この値は i 方向および j 方向のそれぞれに対して入力できる。原画像と背景画像の間で画素のズレが全く無ければ「背景画像を平行移動する画素数」は i 方向お

よび j 方向ともに 0 となるので、この値をデフォルト値として設定している。

A. 2.5. 「気泡径・ボイド率の解析」メニュー

「気泡径・ボイド率の解析」メニューをドラッグすると「単一画像の処理」メニューおよび「連続画像の処理」メニューが表示される。これらのメニューを指定すると、「単一画像処理の入力と出力」ダイアログおよび「連続画像処理の入力と出力」ダイアログがそれぞれ表示される。各ダイアログの内容について次に示す。

A. 2.5.1. 「単一画像処理の入力と出力」ダイアログ

「入力」タブと「出力」タブの 2 つのタブが用意されている。これらを用いて画像処理に必要な条件の入力と処理結果の出力およびデータの保存を行う。

「入力」タブを選択すると「改質・抽出・背景除去の設定」ウィンドウおよび「解析メッシュの設定」ウィンドウが現れる (Fig. A-3)。

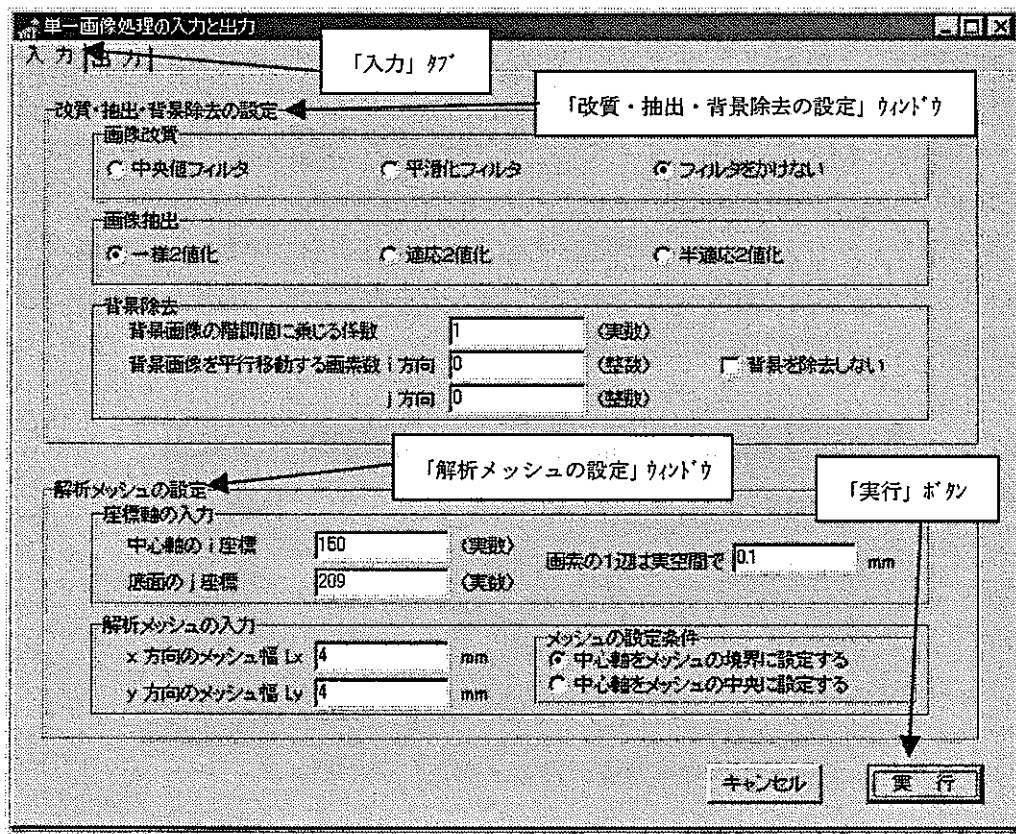


Fig. A-3. 「単一画像処理の入力と出力」ダイアログの「入力」タブ。

「改質・抽出・背景除去の設定」ウィンドウでは前述の「画像改質」、「画像抽出」の条件を選択し、「背景除去」における係数と移動画素数を入力する。

「解析メッシュの設定」ウィンドウでは Fig. A-4 に示したような実験装置の中心軸 (y 軸) を画像内に設定するために「中心軸の i 座標」 ($=i_0$) を実数で入力し、実験装置底面を水平

