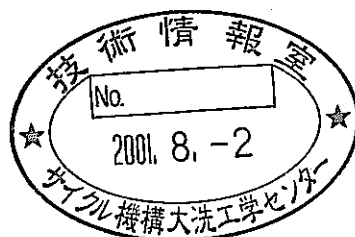


多成分多相流の熱流動現象の数値シミュレーションに 関する研究

— 相変化を伴う多成分多相流のモデル化手法の開発 —

(先行基礎工学研究に関する平成12年度共同研究報告書)



2001年6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・転載する場合には、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),

九州大学 (Kyushu University)

2001

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

—相変化を伴う多成分多相流のモデル化手法の開発—

(先行基礎工学研究に関する平成 12 年度共同研究報告書)

守田 幸路*, 松元 達也*, 赤坂 亮*, 福田 研二*

鈴木 徹**, 飛田 吉春**, 山野 秀将**, 近藤 悟***

要 旨

炉心損傷事故の安全解析コードにおける多成分多相流の熱流動現象の数値シミュレーション技術の高度化を図ることは、安全評価の信頼度を向上する上で重要な課題の一つである。核燃料サイクル開発機構と九州大学によって実施される共同研究では、損傷炉心における熱流動現象を評価する上で重要な挙動である多成分蒸気の蒸発/凝縮及び相間の界面積変化に着目し、これらを記述するための機構論的モデルの提案・開発を行う。本年度は、非凝縮性ガスの蒸発/凝縮挙動に及ぼす影響を扱うための拡散律速型モデルについて、高速炉の安全解析に適用可能な多成分系への拡張を進めた。また、非凝縮成分を含む気泡群の凝縮実験を新たに実施し、拡散律速型蒸発/凝縮モデルを導入した高速炉安全解析コードが、非凝縮性ガスを含む蒸気の凝縮過程を適切に再現できることを確認した。

本研究は、先行基礎工学研究に関する研究協力として、九州大学と核燃料サイクル開発機構との共同研究として実施したものである。

* 九州大学大学院工学研究院 附属環境システム科学研究センター

** 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 Study on a Numerical Simulation for Thermal-Hydraulic Phenomena of
Multi-phase, Multi-component Flows

—Modeling for Multi-phase, Multi-component Flows with Phase Change—

Koji MORITA*, Tatsuya MATSUMOTO*, Ryo AKASAKA*, Kenji FUKUDA*

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

Abstract

It is one of important problems for more reliable safety evaluation to improve numerical simulation techniques for thermal-hydraulic phenomena of multi-phase, multi-component flows in a safety analysis code for core disruptive accidents. In collaboration between Japan Nuclear Cycle Development Institute and Kyushu University, mechanistic models have been proposed and developed for vaporization/condensation processes of multi-component vapor and interfacial area changes between phases. These are essential behaviors to evaluate thermal-hydraulic phenomena in a disrupted reactor core. In this fiscal year, a diffusion-limited model, which describes the effect of non-condensable gas on vaporization/condensation behaviors, was extended to a multi-component system for the fast reactor safety analysis. In addition, it was confirmed that a fast reactor safety analysis code with the diffusion-limited model represents the condensation process with a non-condensable gas appropriately in a newly performed bubble-condensation experiment.

Work performed under contracts between Japan Nuclear Cycle Development Institute and Kyushu University

* Institute of Environmental Systems, Graduate School of Engineering, Kyushu University

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

*** Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center

目 次

1. 緒 言	1
1. 1 研究の目的と概要	1
1. 2 研究の内容	1
1. 3 研究の進捗	2
2. 拡散律速型蒸発／凝縮モデルの開発	4
2. 1 SIMMER-III コードの蒸発／凝縮モデル	4
2. 1. 1 伝熱律速型相変化モデル	4
2. 1. 2 蒸発／凝縮モデルの保存式	5
2. 2 拡散律速型相変化モデル	8
2. 2. 1 基礎方程式	8
2. 2. 2 基本解法	9
2. 2. 3 SIMMER-III コードへの導入	12
3. 拡散律速型蒸発／凝縮モデルの検証実験	32
3. 1 検証実験の概要	32
3. 1. 1 実験装置の概略	32
3. 1. 2 可視化画像の収録	33
3. 2 画像処理の概要	33
3. 2. 1 システムの構築	34
3. 2. 2 プログラムの概要	34
3. 2. 3 気泡径とボイド率の定量化方法	35
3. 3 可視化画像の処理	35
3. 3. 1 処理結果の妥当性に関する検討	35
3. 3. 2 処理に用いる画像枚数の検討	36
3. 3. 3 純粋な蒸気泡が凝縮する場合の処理結果	37
3. 3. 4 非凝縮成分を含む蒸気泡が凝縮する場合の処理結果	38
3. 4 SIMMER-III コードによる気泡凝縮実験の解析	38
3. 4. 1 解析体系と解析方法	38
3. 4. 2 解析結果と実験結果との比較	39
3. 4. 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	40
4. 結 言	57
謝 辞	58
記号説明	59
参考文献	61

圖表目次

Table 2.	Vaporization/condensation paths treated in SIMMER-III.	14
Fig. 2-1.	Geometric model and initial conditions for FCI problem.....	15
Fig. 2-2.	Vapor volume fraction in FCI problem.	16
Fig. 2-3.	Vapor temperature in FCI problem.	17
Fig. 2-4.	Pressure in FCI problem.	18
Fig. 2-5.	Geometric model and initial conditions for LWE problem.....	19
Fig. 2-6.	Kinetic energy of sodium slug in LWE problem.	20
Fig. 2-7.	Cover-gas pressure in LWE problem.	21
Fig. 2-8.	Geometric model and initial conditions for LBP problem.....	22
Fig. 2-9.	Volume fractions of vapor, liquid fuel and steel at cell (1,1) in LBP problem.	23
Fig. 2-10.	Volume fractions of vapor, liquid fuel and steel at cell (4,3) in LBP problem.	24
Fig. 2-11.	Volume fractions of vapor, liquid fuel and steel at cell (4,6) in LBP problem.	25
Fig. 2-12.	Pressure at cell (1,1) in LBP problem.....	26
Fig. 2-13.	Pressure at cell (4,3) in LBP problem.....	27
Fig. 2-14.	Pressure at cell (4,6) in LBP problem.....	28
Fig. 2-15.	Temperatures of vapor and liquid fuel at cell (1,1) in LBP problem.	29
Fig. 2-16.	Temperatures of vapor and liquid fuel at cell (4,3) in LBP problem.	30
Fig. 2-17.	Temperatures of vapor and liquid fuel at cell (4,6) in LBP problem.	31
Fig. 3-1.	Experimental apparatus.....	41
Fig. 3-2.	Flow chart of image-processing program.	42
Fig. 3-3.	Binary process.....	43
Fig. 3-4.	Particles for the calibration of image processing.....	44
Fig. 3-5.	Validity of image processing.....	45
Fig. 3-6.	Photographs of bubbly flows.	46
Fig. 3-7.	Magnified photographs of bubbles.	47
Fig. 3-8.	Effect of sampling time on void distribution.	48
Fig. 3-9.	Effect of sampling time on the distributions.	49
Fig. 3-10.	Experimental data for pure steam.	50
Fig. 3-11.	Experimental data for steam-nitrogen mixture.	51

Fig. 3-12. Geometric model for analysis.....52

Fig. 3-13. Comparison between heat-transfer-limited (HTL) model and experiment for pure steam system.53

Fig. 3-14. Comparison between diffusion-limited (DL) model and experiment for steam-nitrogen system.54

Fig. 3-15. Comparison of void distributions between SIMMER-III analysis and experiment for steam-nitrogen system.....55

Fig. 3-16. Comparison of the condition which gives remarkable difference between diffusion-limited (DL) and heat-transfer-limited (HMT) models for steam-nitrogen system.56

1. 緒言

本報告書は、平成 11 年度より三カ年計画で実施している先行基礎工学研究「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 ―相変化を伴う多成分多相流のモデル化手法の開発―」のうち、平成 12 年度に核燃料サイクル開発機構（サイクル機構）と九州大学で実施した成果の一部をまとめたものである。

1. 1 研究の目的と概要

高速炉の炉心崩壊事故時に炉心内で生ずる多相・多成分の流動・伝熱・相変化の複合現象に対する数値計算手法の高度化を図ることは、高速炉の安全評価の信頼度を向上する上で重要な課題の一つである。本研究では、炉心崩壊事故時の損傷炉心における熱流動現象を解析・評価する上で重要な界面挙動である多成分蒸気の蒸発／凝縮及び相間の界面積変化に着目し、これらのミクロな挙動を記述するための機構論的モデルの提案・開発を行う。これにより、炉心損傷事故の安全解析コードにおける多成分多相流の熱流動現象の数値シミュレーション技術の高度化を図り、安全評価の信頼度向上に資する。

本研究では、相変化を伴う多成分多相流における相間及び物質間の界面挙動を記述する要素物理モデルの高度化を図ることで、多相・多成分の流動・伝熱・相変化の複合現象を精度良く模擬できる数値計算手法を構築する。このため損傷炉心の熱流動現象を解析・評価する上で重要な界面挙動である

1) 拡散律速挙動を伴う多成分蒸気の蒸発／凝縮

2) 相変化／流動変化に伴う相間の界面積変化

に着目し、これらのミクロな挙動を記述するための機構論的モデルの提案・開発を行う。また、高度化されたモデルを複合現象の解析に適用することで、その妥当性を検証するとともに、安全評価における改善効果を評価する。

1. 2 研究の内容

本研究では、以下の項目について実施する。

1) 高度化すべき支配的機構の抽出

高速炉の炉心損傷事故評価の観点から、損傷炉心の熱流動現象の支配的な挙動に着目して、数値シミュレーションのための物理モデルの高度化が必要かつ有効なメカニズムを抽出・整理する。

2) 多成分蒸気の拡散挙動を考慮した多成分蒸発／凝縮モデルの開発

多成分系での蒸発／凝縮による質量移行は、エネルギー状態の異なる成分間で生

ずる熱移行によって駆動されるだけでなく、混合蒸気に含まれる非凝縮性ガスの拡散挙動の影響も受ける。ここでは、従来の伝熱律速型相変化モデルに加え、拡散律速型モデルの導入を図ることで、多成分系での熱及び質量移行現象の一般化モデルを開発する。

3) 相変化／流動変化に伴う相間の界面積変化の解析モデルの開発

相変化や流動変化に伴う気泡や液滴の界面積変化は、相間の界面積濃度の対流方程式におけるソース項によってモデル化される。ここでは、過去の実験データ、各種相関式等を広くサーベイすることにより、流動変化／相変化に伴う気泡や液滴の界面積変化の挙動を現象に応じて適切に記述できるようソース項の体系的モデル化を図る。

4) 実験検証による要素物理モデルの妥当性の確認

2) 及び3) で高度化された物理モデルに対する基礎的な検証データが不十分である場合は、新たな検証実験を実施することで、これらの汎用性と一般性について基礎的な妥当性を確認する。

5) 複合現象解析による総合検証及び安全解析コードへの反映

2) 及び3) で高度化された物理モデルを複合現象解析に適用し、総合的なモデル検証よって高速炉の安全評価における改善効果を評価するとともに、その成果を高速炉安全解析コード SIMMER-III へ反映する。

1. 3 研究の進捗

本研究の開始年度である平成 11 年度は、損傷炉心の熱流動現象の数値解析において物理モデルの高度化が必要かつ有効な支配機構について検討するとともに、以下の成果を得ている [1]。

- 1) 拡散律速挙動を伴う多成分蒸気の蒸発／凝縮現象について、2成分系での蒸発／凝縮挙動に適用可能な物理モデルを開発し、SIMMER-III コードに導入した。さらに、既存の実験解析によって開発モデルの基本的な妥当性を検証した。
- 2) 流動変化に伴う気泡や液滴の界面積変化の挙動に関する過去の実験データ、各種相関式等について広く文献をサーベイし、SIMMER-III コードで用いられている界面積濃度の対流方程式のモデル化手法の妥当性について検討することで、今後のモデル検証・改良の指針を得た。
- 3) 開発モデル及び SIMMER-III コードの妥当性を検証するために、蒸気泡群の

凝縮現象を対象とした予備的な実験を実施し、検証データを取得するための課題を摘出した。

3カ年計画の共同研究の2年目に当たる本年度は、研究工程の最適化を図るため、上記1)及び3)に関連する「多成分系拡散律速モデルの開発と高速炉安全解析コードへの導入」及び「蒸気泡群の凝縮実験による拡散律速型蒸発凝縮モデルの検証」について優先して実施した。

2. 拡散律速型蒸発／凝縮モデルの開発

蒸発／凝縮挙動は、相変化を生ずる界面での温度勾配に依存した熱収支に支配されるが、非凝縮性ガスを含む多成分系では蒸気成分の拡散挙動が重要となる。炉心物質（燃料、スチール、ナトリウム、FP ガス）の蒸発／凝縮挙動は、それぞれが異なる物性値（例えば、前者3つの沸点は、それぞれ約 3800K, 3100K, 1150K）を有している。従って、固相／気相／液相間の各接触界面では、各成分の熱力学的状態に応じて複数の相変化が同時に生じ得る。接触境界面での熱収支を基本とする伝熱律速型のモデルは、気液二相流を対象とした二流体モデル等にも用いられている。しかしながら、多成分多相流に対する評価手法の高度化を図る上では、多成分相変化を扱う多流体モデルに適用可能な評価手法を確立することが重要である。

伝熱律速型の概念に基づいて定式化されている SIMMER-III コードの蒸発／凝縮モデルの妥当性については、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、蒸気に非凝縮性ガスが混在する場合の凝縮過程が適切に模擬できないことも指摘されている [2]。これは、非凝縮性ガスが混在する場合の熱伝達が、蒸気側の拡散抵抗の存在によって純蒸気の場合に比較して著しく低下する現象が適切にモデル化されていないことに起因する。この基本現象は、高速炉の事故解析では、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「炉心損傷事故時に発生する蒸気泡の凝縮効果」を適切に評価する上で重要な現象であることから、SIMMER-III コードにおいても、そのモデル化を実現することが開発課題の一つであった。

ここでは、高速炉の安全解析で扱う多成分系での蒸発／凝縮現象を適切に記述するため、SIMMER-III コードに拡散律速型の相変化モデルを導入することを目的とし、必要な物理モデル開発と検証研究を実施する。

2. 1 SIMMER-III コードの蒸発／凝縮モデル

2. 1. 1 伝熱律速型相変化モデル

SIMMER-III コードでは、流体成分間及び流体－構造材間の接触境界面で生じる相変化過程は、物質内部の熱的状态が、一般には、相変化条件に達していないことから「非平衡過程」と呼ばれ、エネルギー成分間の接触境界におけるエネルギー収支に基づく伝熱律速の相変化過程としてモデル化される。エネルギー成分 A 及び B 間の接触境界面での単位体積当たりのエネルギー移行率を

$$q_{A,B} = R_{A,B} a_{A,B} h_{A,B} (T_{A,B}^1 - T_A) \quad \text{成分 A 側} \quad (2-1)$$

$$q_{B,A} = R_{A,B} a_{A,B} h_{A,B} (T_{A,B}^1 - T_B) \quad \text{成分 B 側} \quad (2-2)$$

で定義する。ここで、 $R_{A,B}$ は、多成分蒸気の影響を考慮するために導入された接触境界面積 $a_{A,B}$ の修正係数である。境界面での正味のエネルギー移行率 $q_{A,B}^I$ は次式で表される。

$$q_{A,B}^I = q_{A,B} + q_{B,A} \quad (2-3)$$

ここで、 $q_{A,B}^I = 0$ であれば、成分 A, B 間では相変化が生じず、顕熱が交換されることになる。 $q_{A,B}^I > 0$ 、すなわち、境界面でエネルギー損失がある場合、液体の固化あるいは蒸気の凝縮が生ずる。この場合、単位体積当たりの質量移行率は、次式から決定される。

$$\Gamma_{A,B}^I = \frac{q_{A,B}^I}{i_A - i_B} \quad \text{相変化によって成分 B が生ずる場合} \quad (2-4)$$

$$\Gamma_{A,C}^I = \frac{q_{A,B}^I}{i_A - i_C} \quad \text{相変化によって成分 C が生ずる場合} \quad (2-5)$$

一方で、 $q_{A,B}^I < 0$ 、すなわち、境界面でエネルギー増加がある場合、固体の溶融あるいは液体の蒸発が生ずる。この場合、単位体積当たりの質量移行率は、次式から決定される。

$$\Gamma_{B,A}^I = -\frac{q_{A,B}^I}{i_A - i_B} \quad \text{相変化によって成分 A が生ずる場合} \quad (2-6)$$

$$\Gamma_{B,D}^I = -\frac{q_{A,B}^I}{i_D - i_B} \quad \text{相変化によって成分 D が生ずる場合} \quad (2-7)$$

上記の4つの式では、境界面のエンタルピーとバルクのエンタルピーの差を実効的な潜熱として定義している。相変化が生ずる場合、境界面温度は、融点や飽和温度等の相変化温度として定義される。

2. 1. 2 蒸発／凝縮モデルの保存式

SIMMER-III コードで取り扱う7つの流体エネルギー成分（液体燃料、スチール及びナトリウム、燃料、スチール及び制御材粒子、及び混合蒸気）と3つの構造表表面（燃料ピン及び左右の集合体管壁）間には、42の接触界面が存在する。これらの接触界面で考慮されている蒸発／凝縮過程（Table 2 参照）は、前節で述べた伝熱律速型の相変化としてモデル化されている。一方、SIMMER-III コードは、流体力学の解法に4ステップ法と呼ばれる半陰解法のアルゴリズムを用いている[3]。この4ステップ法では、保存式に含まれるセル内のソース項とセル間の対流項を分離して解くため、蒸発／凝縮モデルで扱われる質量及びエネルギー保存式には、セ

ル内で生ずる質量及び熱移行項のみが含まれることになる。SIMMER-III コードの蒸発／凝縮モデルの保存式は、以下に示す混合蒸気、3つの液体成分（燃料、ステール及びナトリウム）及び6つの固体成分（燃料粒子、ステール粒子、制御材粒子、左右の集合体管壁表面及び燃料ピン表面）である。

液体及び蒸気の質量保存式は、

$$\frac{\partial \bar{\rho}_{Lm}}{\partial t} = \Gamma_{G,Lm}^{NE} - \Gamma_{Lm,G}^{NE}, \quad m = 1, 2 \text{ and } 3 \quad (2-8)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}_{Gm}}{\partial t} = \Gamma_{Lm,G}^{NE} - \Gamma_{G,Lm}^{NE}, \quad m = 1, 2 \text{ and } 3 \quad (2-9)$$

であり、質量移行率は次式で与えられる。

$$\Gamma_{G,L1}^{NE} = \Gamma_{G,L1}^{I1} + \Gamma_{G,L1}^{I2} + \Gamma_{G,L1}^{I3} + \sum_{k=1}^6 \Gamma_{G,L1}^{I(k)} \quad (2-10)$$

$$\Gamma_{G,L2}^{NE} = \Gamma_{G,L2}^{I2} + \Gamma_{G,L2}^{I3} + \sum_{k=1}^6 \Gamma_{G,L2}^{I(k)} \quad (2-11)$$

$$\Gamma_{G,L3}^{NE} = \Gamma_{G,L3}^{I3} + \sum_{k=1}^6 \Gamma_{G,L3}^{I(k)} \quad (2-12)$$

$$\Gamma_{L1,G}^{NE} = \Gamma_{L1,G}^{I1} \quad (2-13)$$

$$\Gamma_{L2,G}^{NE} = \Gamma_{L2,G}^{I2} + \Gamma_{L2,G}^{I7} \quad (2-14)$$

$$\Gamma_{L3,G}^{NE} = \Gamma_{L3,G}^{I3} + \Gamma_{L3,G}^{I8} + \Gamma_{L3,G}^{I12} \quad (2-15)$$

エネルギー保存式は、比内部エネルギーの時間微分に関して以下のように記述される。

固体成分：

$$\bar{\rho}_{K(k)} \frac{\partial e_{K(k)}}{\partial t} = \sum_{m=1}^4 R_{Gm,K(k)} a_{G,K(k)} h_{K(k)} (T_{Gm,K(k)}^I - T_{K(k)}) \quad (2-16)$$

液体成分：

$$\begin{aligned} \bar{\rho}_{L1} \frac{\partial e_{L1}}{\partial t} = & \Gamma_{G,L1}^{NE} (i_{Con,M(L1)} - e_{L1}) \\ & + \sum_{m=2}^3 a_{L1,Lm} h_{L1,Lm} (T_{L1,Lm}^I - T_{L1}) \end{aligned}$$

$$+R_{G1,L1}a_{G,L1}h_{L1,G}(T_{G1,L1}^1 - T_{L1}) + R_{G4,L1}a_{G,L1}h_{L1,G}(T_{G4,L1}^1 - T_{L1}) \quad (2-17)$$

$$\begin{aligned} \bar{\rho}_{L2} \frac{\partial e_{L2}}{\partial t} &= \Gamma_{G,L2}^{NE} (i_{\text{Con},M(L2)} - e_{L2}) \\ &+ a_{L1,L2}h_{L2,L1}(T_{L1,L2}^1 - T_{L2}) + a_{L2,L3}h_{L2,L3}(T_{L2,L3}^1 - T_{L2}) \\ &+ \sum_{m=1}^2 R_{Gm,L2}a_{G,L2}h_{L2,G}(T_{Gm,L2}^1 - T_{L2}) + R_{G4,L2}a_{G,L2}h_{L2,G}(T_{G4,L2}^1 - T_{L2}) \end{aligned} \quad (2-18)$$

$$\begin{aligned} \bar{\rho}_{L3} \frac{\partial e_{L3}}{\partial t} &= \Gamma_{G,L3}^{NE} (i_{\text{Con},M(L3)} - e_{L3}) \\ &+ \sum_{m=1}^2 a_{Lm,L3}h_{L3,Lm}(T_{Lm,L3}^1 - T_{L3}) + \sum_{m=1}^4 R_{Gm,L3}a_{G,L3}h_{L3,G}(T_{Gm,L3}^1 - T_{L3}) \end{aligned} \quad (2-19)$$

混合蒸気：

$$\begin{aligned} e_G \frac{\partial \bar{\rho}_G}{\partial t} &= \sum_{m=1}^3 \left[\Gamma_{Lm,G}^{NE} (i_{\text{Vap},M(Gm)} - e_G) - \Gamma_{G,Lm}^{NE} (i_{Gm} - e_G) \right] \\ &+ \sum_{m=1}^3 R_{Gm,Lm}a_{G,Lm}h_{G,Lm}(T_{Gm,Lm}^1 - T_G) \\ &+ R_{G1,L2}a_{G,L2}h_{G,L2}(T_{G1,L2}^1 - T_G) + \sum_{m=1}^2 R_{Gm,L3}a_{G,L3}h_{G,L3}(T_{Gm,L3}^1 - T_G) \\ &+ \sum_{m=1}^4 \sum_{k=1}^6 R_{Gm,K(k)}a_{G,K(k)}h_{G,K(k)}(T_{Gm,K(k)}^1 - T_G) \end{aligned} \quad (2-20)$$

ここで、多成分蒸気の影響を考慮した接触境界面積の修正係数には、以下のような関係がある。

$$R_{G4,L1} = 1 - R_{G1,L1} \quad (2-21a)$$

$$R_{G4,L2} = 1 - \sum_{m=1}^2 R_{Gm,L2} \quad (2-21b)$$

$$R_{G4,L3} = 1 - \sum_{m=1}^3 R_{Gm,L3} \quad (2-21c)$$

$$R_{G4,K(k)} = 1 - \sum_{m=1}^3 R_{Gm,K(k)} \quad (2-21d)$$

SIMMER-III コードの蒸発／凝縮計算では、5つの保存式(2-9)、(2-19)及び(2-20)を連立し、多変数 Newton-Raphson 法を用いて、これらを implicit に解いている。

2. 2 拡散律速型相変化モデル

2. 2. 1 基礎方程式

多成分系での拡散律速による蒸発／凝縮過程を記述する基礎式は，相変化する蒸気成分の数を N 個とすると，以下のように記述される [1]。

$$\Gamma_k = -a_i k_k^* (\omega_{k,i} - \omega_{k,\infty}) + \omega_{k,i} \sum_{j=1}^N \Gamma_j \quad (2-22)$$

$$\sum_{j=1}^N \Gamma_{j|g,j} = a_i [h_g^* (T_i - T_g) + h_o^* (T_i - T_o)] \quad (2-23)$$

ここで，単位体積当たりの蒸発／凝縮率 Γ_k は，負を蒸発，正を凝縮として定義する。理想気体を仮定すると，モル分率

$$x_k = \frac{p_k}{p_g} \quad (2-24)$$

を用いて，質量分率は

$$\omega_k = \frac{x_k W_k}{\sum_{j=1}^N x_j W_j + x_{ng} W_{ng}} \quad (2-25)$$

で与えられる。ここで，相変化しない蒸気成分が M 個ある場合，非凝縮性ガスの全モル質量は

$$W_{ng} = \frac{\sum_{j=1}^M p_{ng,j} W_{ng,j}}{p_{ng}} \quad (2-26)$$

で与えられる。さらに，接触界面では，バルク間の圧力平衡状態を仮定すると

$$p_{g,i} = p_{g,\infty} = \sum_{j=1}^N p_{sat,j}(T_i) + p_{ng,i} \quad (2-27)$$

が成立し

$$x_{k,i} = \frac{p_{sat,k}(T_i)}{p_g} \quad (2-28)$$

$$x_{ng,i} = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N p_{sat,j}(T_i)}{p_g} = 1 - \sum_{j=1}^N x_{j,i} \quad (2-29)$$

とおける。

対流による物質輸送が無視できない場合、物質伝達係数及び熱伝達係数は、それぞれ

$$k_k^* = \frac{\phi_{m,k}}{\exp(\phi_{m,k}) - 1} k_k \quad (2-30)$$

$$h^* = \frac{\phi_h}{\exp(\phi_h) - 1} h \quad (2-31)$$

で与えられる。ここで

$$\phi_{m,k} = \frac{\sum_{j=1}^N n_j}{k_k} \quad (2-32)$$

$$\phi_h = \frac{\sum_{j=1}^N n_j c_{p,j}}{h} \quad (2-33)$$

である。また、熱伝達係数及び物質伝達係数は

$$h = \frac{\kappa}{\ell} Nu \quad (2-34)$$

$$k = \frac{\rho_g D_{kg}}{\ell} Sh \quad (2-35)$$

で与えられ、熱伝達と物質伝達のアナロジーを仮定することで、熱伝達と物質伝達に対して同一の無次元整理式を用いる。

2. 2. 2 基本解法

SIMMER-III コードの伝熱律速モデルでは、接触界面で蒸発／凝縮が生ずる場合、境界面温度は、相変化する蒸気成分の飽和温度 T_{sat} として定義される。この場合、質量移行率は

$$\Gamma_k(T_{sat}) = \frac{R_k \alpha_i [h_g (T_{sat} - T_g) + h_o (T_{sat} - T_o)]}{i_{lg,k}} \quad (2-36)$$

で与えられ、多成分蒸気の影響を考慮した接触境界面積の修正係数 R_k を全蒸気圧に対する蒸気成分の分圧比

$$R_k = \frac{p_k}{p_g} \quad (2-37)$$

とすることで、多成分蒸気が相変化に与える影響を近似的にモデル化している。一方、拡散律速モデルでは、(2-22)及び(2-23)式を満たす境界面温度 T_i を用いると質量移行率は

$$\Gamma_k(T_i) = \frac{a_i [h_g(T_i - T_g) + h_o(T_i - T_o)]}{i_{lg,k}} \quad (2-38)$$

で与えられる。SIMMER-III コードの蒸発/凝縮モデルの反復計算に、(2-22)及び(2-23)式を組み込んで解くことは、数値的な安定性や数値計算効率の観点から、必ずしも望ましい方法ではない。従って、ここでは、拡散律速モデルに基づく質量移行率から、伝熱律速モデルに基づく質量移行率に対する補正係数を

$$C_k = \frac{\Gamma_k(T_i)}{\Gamma_k(T_{sat})} \quad (2-39)$$

で定め、蒸発/凝縮モデルの反復計算で用いられる修正係数 R_k を(2-37)式の代わりに

$$R_k = C_k \frac{p_k}{p_g} \quad (2-40)$$

とおくことで、多成分系蒸気の拡散律速挙動を考慮する。(2-39)式で定められる補正係数は、反復計算前の物理量から求め、蒸発/凝縮の反復計算では一定値として扱う。この場合、蒸発/凝縮によってもバルクの状態が変化しないと仮定すると、(2-22)及び(2-23)式は境界面温度 T_i の非線形方程式となり、Newton-Raphson 法を用いて反復計算によって得ることができる。(2-23)式に(2-22)式を代入し、(2-22)式から得られる式

$$\sum_{j=1}^N \Gamma_j = -\frac{a_i}{\omega_{ng,i}} \sum_{j=1}^N k_j^* (\omega_{j,i} - \omega_{j,\infty}) \quad (2-41)$$

を用いて整理すると、解くべき方程式として以下を得る。

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^N k_j^* (\omega_{j,i} - \omega_{j,\infty}) i_{lg,j} + \frac{1}{\omega_{ng,i}} \sum_{j=1}^N \omega_{j,i} i_{lg,j} \sum_{j=1}^N k_j^* (\omega_{j,i} - \omega_{j,\infty}) \\ + [h_g^*(T_i - T_g) + h_o^*(T_i - T_o)] = 0 \end{aligned} \quad (2-42)$$

上式の左辺を $f(T_i)$ とおき、一回の反復計算での T_i の増分値を ΔT_i とすると

$$\Delta T_i = -f^n(T_i^n) \left/ \frac{df}{dT_i} \right|_{T_i^n}^n \quad (2-43)$$