方向の座標軸 (x 軸) として設定するために「底面の j 座標」 ($=j_x$) を実数で入力する。また、画像上の長さスケールを実験装置内の実際の物理空間における長さスケールと対応させるために「画素の 1 辺は実空間で 〇〇mm 」に対応するのを実数で入力する。

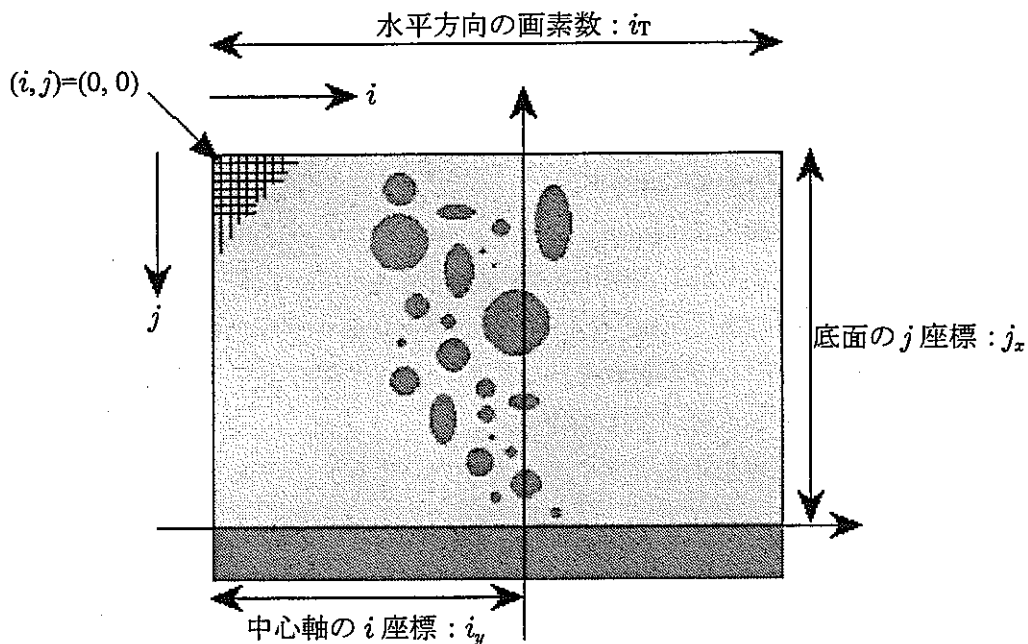


Fig. A-4. 座標軸の設定と入力.

さらに、画像処理によって得られた物理量と SIMMER-III コードの解析結果とを直接比較するために SIMMER-III の解析体系に対応したメッシュ幅を「 x 方向のメッシュ幅 L_x 」および「 y 方向のメッシュ幅 L_y 」で入力する (単位は $[\text{mm}]$ で実空間の長さに対応)。このメッシュ設定に関しては、Fig. A-5(a)に示したように、実験装置の「中心軸をセルの境界に設定」する場合と Fig. A-5(b)に示したように「中心軸をセルの中央に設定」する場合とを選択する。以上の諸条件を入力した後、「実行」ボタンをクリックすれば、画像処理を開始する。