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \Delta T_i \quad (2-44)$$

$$f(T_i)^{n+1} = f(T_i^{n+1}) \quad (2-45)$$

$$\left. \frac{df}{dT_i} \right|^{n+1} = \left. \frac{df}{dT_i} \right|_{T_i^{n+1}} \quad (2-46)$$

の関係から、(2-43)～(2-46)式を $f(T_i)^{n+1} \cong 0$ が満たされるまで反復計算することで T_i を得ることができる。ここで、上付き添字 n は反復回数を表す。また、 df/dT_i は、以下の式から計算される。

$$\begin{aligned} \frac{df}{dT_i} = & \sum_{j=1}^N \left\{ \frac{dk_j^*}{dT_i} (\omega_{j,i} - \omega_{j,\infty}) + k_j^* \frac{d\omega_{j,i}}{dT_i} \right\} i_{lg,j} + \frac{1}{\omega_{ng,i}} \sum_{j=1}^N \frac{d\omega_{j,i}}{dT_i} i_{lg,j} \sum_{j=1}^N k_j^* (\omega_{j,i} - \omega_{j,\infty}) \\ & + \frac{1}{\omega_{ng,i}} \sum_{j=1}^N \omega_{j,i} i_{lg,j} \left[\sum_{j=1}^N \left\{ \frac{dk_j^*}{dT_i} (\omega_{j,i} - \omega_{j,\infty}) + k_j^* \frac{d\omega_{j,i}}{dT_i} \right\} + \frac{1}{\omega_{ng,i}} \sum_{j=1}^N k_j^* (\omega_{j,i} - \omega_{j,\infty}) \sum_{j=1}^N \frac{d\omega_{j,i}}{dT_i} \right] \\ & + (h_g^* + h_o^*) + \left[\frac{dh_g^*}{dT_i} (T_i - T_g) + \frac{dh_o^*}{dT_i} (T_i - T_o) \right] \quad (2-47) \end{aligned}$$

ここで、物質伝達係数 k_k^* 及び接触界面での質量分率 $\omega_{k,i}$ の微係数は、それぞれ、(2-30) 及び(2-25)式より

$$\frac{dk_k^*}{dT_i} = - \frac{\exp(\phi_{m,k})(1 - \phi_{m,k}) - 1}{[\exp(\phi_{m,k}) - 1]^2} (h_g + h_o) \sum_{j=1}^N \frac{1}{i_{lg,j}} \quad (2-48)$$

$$\frac{d\omega_{k,i}}{dT_i} = \frac{W_k \left[\sum_{j=1}^N x_{j,i} W_j + x_{ng,i} W_{ng} - x_{k,i} (W_k - W_{ng}) \right]}{\left(\sum_{j=1}^N x_{j,i} W_j + x_{ng,i} W_{ng} \right)^2} \frac{1}{p_g} \left. \frac{dp_{sat,k}}{dT} \right|_{T_i} \quad (2-49)$$

で与えられる。

一方、非凝縮性ガスが存在しない場合は、境界面での全圧がバルクと等しくなるように境界面温度 T_i を定める。すなわち、

$$p_{g,\infty} - \sum_{j=1}^N p_{sat,j}(T_i) = 0 \quad (2-50)$$

を満たす T_i を非凝縮性ガスが存在する場合と同様に、Newton-Raphson 法を用いて求める。この場合、 df/dT_i は、次式で与えられる。

$$\frac{df}{dT_i} = - \sum_{j=1}^N \frac{dp_{sat,j}}{dT} \Big|_{T_i} \tag{2-51}$$

2. 2. 3 SIMMER-III コードへの導入

SIMMER-III コードで扱われる相変化のうち拡散律速挙動を考慮すべきものは、蒸気/液体燃料、蒸気/液体スチール、蒸気/液体ナトリウム、蒸気/固体粒子及び蒸気/構造材表面の接触界面で生ずる蒸発/凝縮過程である。これらの接触界面では、相変化可能な蒸気成分、相変化しない蒸気成分を以下のように分類できる。

Interface	Vapor component with possible phase change		Vapor component without phase change
	Only condensation	Vaporization and condensation	
Vapor/Liquid fuel		fuel	steel, sodium, FP gas
Vapor/Liquid steel	fuel	steel	sodium, FP gas
Vapor/Liquid sodium	fuel, steel	sodium	FP gas
Vapor/Solid particles Vapor/Structure surfaces	fuel, steel, sodium		FP gas

この表から分かるように、各接触界面では、常に非凝縮性ガスとしてのみ扱われる蒸気成分と、相変化条件を満たさない場合に非凝縮性ガスとなる蒸気成分が存在する。従って、(2-39)式で定められる補正係数 C_k を蒸発/凝縮の反復計算で一定値として扱うためには、各接触界面において相変化する蒸気成分を予測し、 C_k を得る必要がある。以下に、その計算手順を示す。

- 1) 蒸発/凝縮反復計算の前に、各接触界面において伝熱律速モデルから相変化する蒸気成分を explicit に予測する。更に、相変化しない成分も含めて非凝縮性ガスが存在する場合は(2-42)式、存在しない場合は(2-50)式を解いて境界面温度 T_i を得る。
- 2) 得られた境界面温度 T_i が相変化する蒸気成分の臨界温度を超えた場合、その蒸気成分を非凝縮性ガスに含め、再度、(2-42)式を解くことで、境界面温度 T_i を得る。
- 3) 得られた境界面温度 T_i が相変化する蒸気成分の液化温度を下回った場合、あるいは、拡散律速モデルによって予測される相変化の方向が伝熱律速モデルと整合しない場合、 $C_k = 1$ とすることで、伝熱律速モデルを適用する。

以上の計算手順に基づき、前節に述べた基本解法を SIMMER-III コード (Ver. 2H_CSF19) へ導入した。これにより、SIMMER-III コードにおいても、多成分系蒸

気の拡散律速による蒸発／凝縮挙動を取り扱うことが可能となった。但し、今回のバージョンでは、(2-31)式による熱伝達係数の補正は考慮していない。コードの修正は、FACOM 大型計算機上で動作するコード管理システム HISTORIAN [4] を用いることで行われ、総数 2000 行を越える Historian の修正・追加ファイルを作成した。本モデルを有効にするには、以下のユーザー入力を用いる。

XCNTL/HMTOPT(11): Option to apply multi-component gas diffusion model to the V/C calculation (default value: 0).

=0: No gas diffusion model is applied (V/C is calculated based on the heat-transfer limited model).

>0: The gas diffusion model is applied. HMTOPT(11) is the maximum number of iterations to calculate the interface temperature. The recommended value is '50'.

多成分系拡散律速型相変化モデルを導入した SIMMER-III コードの動作を確認するため、本コードの基本機能確認用のサンプル問題 (3-cell Fuel Coolant Interaction: FCI, Little Work Energy: LWE 及び Little Boiling Pool: LBP) [3] を実施した。それぞれの解析体系及び結果を Fig. 2-1～2-4 (FCI), Fig. 2-5～2-7 (LWE) 及び Fig. 2-8～2-17 (LBP) に示す。これらのサンプル問題の計算で、拡散律速モデルの導入によって数値計算の効率、安定性について特に問題の生じないことを確認した。一方、伝熱律速モデルを用いた従来の SIMMER-III コードとの解析結果の比較では、定性的な熱流動現象を大きく変えていないことが分かる。しかしながら、例えば FCI 問題では、下部の FCI 領域で発達した圧力が中間部のナトリウム・スラグを押し上げ、上部のカバー・ガス領域を圧縮する現象が模擬されるが、特に、カバー・ガス領域でナトリウム蒸気の凝縮の遅れに伴う影響が顕著に現れており、拡散律速挙動の定性的な効果を認めることができる。

Table 2. Vaporization/condensation paths treated in SIMMER-III.

ID	Interface	Process	Mass-transfer rate
I1	Liquid Fuel -Vapor	• Condense Fuel Vapor • Vaporize Liquid Fuel	$\Gamma_{G,L1}^{II}$ $\Gamma_{L1,G}^{II} \Gamma_{L1,G}^{II}$
I2	Liquid Steel -Vapor	• Condense Fuel and Steel Vapor • Vaporize Liquid Steel	$\Gamma_{G,Lm}^{I2}$ (m = 1 and 2) $\Gamma_{L2,G}^{I2}$
I3	Liquid Sodium -Vapor	• Condense Fuel, Steel, and Sodium Vapor • Vaporize Liquid Sodium	$\Gamma_{G,Lm}^{I3}$ (m = 1, 2 and 3) $\Gamma_{L3,G}^{I3}$
I4	Fuel Particles -Vapor	• Condense Fuel, Steel, and Sodium Vapor	$\Gamma_{G,Lm}^{I4}$ (m = 1, 2 and 3)
I5	Steel Particles -Vapor	• Condense Fuel, Steel, and Sodium Vapor	$\Gamma_{G,Lm}^{I5}$ (m = 1, 2 and 3)
I6	Control Particles -Vapor	• Condense Fuel, Steel, and Sodium Vapor	$\Gamma_{G,Lm}^{I6}$ (m = 1, 2 and 3)
I7	Liquid Fuel -Liquid Steel	• Vaporize Liquid Steel	$\Gamma_{L2,G}^{I7}$
I8	Liquid Fuel -Liquid Sodium	• Vaporize Liquid Sodium	$\Gamma_{L3,G}^{I8}$
I12	Liquid Steel -Liquid Sodium	• Vaporize Liquid Sodium	$\Gamma_{L3,G}^{I12}$
I22	Pin -Vapor	• Condense Fuel, Steel, and Sodium Vapor	$\Gamma_{G,Lm}^{I22}$ (m = 1, 2 and 3)
I29	Left Can Wall or Crust -Vapor	• Condense Fuel, Steel, and Sodium Vapor	$\Gamma_{G,Lm}^{I29}$ (m = 1, 2 and 3)
I30	Right Can Wall or Crust -Vapor	• Condense Fuel, Steel, and Sodium Vapor	$\Gamma_{G,Lm}^{I30}$ (m = 1, 2 and 3)

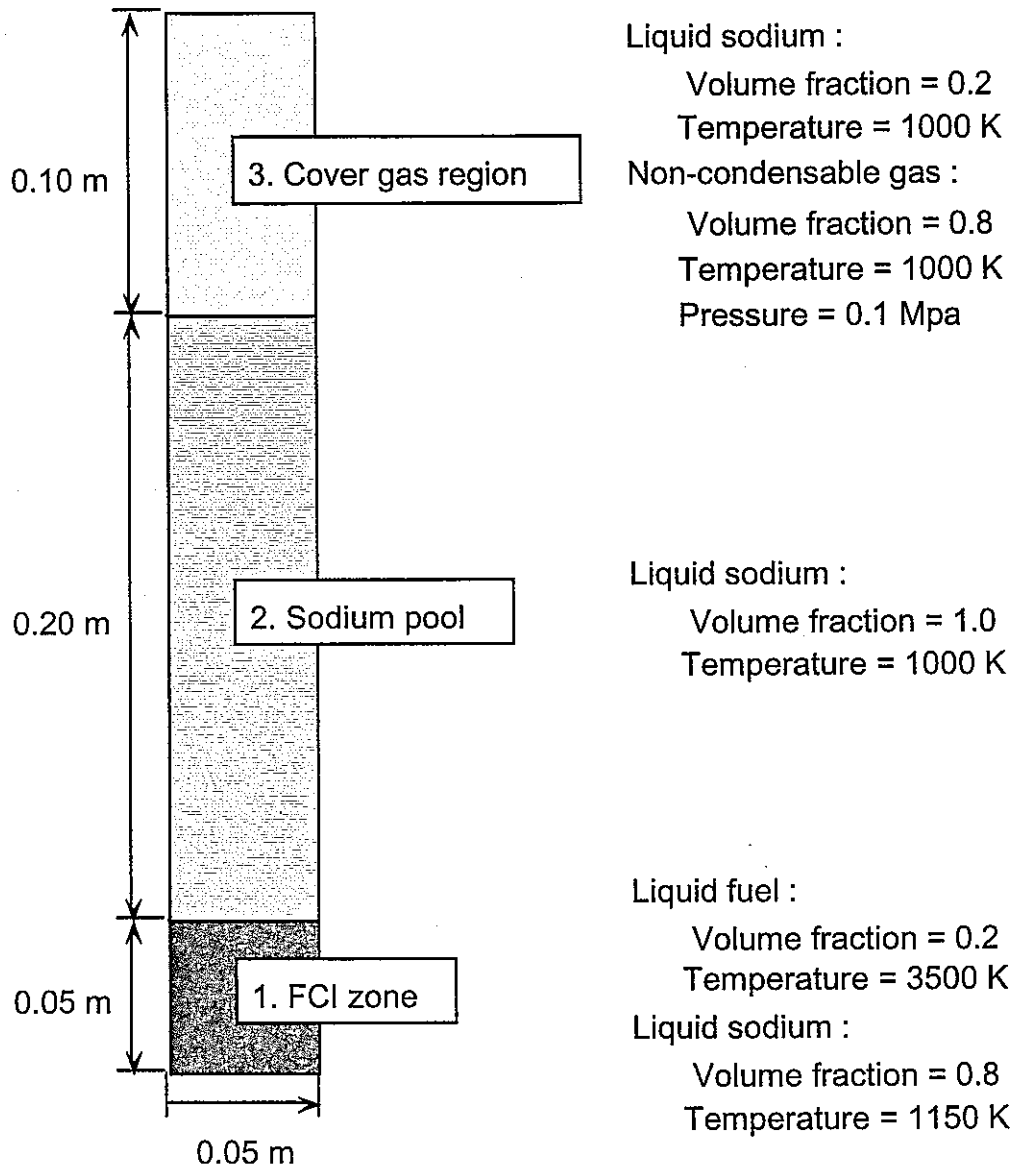
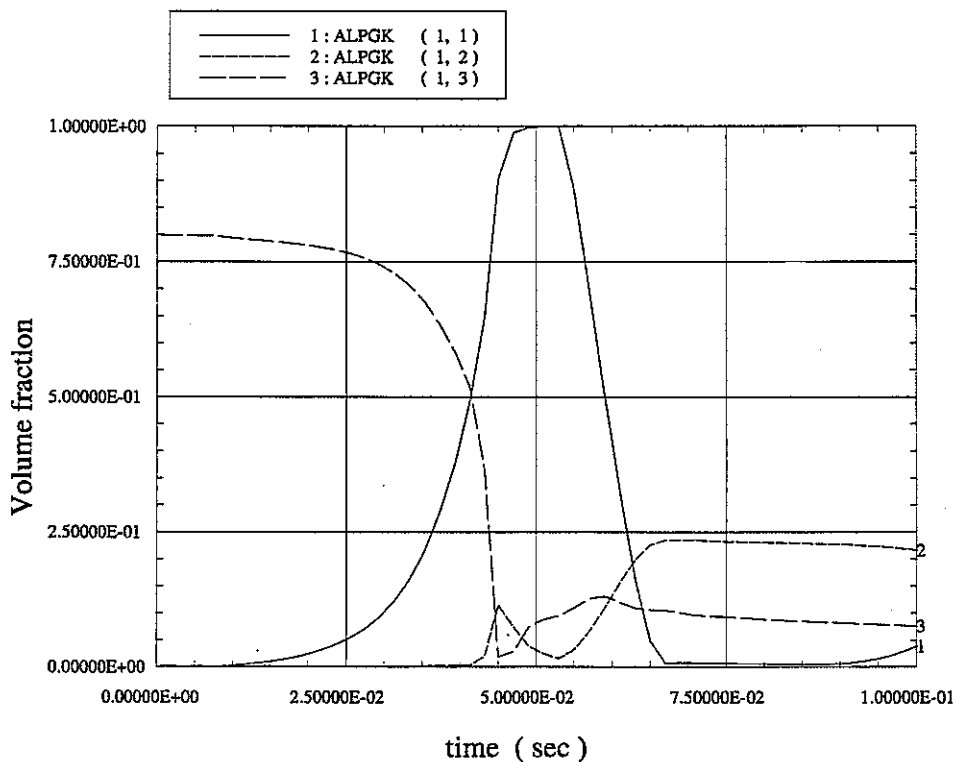
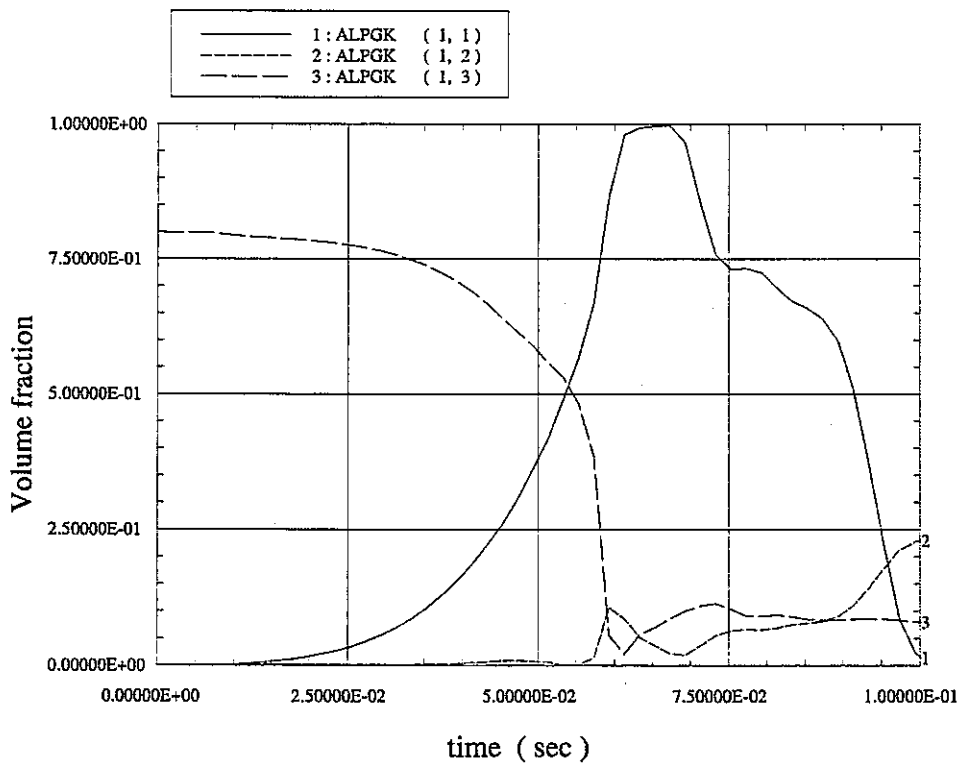