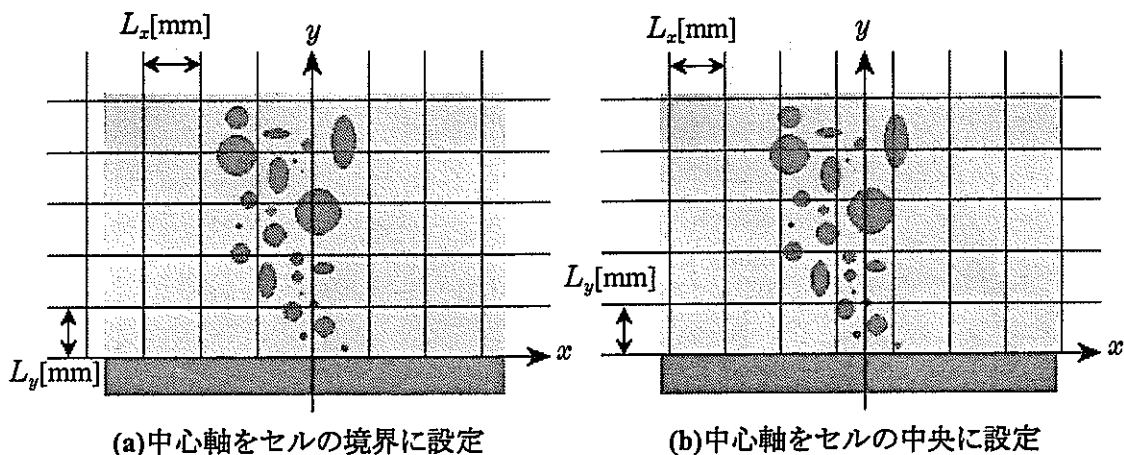


Fig. A-5. セルの設定.

一方、「出力」タブを選択すると「入力」タブで設定した条件のもとで各種の解析結果を出力する (Fig. A-6)。出力できるデータは次の通りである。

- ①各気泡の重心座標 $(x_G(n), y_G(n))$
- ②各気泡の直径 $D_b(n)$
- ③各気泡の体積 $V_b(n)$
- ④水平方向に平均した気泡径の鉛直方向分布 $\langle D_b \rangle(y)$
- ⑤水平方向に平均したボイド率の鉛直方向分布 $\langle \alpha \rangle(y)$
- ⑥気泡径の空間分布 $D_b(x, y)$
- ⑦ボイド率の空間分布 $\alpha(x, y)$
- ⑧プール内で空間平均したボイド率 $\langle \alpha \rangle_p$

これらを選択 (複数の同時選択可能) し、「出力」ボタンをクリックすると、各データを表示するための新たなダイアログが現れる。この新たなダイアログ中の「表示」ボタンをクリックすればデータシートが表示される。

また、データシートを表示する各ダイアログ中の「保存」ボタンをクリックすれば、そのデータシートがテキスト形式のファイルに保存される (ただし、上記の⑧に関しては、値が1つだけなので、この保存機能はない)。