Fig. 2-1. Geometric model and initial conditions for FCI problem.

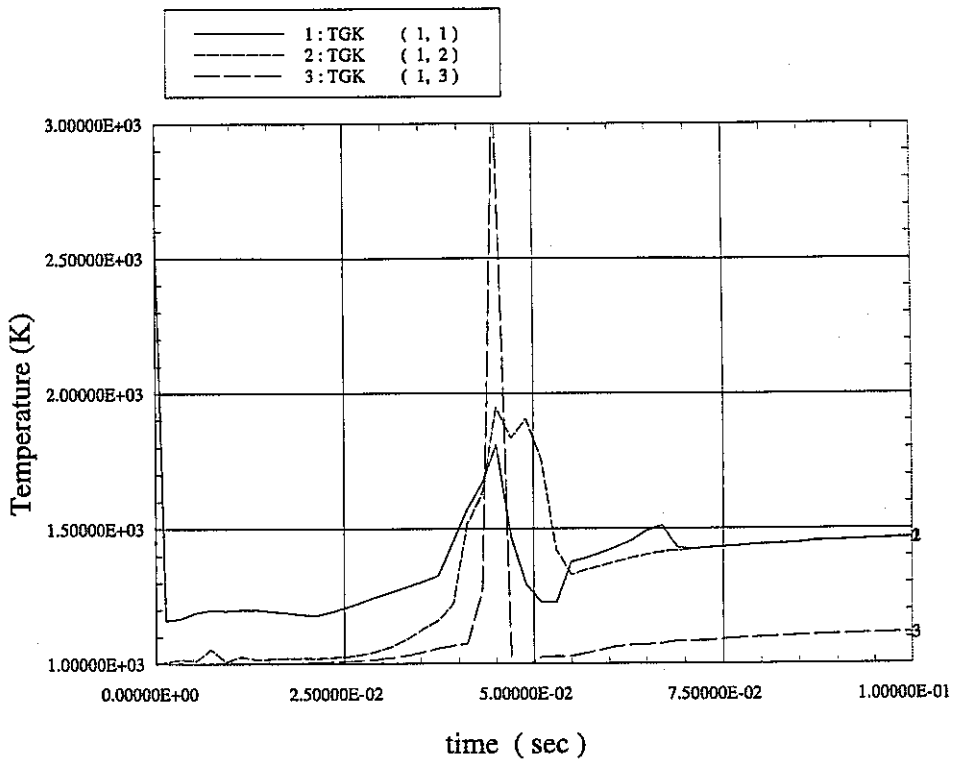


(a) Original SIMMER-III model

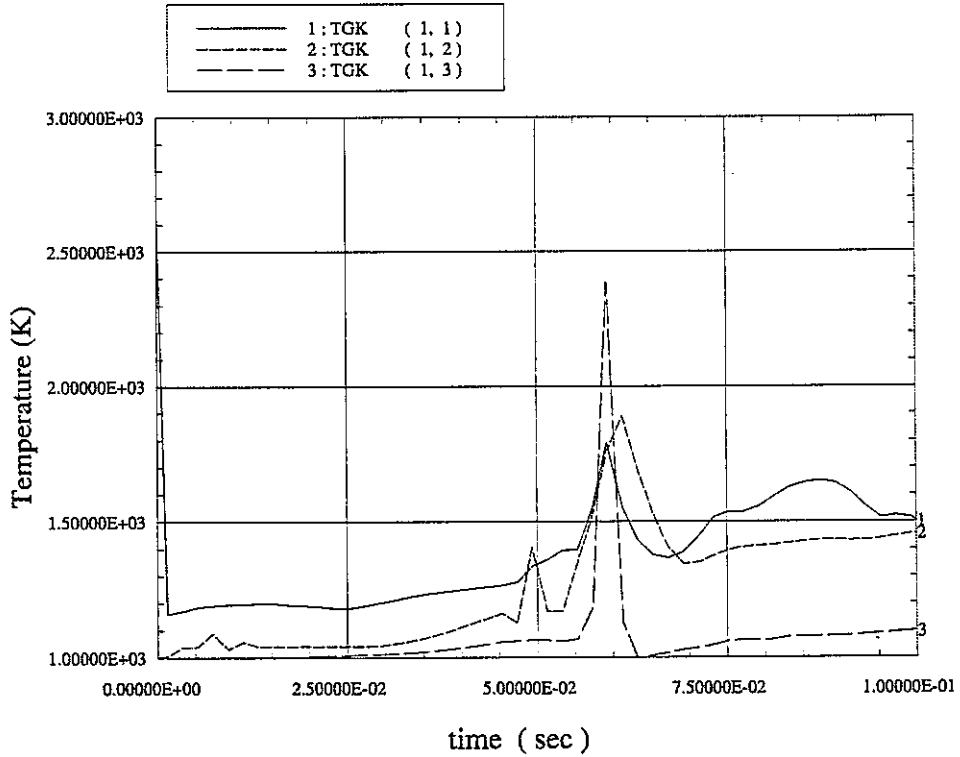


(b) Diffusion limited model

Fig. 2-2. Vapor volume fraction in FCI problem.

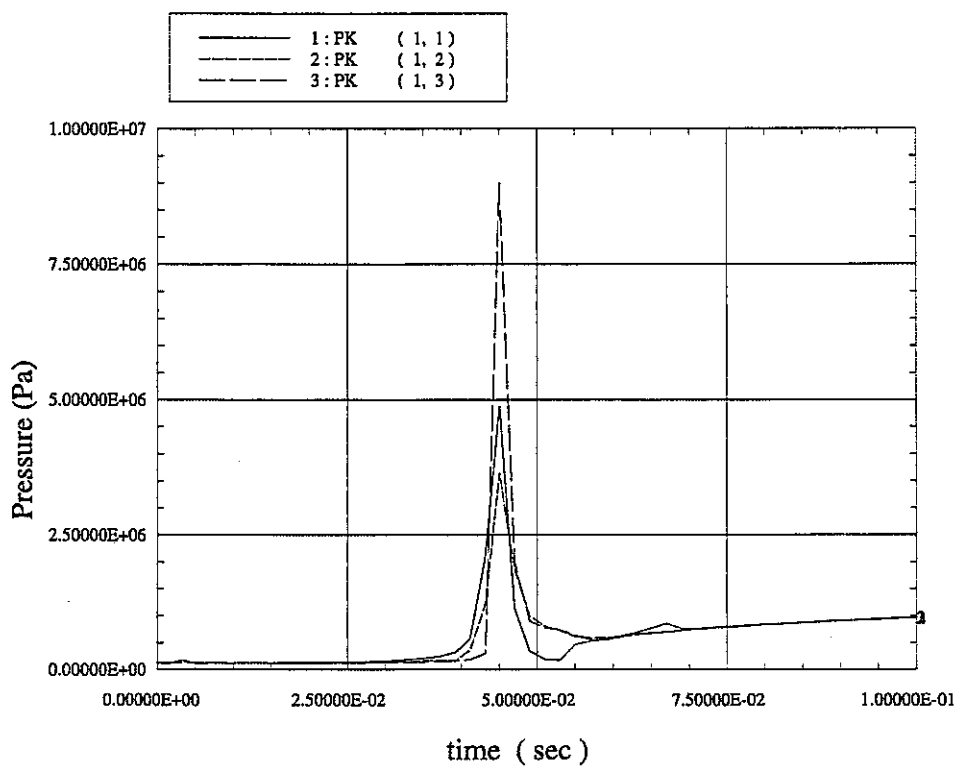


(a) Original SIMMER-III model

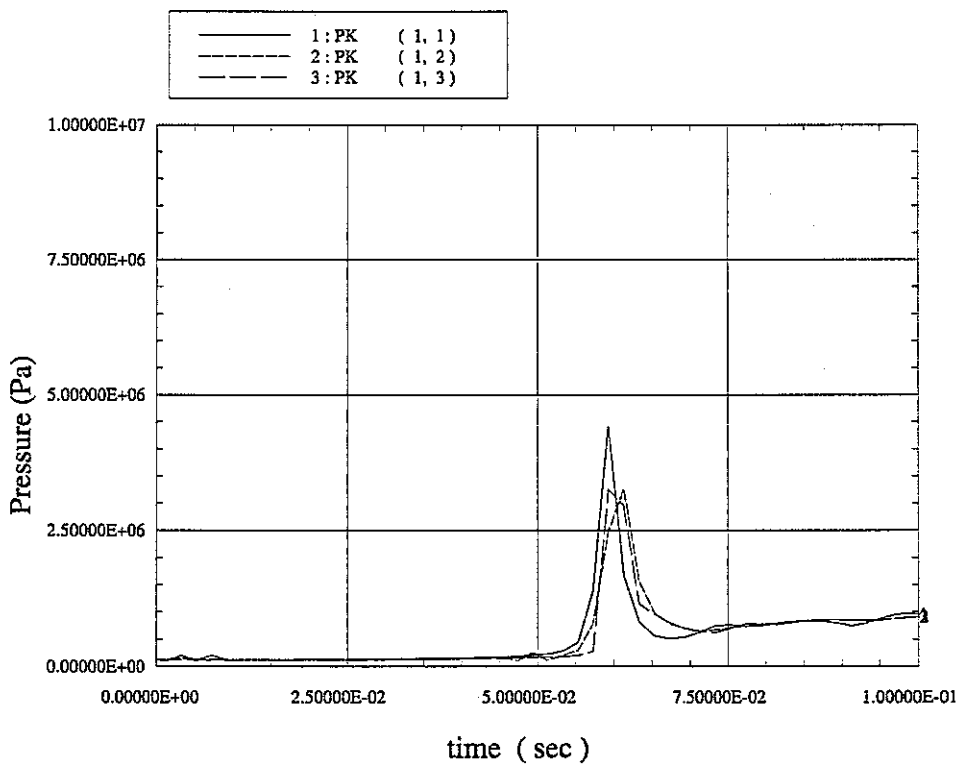


(b) Diffusion limited model

Fig. 2-3. Vapor temperature in FCI problem.



(a) Original SIMMER-III model



(b) Diffusion limited model

Fig. 2-4. Pressure in FCI problem.

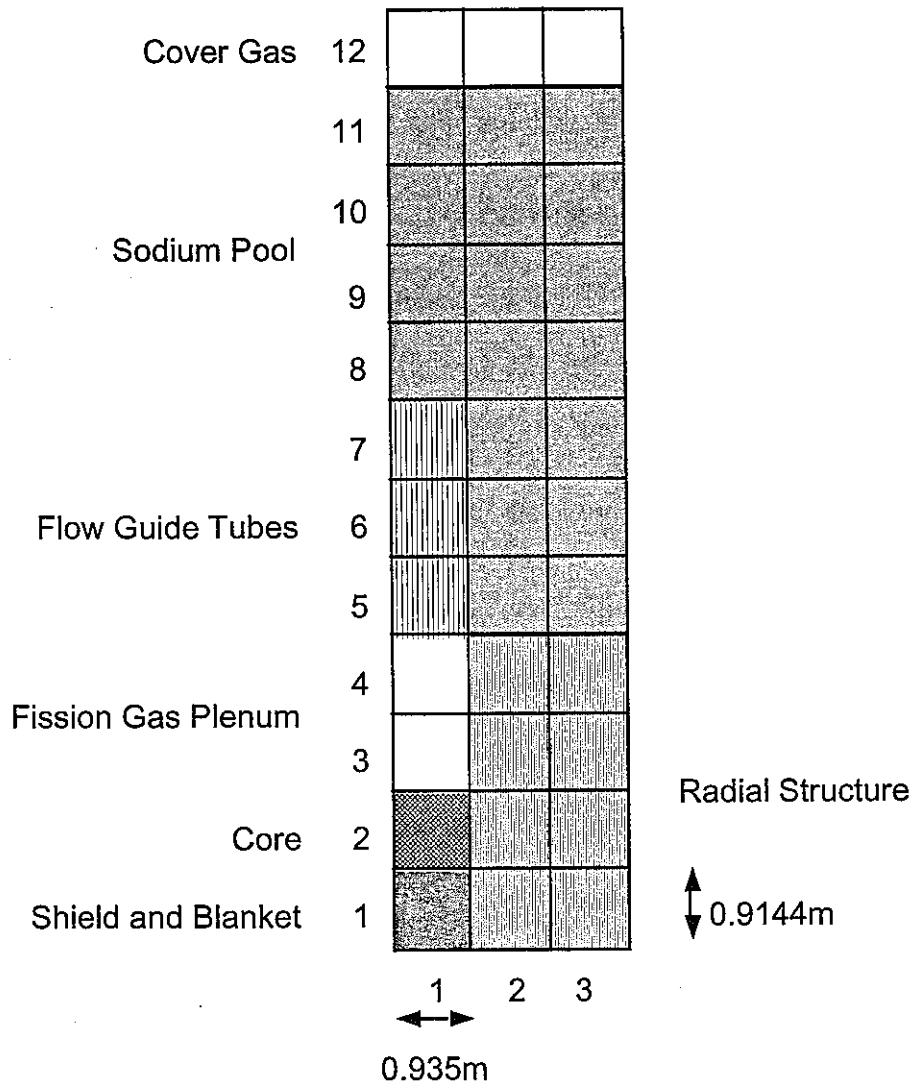
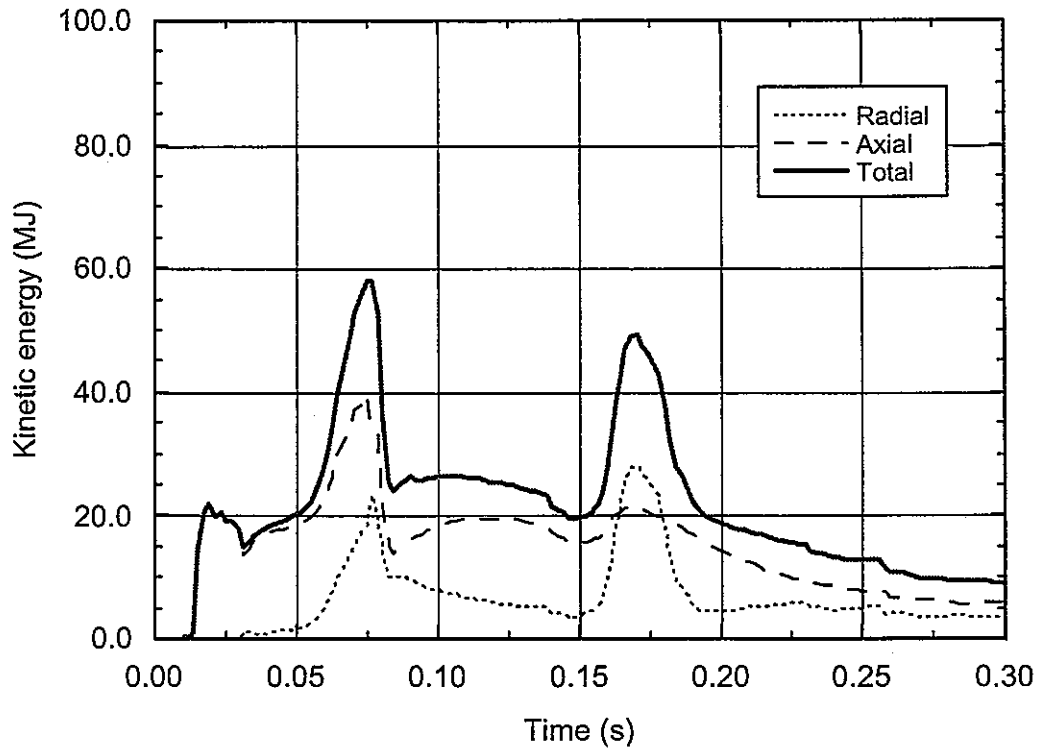
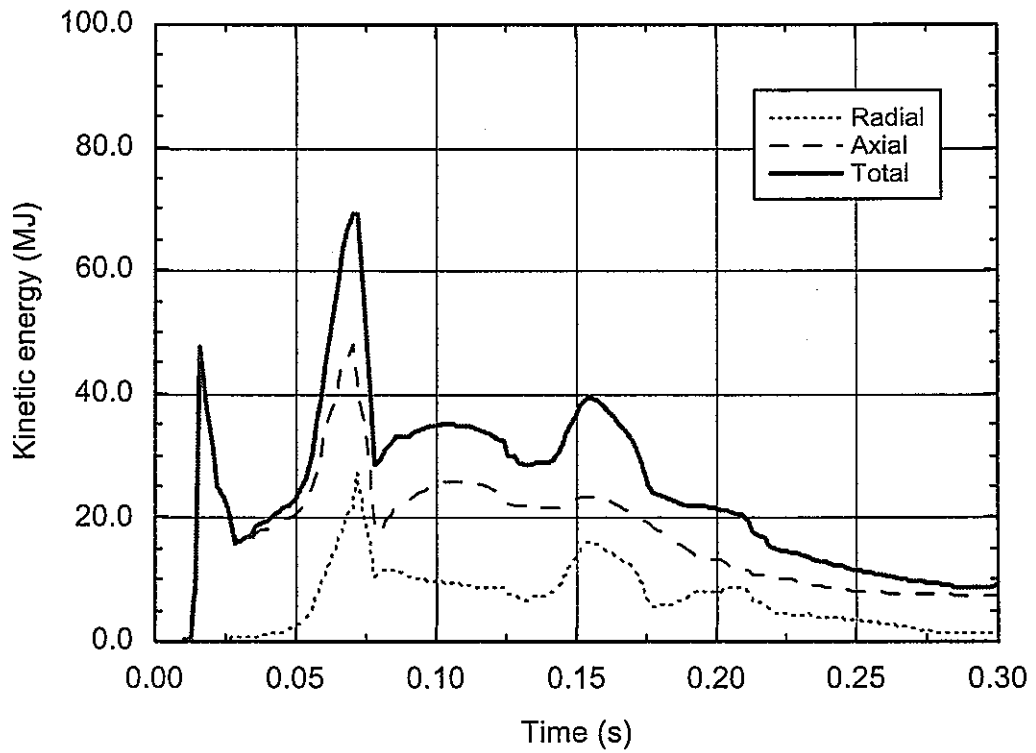


Fig. 2-5. Geometric model and initial conditions for LWE problem.

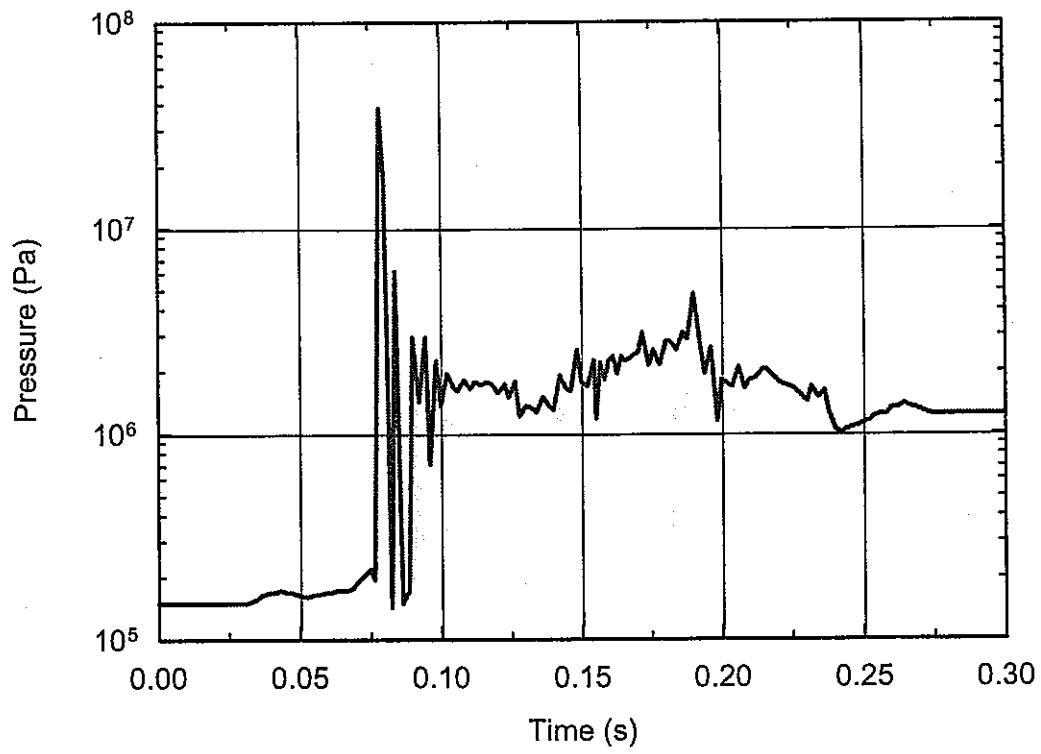


(a) Original SIMMER-III model

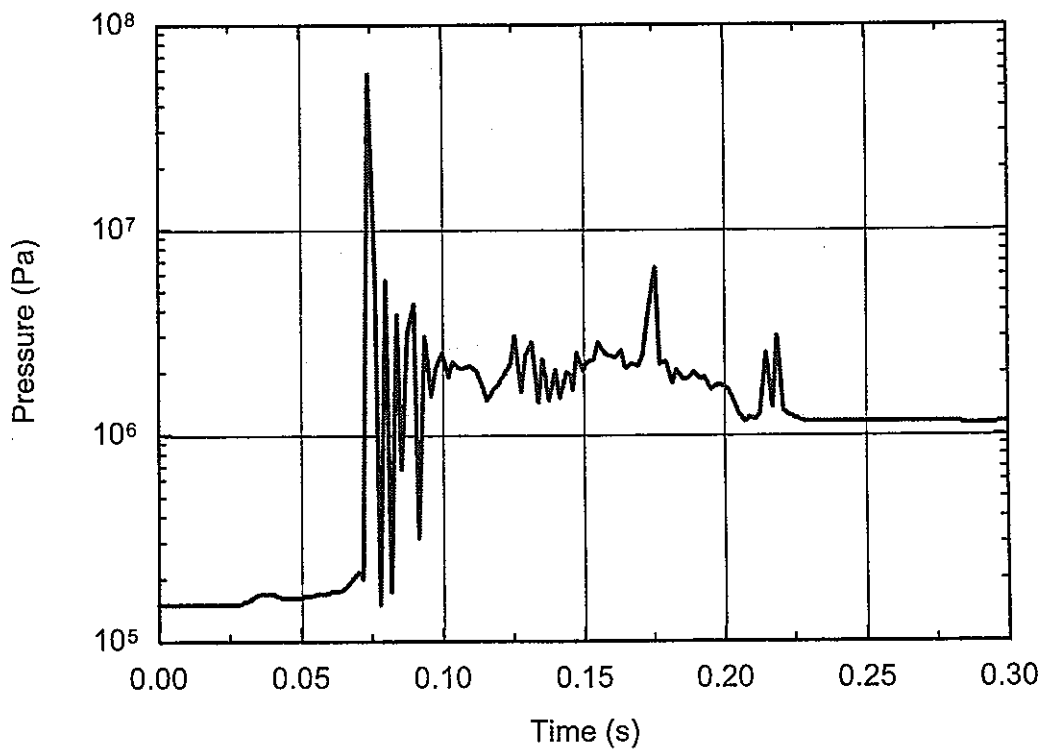


(b) Diffusion limited model

Fig. 2-6. Kinetic energy of sodium slug in LWE problem.



(a) Original SIMMER-III model



(b) Diffusion limited model

Fig. 2-7. Cover-gas pressure in LWE problem.