なお、ボイド率の算出に関しては「プールの奥行き方向の長さ」が必要になるので、実際の実験装置の奥行き方向の長さ L_z を mm 単位で入力する。

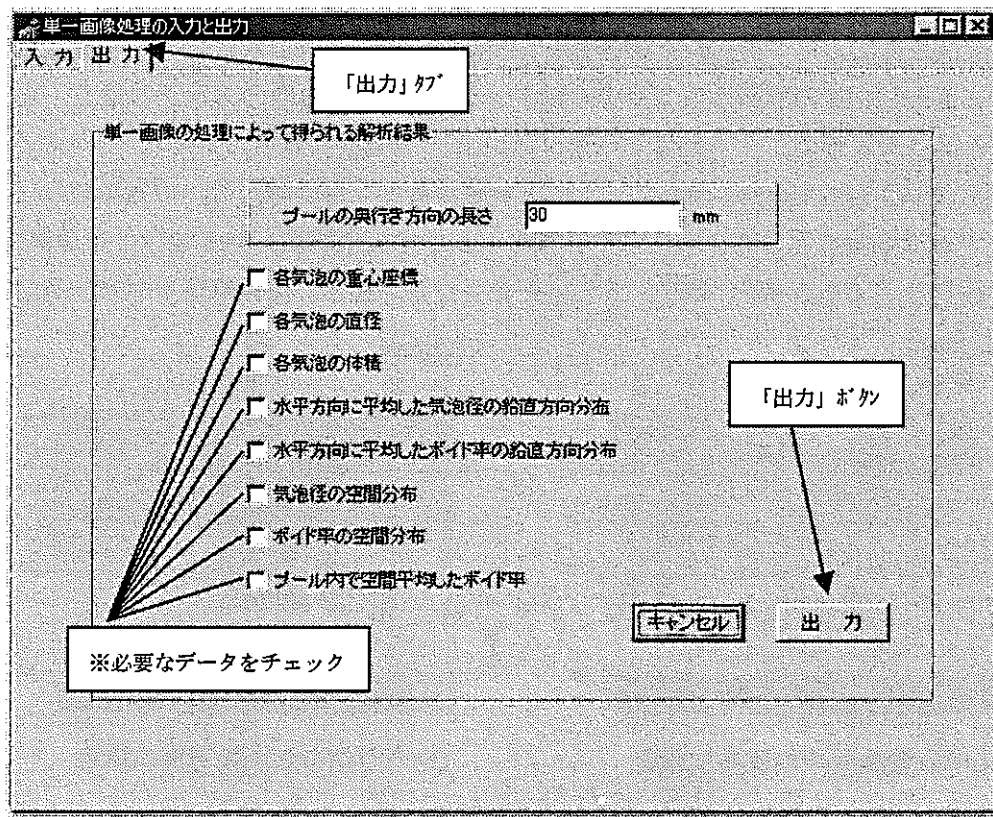


Fig. A-6. 「単一画像処理の入力と出力」ダイアログの「出力」タブ。

「出力」ボタンをクリックして得られるデータシートの体裁は次の通りである。

①気泡の重心座標： $(x_G(n), y_G(n))$

n	Xg	Yg
1	-4.45	18.9
2	4.099487554	16.95292825
3	-1.3	17.6
4	-4.5	15.9
5	1.2	16.7
6	-1.15	14.3

Fig. A-7. 気泡重心を表示したデータシート。

ここで、 n は各気泡に付けられた通し番号（ラベリング）である。次に示す各気泡の直径 $D_B(n)$ および各気泡の体積 $V_B(n)$ の表示に関しては、この n を媒介変数としている。つまり、異なるデータシートでも、 n の値が同じであれば、同一の気泡を指していることになる。

②各気泡の直径： $D_b(n)$

n	Db
1	1.867799869
2	2.948936433
3	1.354055000
4	3.215385684
5	0.983698151
6	2.273621021

Fig. A-8. 気泡径を表示したデータシート。

③各気泡の体積： $V_b(n)$

n	Vb
1	3.411847761
2	13.42749056
3	1.299892800
4	17.40595450
5	0.498407063
6	6.153934232

Fig. A-9. 気泡体積を表示したデータシート。

④水平方向に平均した気泡径の鉛直方向分布： $\langle D_b \rangle(y)$

y	$\langle D_b \rangle(y)$
0$y$$L$	1.144410912
1$y$$2L$	1.093949986
2$y$$3L$	1.709095322
3$y$$4L$	1.502981935
4$y$$5L$	1.788622363

Fig. A-10. 気泡径の軸方向分布を表示したデータシート。

ここで、鉛直方向（軸方向）の座標 y の範囲は「単一画像の解析」ダイアログの「入力」タブにおける「解析メッシュの設定」に従う。データシートには、 $0 < y < L$, $L < y < 2L$, ... と表示されているが、正確には $0 < y < L_y$, $L_y < y < 2L_y$, ... である (L_y は mm 単位)。これは、次に示す水平方向に平均したボイド率の鉛直方向分布 $\langle \alpha \rangle(y)$ についても同様である。

⑤水平方向に平均したボイド率の鉛直方向分布： $\langle \alpha \rangle(y)$

y	$\langle \alpha \rangle(y)$
0$y$$L$	0.001256485
1$y$$2L$	0.002182123
2$y$$3L$	0.006613257
3$y$$4L$	0.006386548
4$y$$5L$	0.006619335

Fig. A-11. ボイド率の軸方向分布を表示したデータシート。

⑥気泡径の空間分布： $D_b(x, y)$

y \ x	-3L$x$$-2L$	-2L$x$$-L$	-L$x$$0$	0$x$$L$	Lx
0$y$$L$	0	0	0	1.156982211	0.638
1$y$$2L$	0	0	2.086738901	0.895392203	0
2$y$$3L$	0	1.065999041	1.359502956	3.694472617	0
3$y$$4L$	0	3.215385684	1.841483074	0.308278921	0
4$y$$5L$	0	1.867799869	1.354055000	0.983698151	2.948

Fig. A-12. 気泡径の空間分布を表示したデータシート。

ここで、水平方向（軸方向）の座標 x の範囲は「単一画像の解析」ダイアログの「入力」タブにおける「解析メッシュの設定」に従う。上記のデータシートには、 $\dots, -2L < x < -L, -L < x < 0, 0 < x < L, \dots$ と表示されているが、正確には $\dots, -2L_x < x < -L_x, -L_x < x < 0, 0 < x < L_x, \dots$ である（ L_x は mm 単位）。また、この例では「解析メッシュの設定」において「中心軸をセルの境界に設定」を選択した場合を表示しているが、「中心軸をセルの中央に設定」を選択した場合には、 $\dots, -1.5L < x < -0.5L, -0.5L < x < 0.5L, 0.5L < x < 1.5L, \dots$ と表示される。

ただし、設定したセルの 1 辺の長さによって、原画像の端の方の情報が解析されない場合もある。すなわち、 x 方向のメッシュの設定に関しては、入力した中心軸を基準にセルを設定するので、原画像の左端と右端の“余り”の部分は解析されない。同様に、 y 方向のメッシュの設定に関しては、入力した底面を基準にセルを設定するので、原画像の上端の“余り”の部分は、やはり解析されない。

以上は、次に示すボイド率の空間分布 $\alpha(x, y)$ に関しても同様である。

⑦ボイド率の空間分布： $\alpha(x, y)$

$y \setminus x$	$-3L < x < -2L$	$-2L < x < -L$	$-L < x < 0$	$0 < x < L$	$L < x < 2L$
$0 < y < L$	0	0	0.002122519	0.007672117	0.000
$L < y < 2L$	0	0.001317590	0.010895327	0.005244359	0
$2L < y < 3L$	0	0.002036581	0.009341155	0.041529471	0
$3L < y < 4L$	0	0.014492795	0.020591436	0.014682525	0.000
$4L < y < 5L$	0	0.017908801	0.008349898	0.012622153	0.010

Fig. A-13. ボイド率の空間分布を表示したデータシート。

⑧プール内で空間平均したボイド率： $\langle \alpha \rangle_p$

このデータシートに表示される値は 1 つだけなので、ウィンドウ内に「保存」ボタンは設定していない。

	$\langle \alpha \rangle_p$
プール平均	0.004412966

Fig. A-14. ボイド率の空間平均値を表示したデータシート。

A. 2.5.2. 「連続画像処理の入力と出力」ダイアログ

基本的な操作手順は「単一画像処理の入力と出力」ダイアログと同じである。ただし、画像ファイルを連続的に取り込む際の条件を「入力」タブの「連続画像の入力設定」ウィンドウで行う。