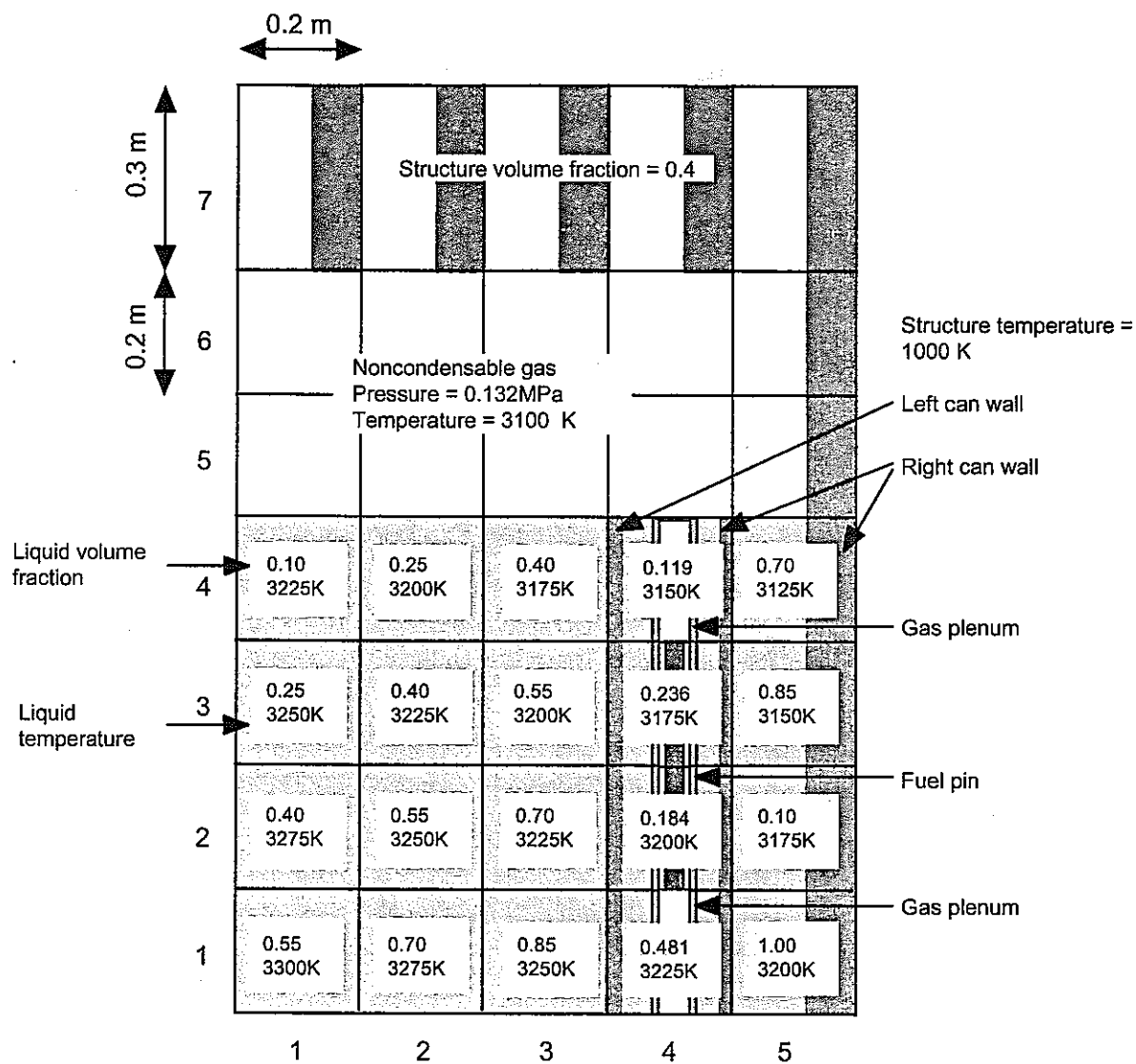
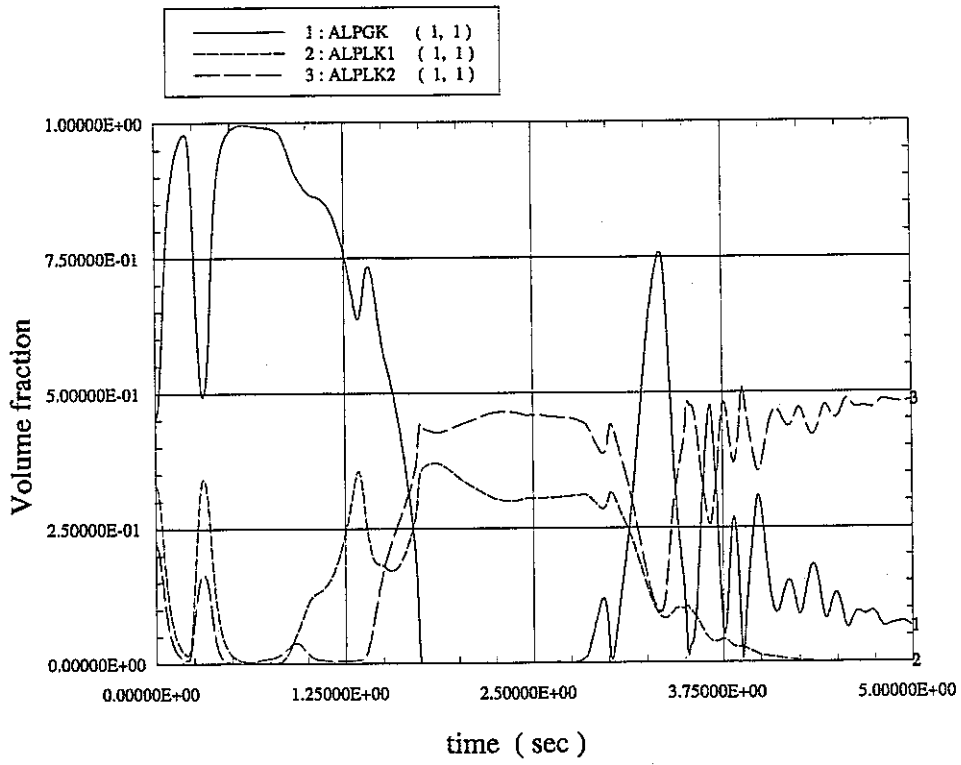
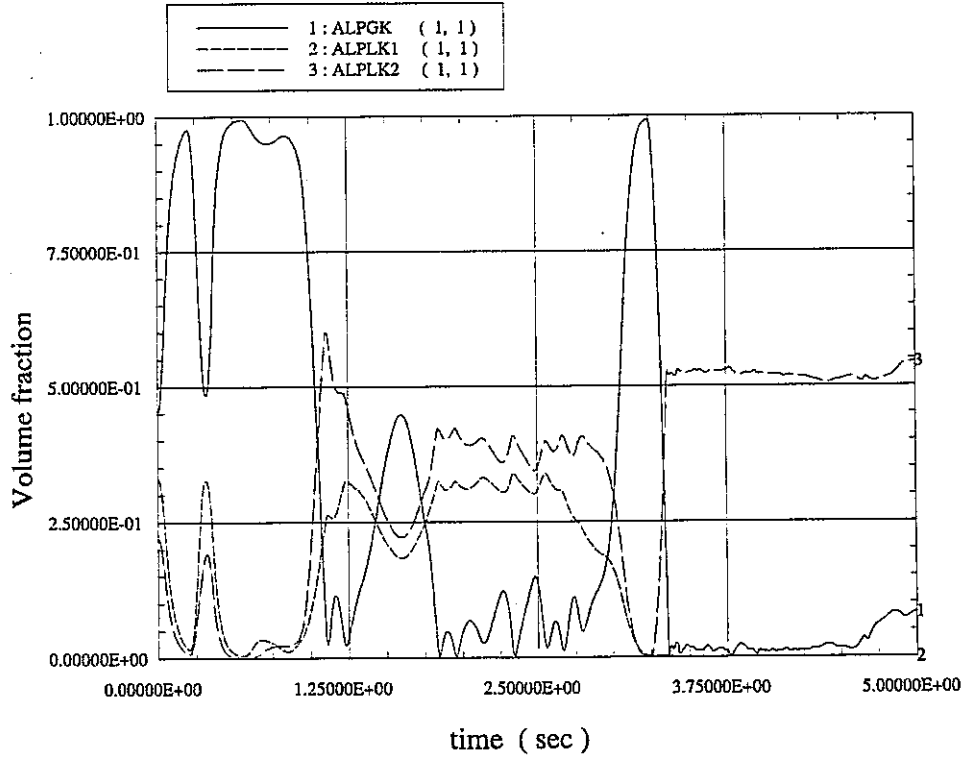


Fig. 2-8. Geometric model and initial conditions for LBP problem.

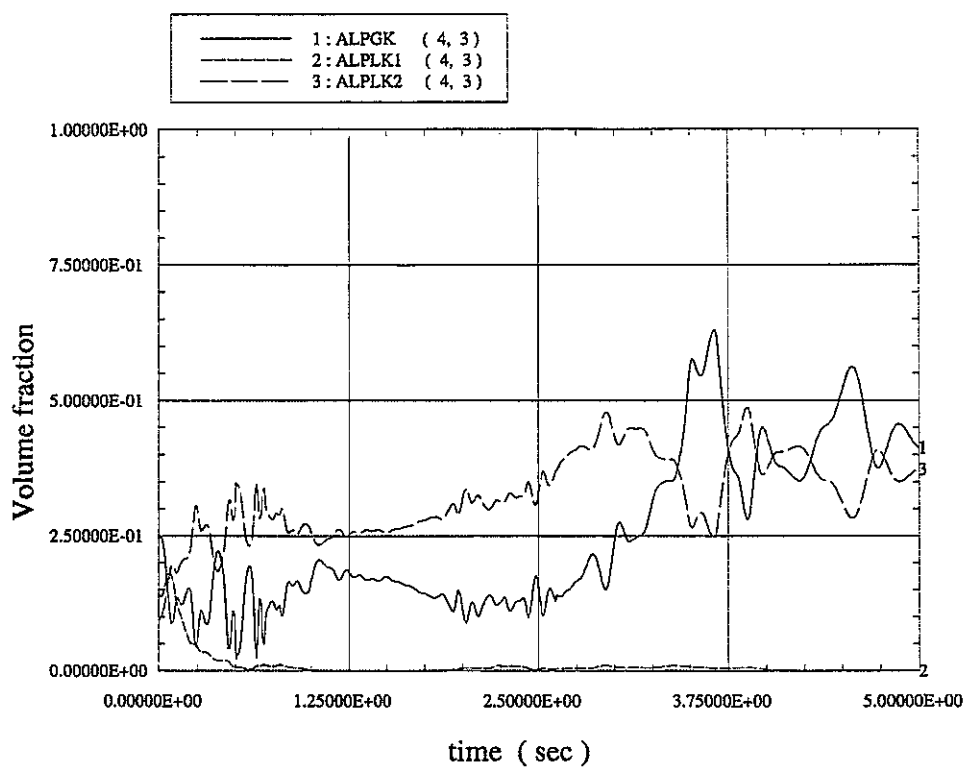


(a) Original SIMMER-III model

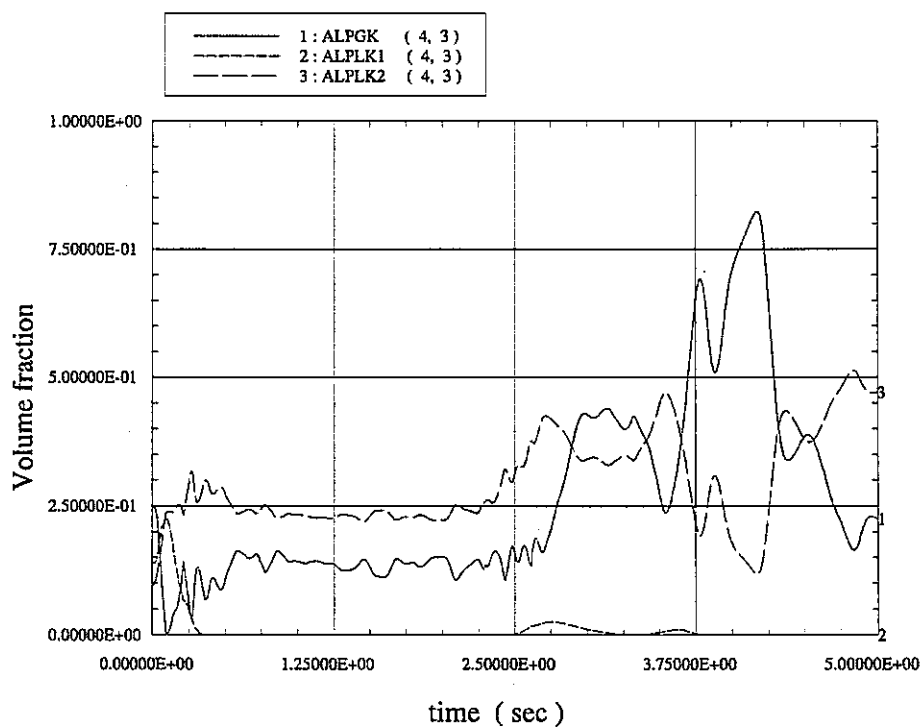


(b) Diffusion limited model

Fig. 2-9. Volume fractions of vapor, liquid fuel and steel at cell (1,1) in LBP problem.

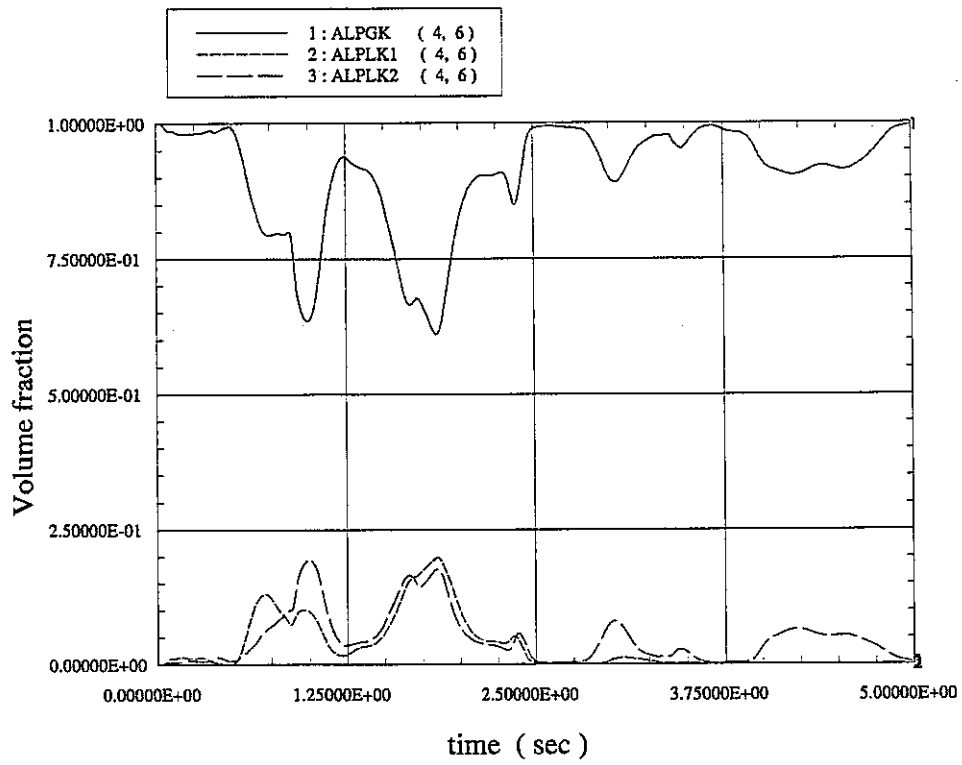


(a) Original SIMMER-III model

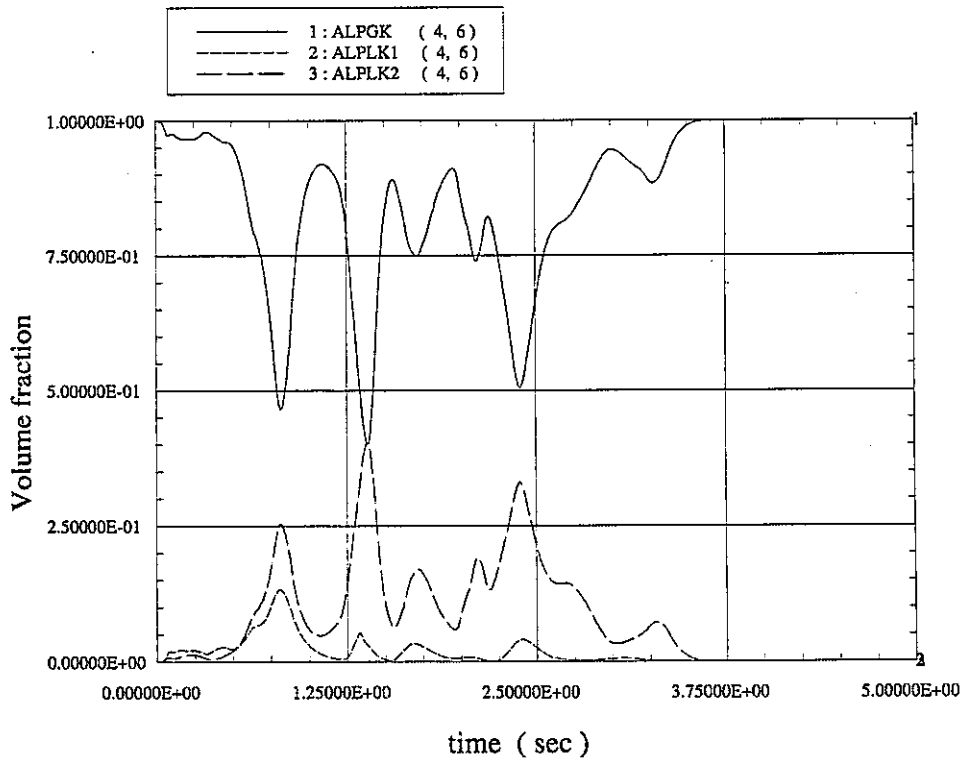


(b) Diffusion limited model

Fig. 2-10. Volume fractions of vapor, liquid fuel and steel at cell (4,3) in LBP problem.