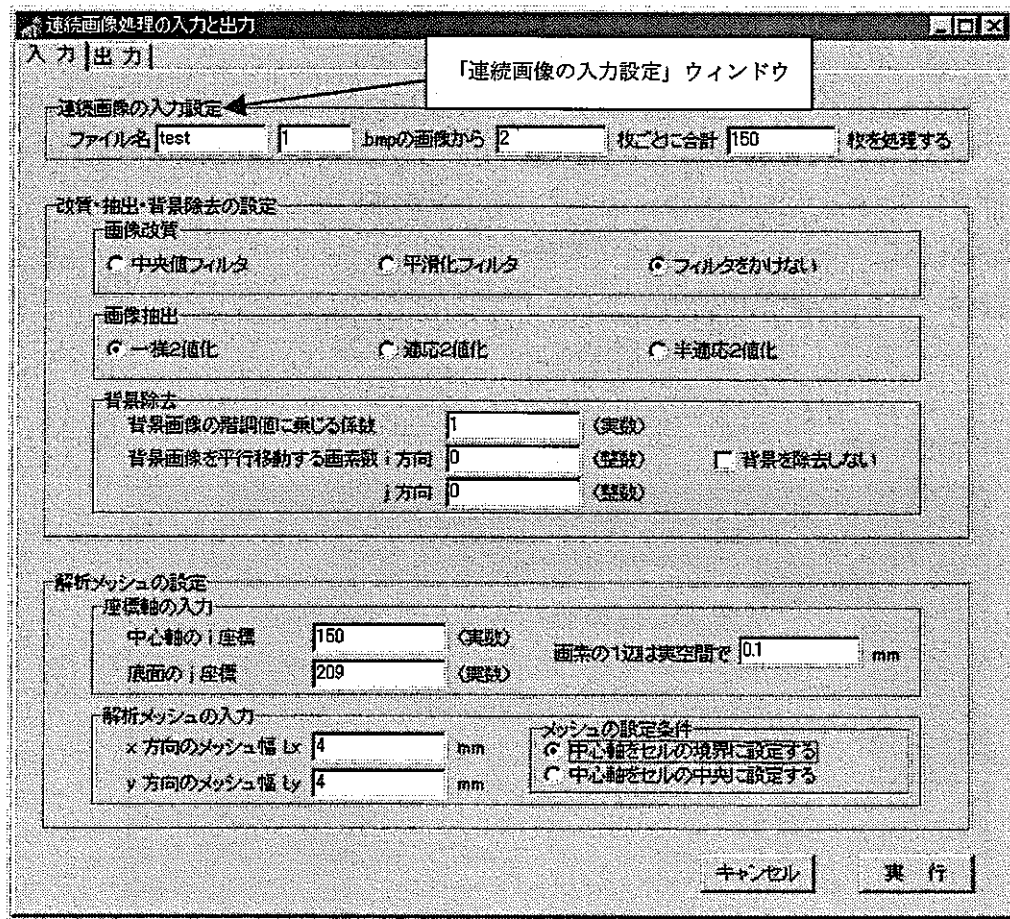


Fig. A-15. 「連続画像処理の入力と出力」ダイアログの「入力」タブ。

この「連続画像の入力設定」ウィンドウで指定した枚数だけ画像が連続的に処理される。ただし、時間的に連続した静止画像 (bmp ファイル) は予め、全て同じディレクトリ内に収納しておく必要がある。

一方、「出力」タブの「出力」ボタンから得られる時間平均量は以下の通りである。

- ⑨水平方向に平均した後、時間平均した気泡径の鉛直方向分布
- ⑩水平方向に平均した後、時間平均したボイド率の鉛直方向分布
- ⑪時間平均した気泡径の空間分布
- ⑫時間平均したボイド率の空間分布
- ⑬プール内で空間・時間平均したボイド率

これらの処理結果の「表示」と「保存」に関しては単一画像処理の場合と全く同様である。

Appendix B : 画像処理プログラム内におけるメッシュ・セルの設定

本プログラムでは、画像処理によって物理量を定量化する際に用いる解析メッシュを SIMMER-III コードの解析メッシュと対応させることができる。Fig. A-5 で示した $x-y$ 平面上の各セルは、画素の 1 辺に対応する実空間での長さを e [mm/pixel] とすると、以下のように記述されている。

(ア) x 方向のセル :

$$\left\{ (h-1) - \lambda - \text{Trunc.} \left(\frac{e \cdot i_y - \lambda \cdot L_x}{L_x} \right) \right\} L_x \leq x \leq \left\{ h - \lambda - \text{Trunc.} \left(\frac{e \cdot i_y - \lambda \cdot L_x}{L_x} \right) \right\} L_x \quad (\text{B-1})$$

ただし、

$$h = 1, 2, \dots, \text{Trunc.} \left(\frac{e \cdot i_y - \lambda \cdot L_x}{L_x} \right) + \text{Trunc.} \left(\frac{e \cdot (i_T - i_y) - \lambda \cdot L_x}{L_x} \right) + 2\lambda \quad (\text{B-2})$$

であり、

「中心軸がセルの境界」の場合 : $\lambda = 0$,

「中心軸がセルの中央」の場合 : $\lambda = 1/2$

である。

(イ) y 方向のセル :

$$(k-1)L_y \leq y \leq kL_y \quad (\text{B-3})$$

ただし、

$$k = 1, 2, \dots, \text{Trunc.} \left(\frac{e \cdot j_x}{L_y} \right) \quad (\text{B-4})$$