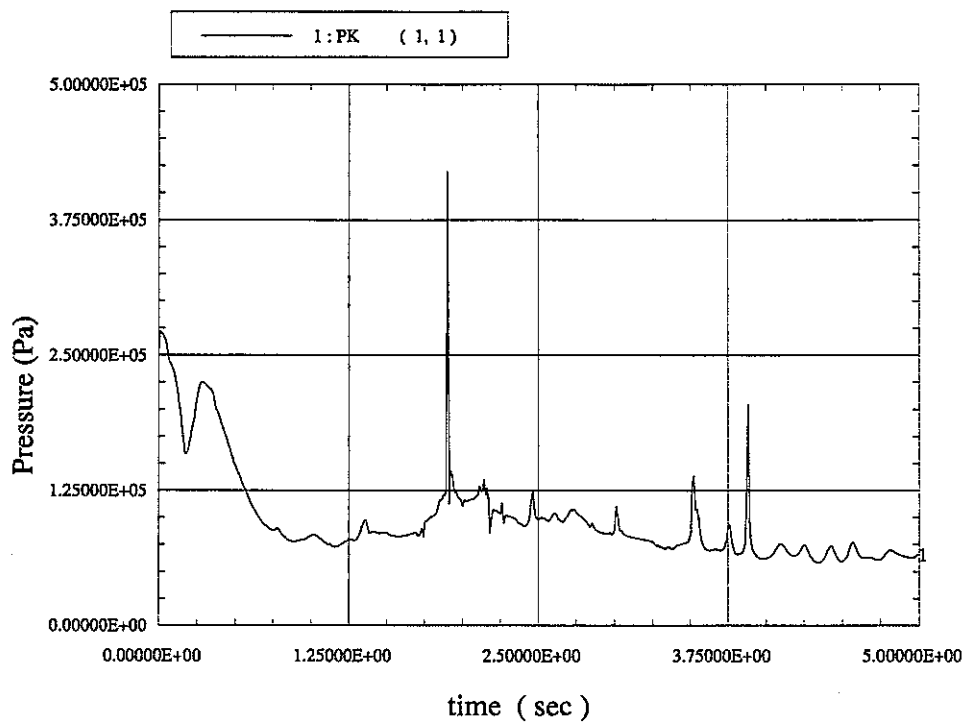


(a) Original SIMMER-III model

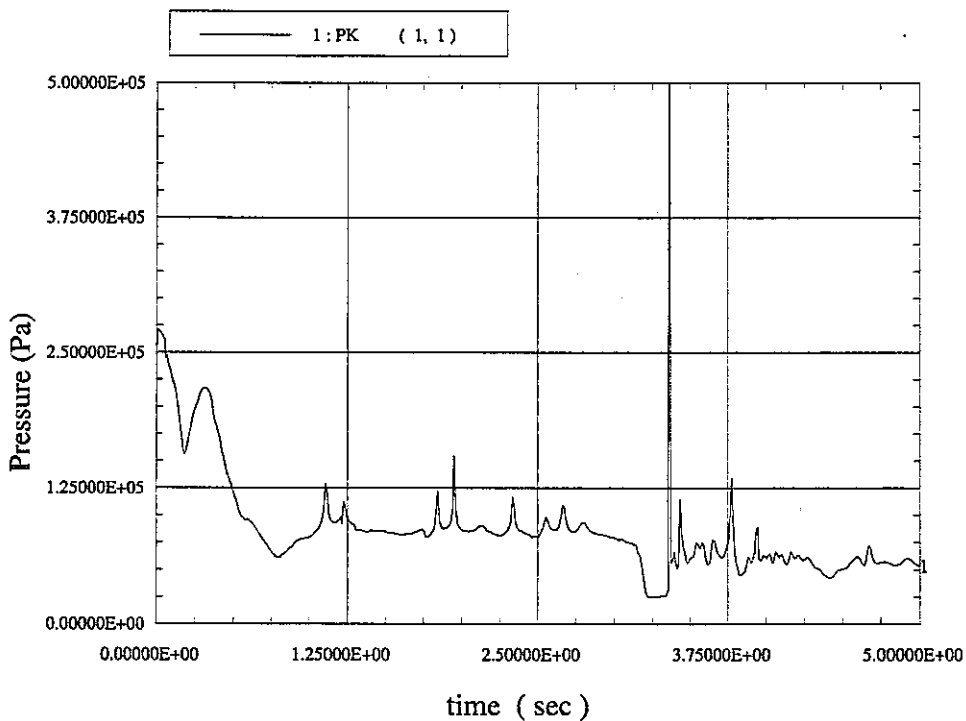


(b) Diffusion limited model

Fig. 2-11. Volume fractions of vapor, liquid fuel and steel at cell (4,6) in LBP problem.

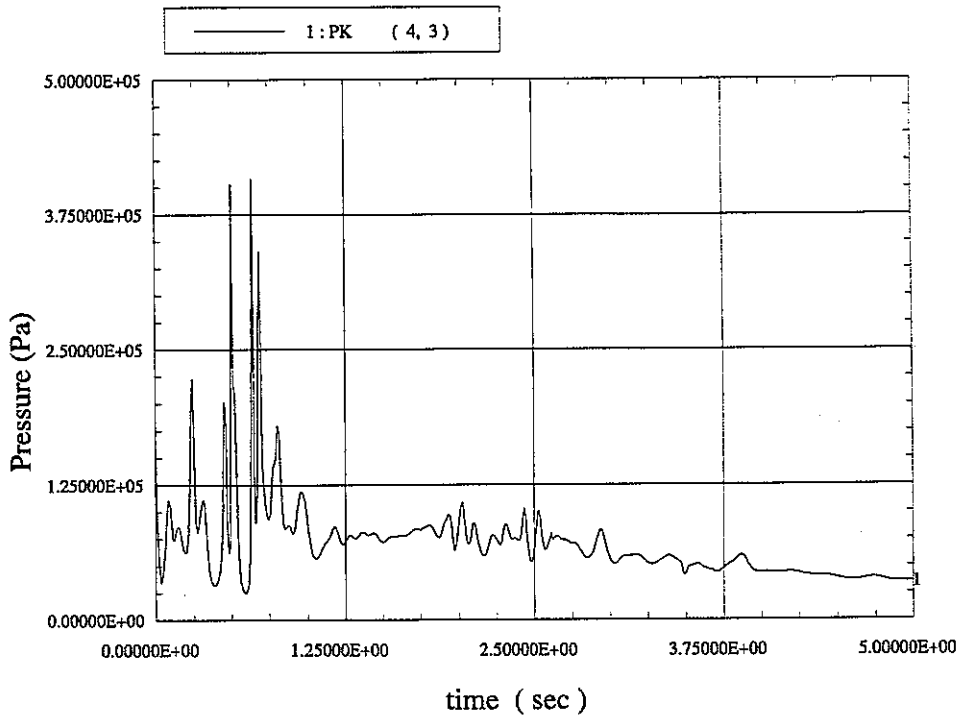


(a) Original SIMMER-III model

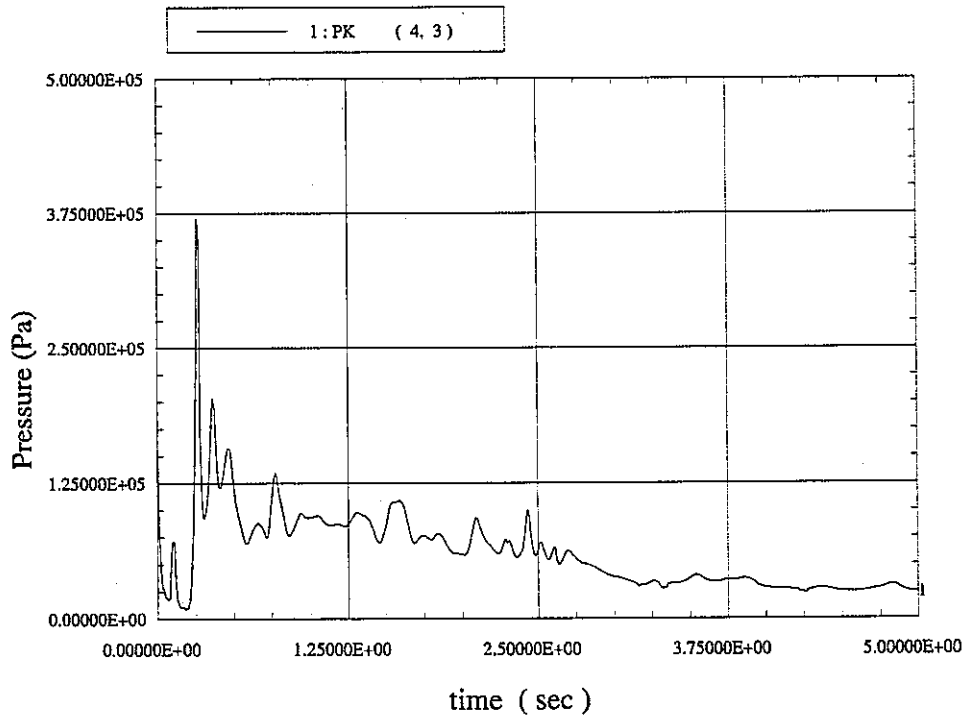


(b) Diffusion limited model

Fig. 2-12. Pressure at cell (1,1) in LBP problem.

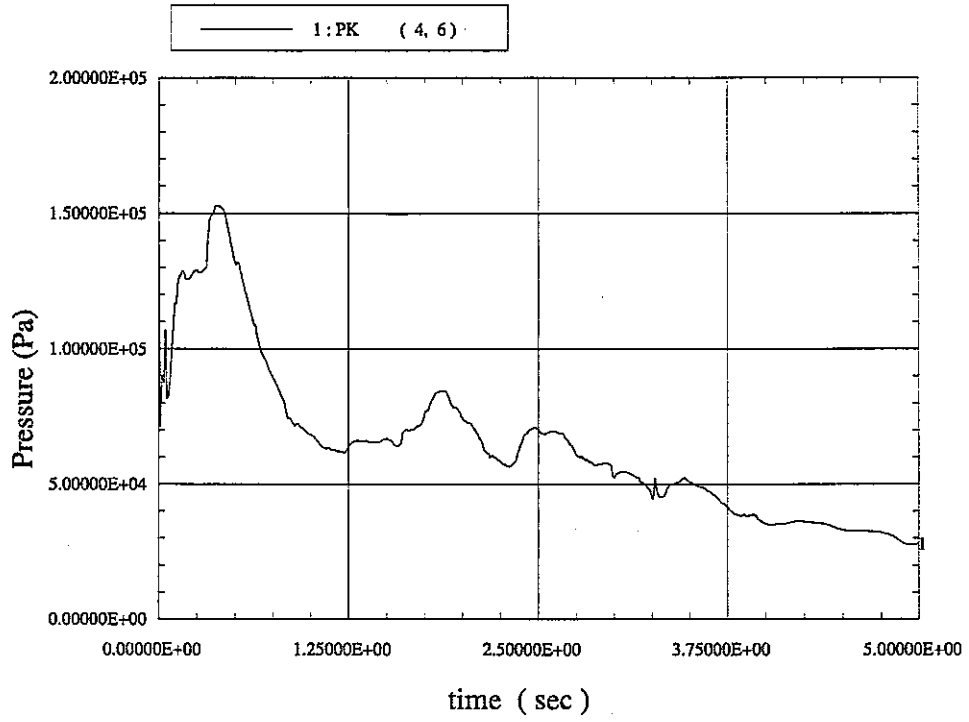


(a) Original SIMMER-III model

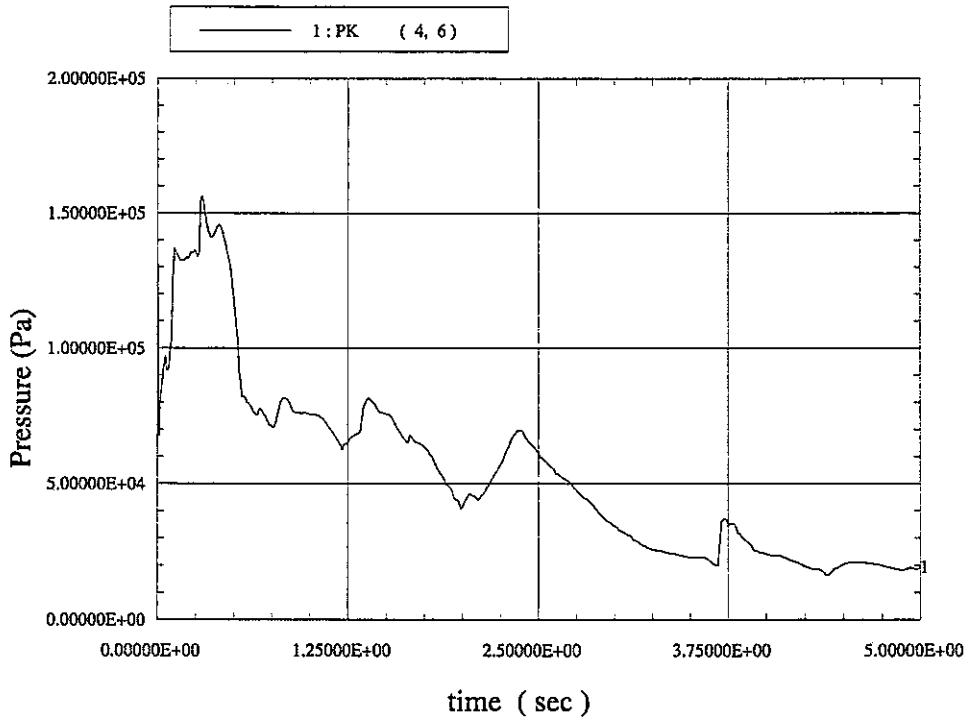


(b) Diffusion limited model

Fig. 2-13. Pressure at cell (4,3) in LBP problem.