である。

Appendix C : 気泡重心、気泡径およびボイド率の算出方法

これらの物理量を2値化画像から求めるに先立ち、1枚の画像中に含まれる全ての気泡に通し番号を付けた(ラベリング処理)。この通し番号は各画素に対して割り当てられている。すなわち、 (i, j) における画素が通し番号 n の気泡に含まれているなら $\text{flg}[i, j] = n$ である。

「単一画像の解析」においては、この通し番号 n を媒介変数として重心座標、気泡径および気泡体積が表示される。

C.1. 各気泡の重心座標

$i - j$ 平面における気泡の重心座標 $(i_G(n), j_G(n))$ は次の式から得ることが出来る。

$$(i_G(n), j_G(n)) = \left(\frac{1}{N(n)} \sum_{m \in n} i_m, \frac{1}{N(n)} \sum_{m \in n} j_m \right) \quad (\text{C-1})$$

ただし、 $N(n)$ は $\text{flg}[i, j] = n$ をみたす全画素数であり、 Σ は $\text{flg}[i, j] = n$ をみたす画素の i 座標または j 座標の和を表す。

このようにして得られた $(i_G(n), j_G(n))$ を $x - y$ 平面における重心座標 $(x_G(n), y_G(n))$ に変換するには、

$$\begin{aligned} x_G(n) &= e \cdot \{ (i_G(n) + 0.5) - i_y \} \\ y_G(n) &= e \cdot \{ j_y - (j_G(n) + 0.5) \} \end{aligned} \quad (\text{C-2})$$

を用いた。これらの式の右辺で $i_G(n)$ および $j_G(n)$ に0.5を加えているのは、本来、整数で定義されている (i, j) 座標において $(i, j) = (0, 0)$ の画素の中心を実数定義の (i, j) 座標の原点とみなしたためである。

C.2. 各気泡の直径

$D_b(n)$ は $\text{flg}[i, j] = n$ をみたす画素が画像上で占める領域と面積が等しい円の直径で定義した。すなわち、通し番号 n が付けられたの気泡の $x - y$ 平面における直径は

$$D_b(n) = e \cdot \sqrt{\frac{N(n)}{(\pi/4)}} \quad (\text{C-3})$$

である。言い換えれば、円相当径である。

C.3. 各気泡の体積

各気泡の体積 $V_b(n)$ は

$$V_b(n) = \frac{\pi}{6} \{D_b(n)\}^3 \quad (\text{C-4})$$

によって求めた。したがって、球相当径を円相当径で近似したことになる。

C.4. 水平方向に平均した気泡径の鉛直方向分布

$(x_G(n), y_G(n))$ 、 $D_b(n)$ および $V_b(n)$ は、気泡の通し番号 n を媒介変数としているので、式(B-3)で定義される各セル内に重心をもつ気泡の直径を水平方向のセル内で平均することによって、水平方向に平均した気泡径 $\langle D_b \rangle(y)$ を求めた。

C.5. 水平方向に平均したボイド率の鉛直方向分布

式(C-2)および(C-3)で定義される球体：

$$\{x - x_G(n)\}^2 + \{y - y_G(n)\}^2 + z^2 = \left\{ \frac{D_b(n)}{2} \right\}^2 \quad (\text{C-5})$$

が式(B-3)で定義されるセルによって切り取られる“部分体積”の和をセルの体積 ($= (e \cdot i_T) \times L_y \times L_z$) で除して求めた。したがって、注目するセル内に重心が存在しない気泡でも気泡の一部がそのセルに含まれれば、含まれている部分の体積はボイド率を計算する際に考慮されている。

C.6. 気泡径の空間分布

これはC.4の場合と同様に式(B-1)と(B-3)の両方を満たすセル内に重心が存在する気泡の直径を平均したものである。

C.7. ボイド率の空間分布

基本的な考え方はC.5と同様である。ただし、C.5の場合と比べて、注目しているセルとそのセルに“部分体積”が包含される球体との位置関係は極めて複雑である。演算を簡単にするために、式(B-1)と(B-3)で表されるセルを x 方向、 y 方向のそれぞれに 200 等分したさらに細かいセルを設定し、この新たなセルの中心を通る直線が球体に切り取られる線分の長さ $L(h, k, s, t)$ とプールの奥行き方向の長さ L_z との比を、その新たなセルにおける局所ボイド率として定義した。この比を式(B-1)と式(B-3)で定義されるセル内で平均して、入力時に設定した各セルにおけるボイド率を求めた。すなわち、

$$\alpha(h, k) = \frac{\sum_{s=1}^{200} \sum_{t=1}^{200} \{L(h, k, s, t) / L_z\}}{200 \times 200} \quad (\text{C-6})$$

である。

C.8. プール内で空間平均したボイド率

画像中に存在する全気泡の体積の和をバルク側の全体積で除して求めた。ただし、画像に撮影されている範囲内での空間平均値である。すなわち、

$$\langle \alpha \rangle_p = \frac{\sum_{n=1}^{n_{\max}} V_b(n)}{(e \cdot i_T) \cdot (e \cdot j_x) \cdot L_z} \quad (\text{C-7})$$

によって定義した。ここで n_{\max} は処理を行っている画像中の全気泡個数である。

なお、「連続画像の処理」ダイアログにおいて出力される時間平均量は、個々の静止画像に対して「単一画像の処理」を適用した結果を時間平均して得られる値と同じものである。

Appendix D : 画像処理結果に基づく SIMMER-III の初期・境界条件

SIMMER-III コードの初期・境界条件を適切に与えるためには、入力ファイル (sim05) において次の変数をどのように定義するかが問題となる。

- (ア) 液相の初期 (入口) 流速 : $VC(x, 0, 2)$
- (イ) 気相の初期 (入口) 流速 : $VC(x, 0, 3)$
- (ウ) 境界セルの液相体積率 : $ALC(x, 0, 3)$
- (エ) 境界セルの液相温度 : $TLC(7, 0, 3)$
- (オ) 境界セルの気相温度 : $TGC(7, 0)$
- (カ) 初期気泡半径 : $RGINI$

ここで、(ア) の $VC(x, 0, 2)$ に関しては、液相の流動が気泡との運動量交換によって引き起こされることから、境界セルにおいては運動量交換が生じていないと考えて、 $VC(x, 0, 2) = 0$ を与えた。

また、(イ) の $VC(x, 0, 3)$ については、境界セルにおける気相流束 j_g とボイド率 $\langle \alpha \rangle(0)$ を用いて以下の式から算出した。

$$VC(x, 0, 3) = \frac{j_g}{\langle \alpha \rangle(0)} \quad (D-1)$$

ここで、 j_g の値は、実測したガスの体積流量 $Q_s + Q_n$ を解析体系においてガスが通過する領域の面積 (200mm×30mm) で除して求めた。また、 $\langle \alpha \rangle(0)$ は本文で述べたようにドリフト相関式(6)をみたくように画像処理結果を外挿して求めた。

さらに、(ウ) の液体積率に関しては

$$ALC(x, 0, 3) = 1 - \langle \alpha \rangle(0) \quad (D-2)$$

を用いて算出した。

(エ) および (オ) の境界セルにおける液相と気相の温度は、大気圧 P_0 、水頭圧 P_h およびガスがノズルを通過する時の圧力損失 ΔP の和に等しいと仮定したプレナム内圧力すなわち境界セルの圧力 P における飽和温度で与えた。これは、実験装置の構造上、蒸気発生器内で気液平衡状態が成立しているため、水槽内に吹き込まれた水蒸気が極端に過熱しているとは考え難いことと比較しても妥当な方法であると考えられる。具体的には、 P における飽和温度を T とすると、

$$P = P_0 + P_h + \Delta P = P_0 + P_h + \left[4f(P, T) \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_g(P, T) \cdot \{v(P, T)\}^2 \right] \quad (D-3)$$

を満たすように T を決定した。ここで、ノズル内の摩擦係数 f はレイノルズ数の関数として記述されるが、レイノルズ数がガス密度 $\rho_g(P, T)$ 、ガス速度 $v(P, T)$ およびガス粘度 $\mu(P, T)$ の関数として表されるため、結局、 P と T の関数である。

最後に、(カ) の初期気泡半径 $RGINI$ に関しては、画像処理の結果を単純に外挿した値を用いたが、外挿方法によって解析結果は若干異なるため、現段階では $RGINI$ を adjustable なパラメータとして調整している。