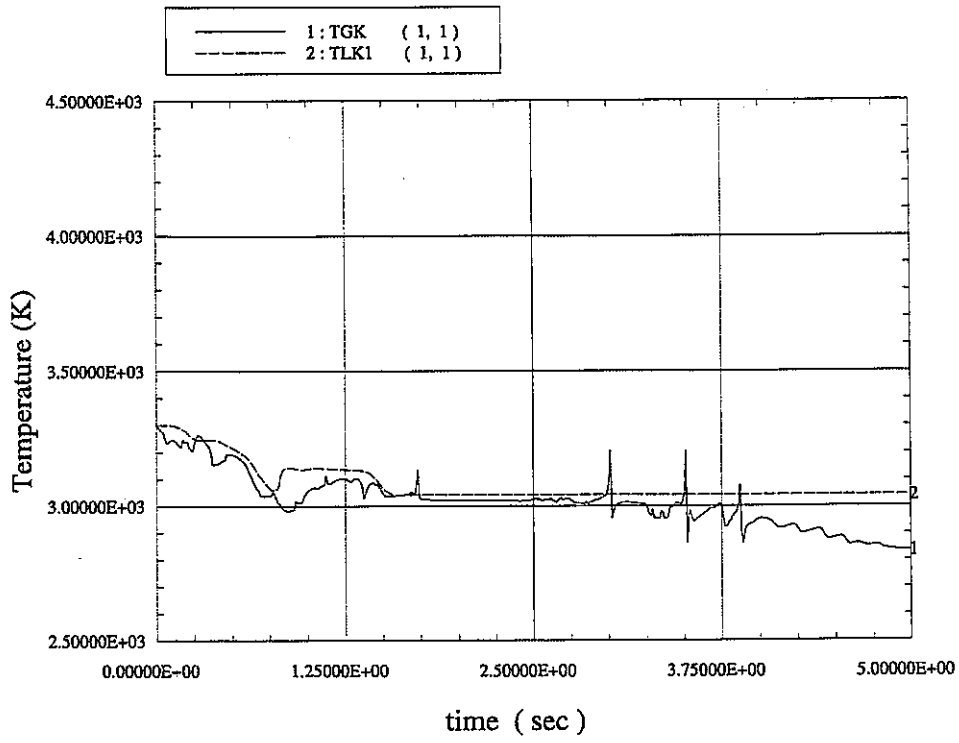


(a) Original SIMMER-III model

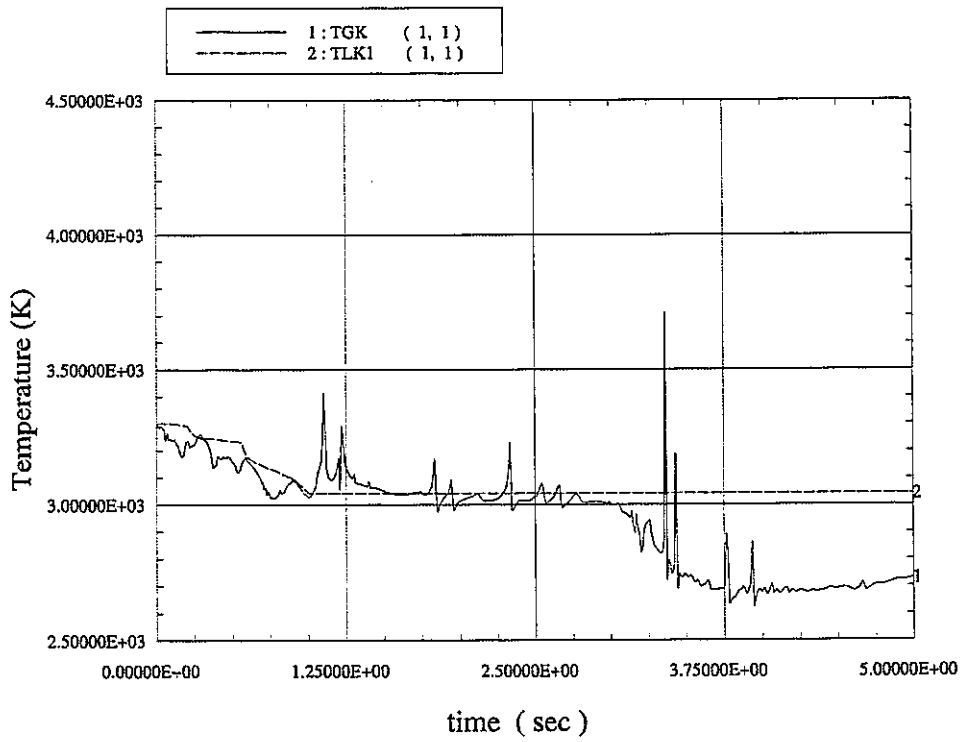


(b) Diffusion limited model

Fig. 2-14. Pressure at cell (4,6) in LBP problem.

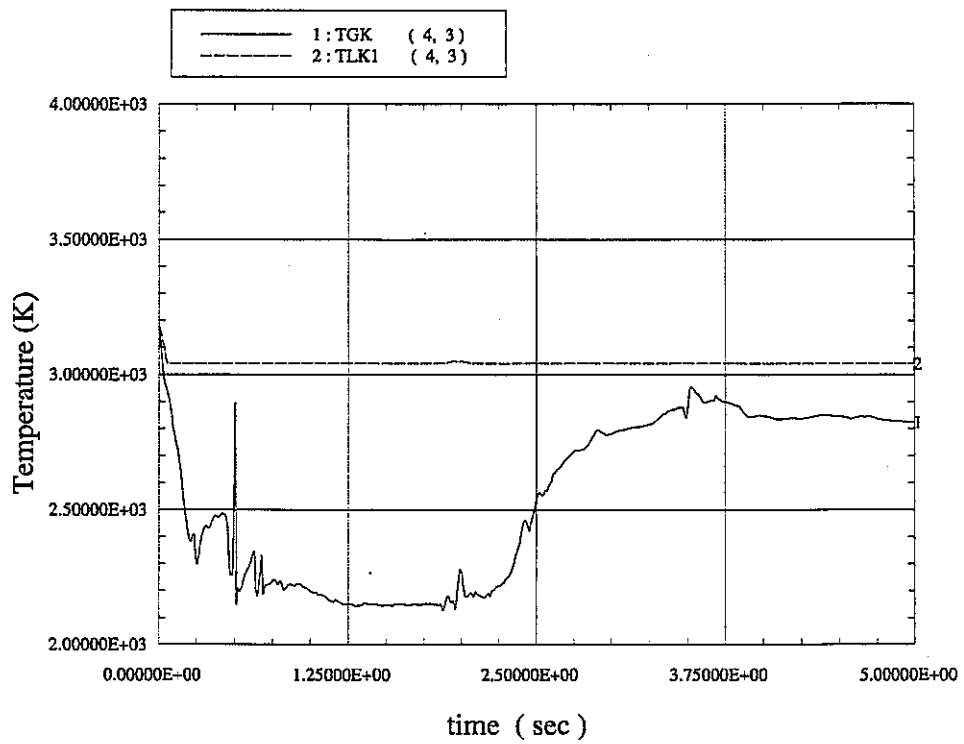


(a) Original SIMMER-III model

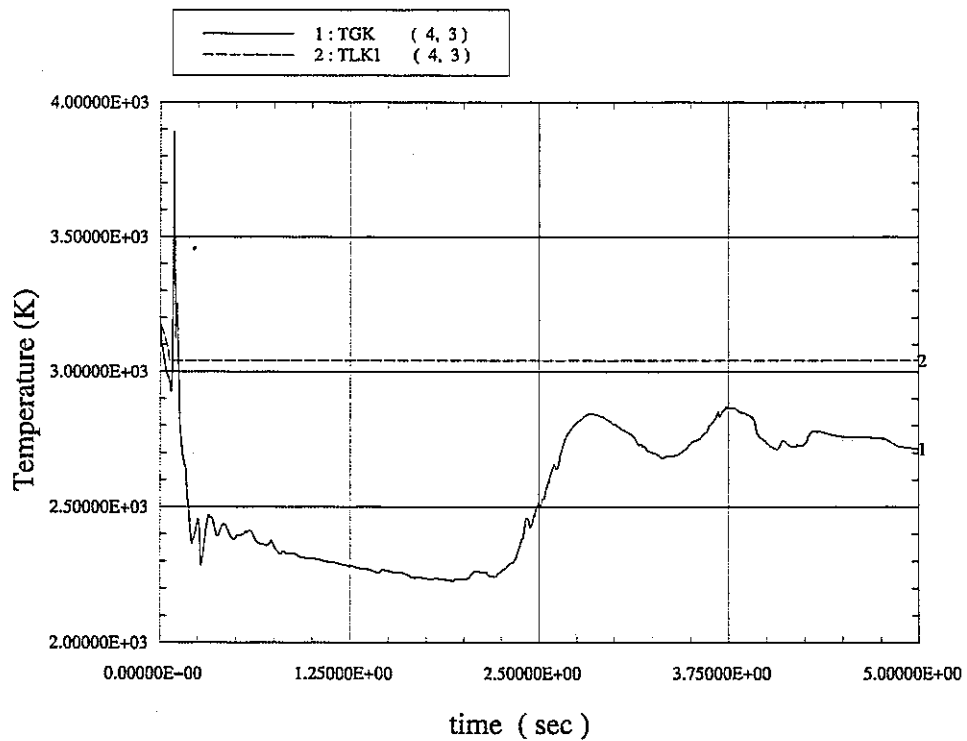


(b) Diffusion limited model

Fig. 2-15. Temperatures of vapor and liquid fuel at cell (1,1) in LBP problem.

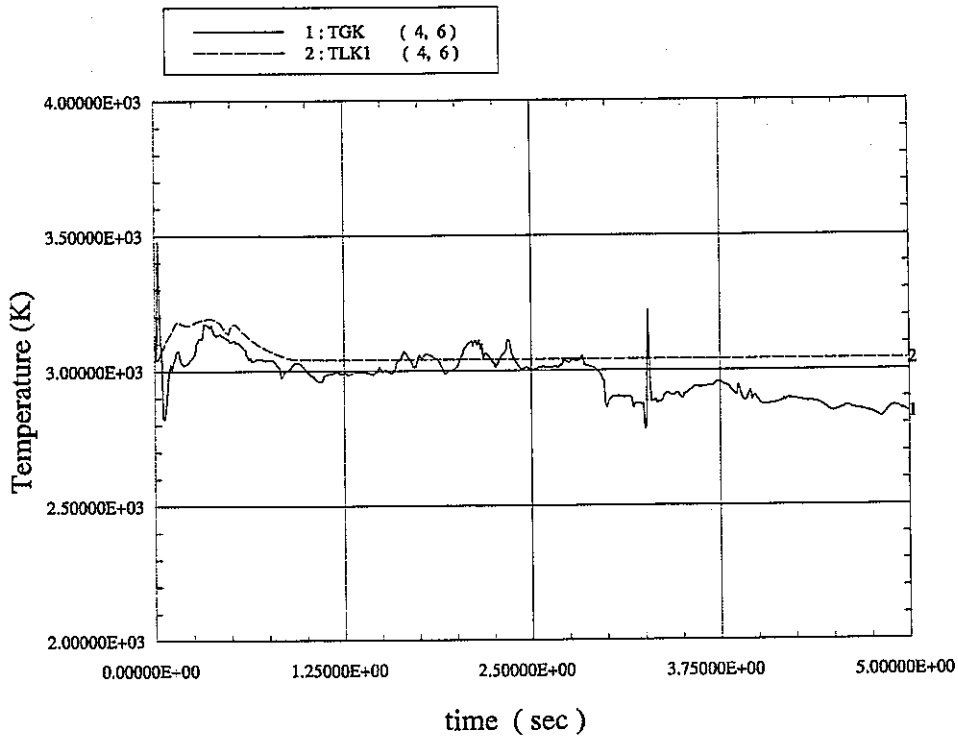


(a) Original SIMMER-III model

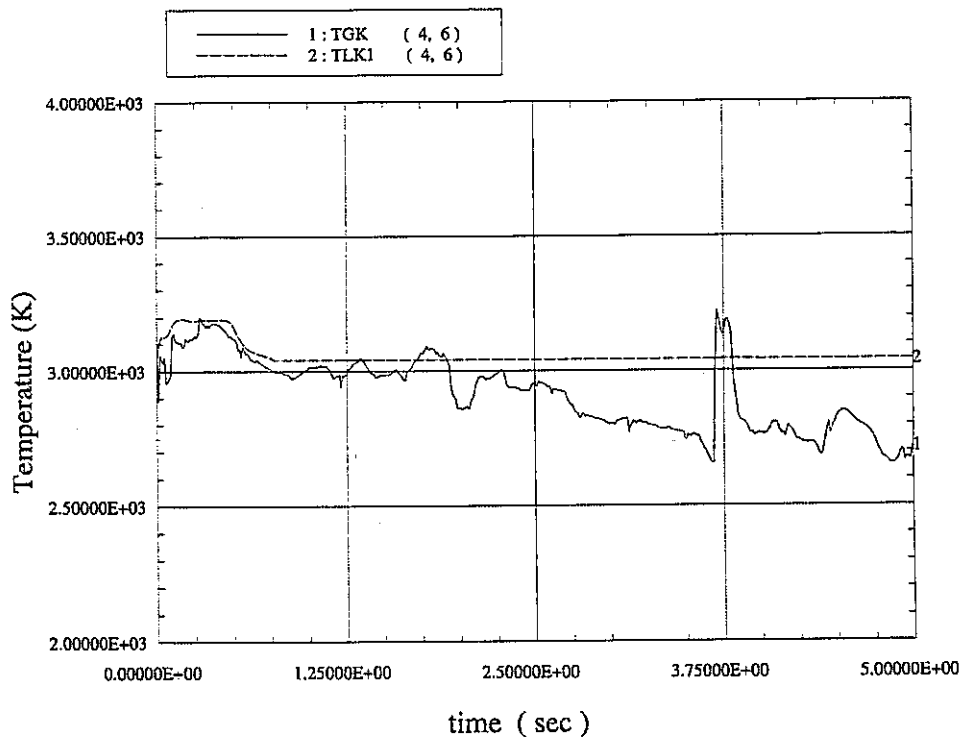


(b) Diffusion limited model

Fig. 2-16. Temperatures of vapor and liquid fuel at cell (4,3) in LBP problem.



(a) Original SIMMER-III model



(b) Diffusion limited model

Fig. 2-17. Temperatures of vapor and liquid fuel at cell (4,6) in LBP problem.

3. 拡散律速型蒸発／凝縮モデルの検証実験

本研究では、損傷炉心の多相熱流動に係わる支配的現象を記述する要素物理モデルを新しい技術を用いて高度化していることから、その基本的な妥当性を確認するため既存の検証データベースが不十分である。さらに、高度化されたモデルを多相・多成分の流動・伝熱・相変化の複合現象の解析に適用し、高速炉の安全評価における改善効果を評価するためには、その汎用性と一般性を検証するための新たな基礎的な実験データの取得が必要不可欠である。従って、本研究では、開発された拡散律速型蒸発／凝縮モデルの妥当性を確認するための新たな検証実験も合わせて実施している。

SIMMER-III コードの検証研究においては、これまで、サブクール水中での単一蒸気泡に関する検証解析 [2] が実施されているが、損傷炉心内の多相流現象により近いと考えられる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を併せて平成 11 年度より実施しているが、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。

ここでは、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 コードによる解析結果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。

3. 1 検証実験の概要

本検証実験では、非凝縮成分を含む気泡群の凝縮過程を検討するために、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 コード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. 1 実験装置の概略

実験装置の概略を Fig. 3-1 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. 1. 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。

3. 2 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 を用いてサイクル機構で独自に開発したもの [5] を使用した。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。

3. 2. 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。

3. 2. 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 コード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. 3-2 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. 3-3 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、設定した各セル毎に時間平均した気泡径およびボイド率が出力される。

3. 2. 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ので、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 [6] 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。

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 3.3.1 で行う。

3. 3 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。

3. 3. 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. 3-4 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. 3-5(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. 3-5(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. 3-5(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。

3. 3. 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. 3-6 および Fig. 3-7 に示す。Fig. 3-6 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. 3-7 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、3.3.3 及び 3.3.4 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. 3-8 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 コードの 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. 3-9 である。Fig. 3-9 は、Fig. 3-8 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付いていくことがわかる。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。

3. 3. 3 純粋な蒸気泡が凝縮する場合の処理結果

Fig. 3-9 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、底面から離れるにしたがって一旦増加した後、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。実際の溶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 コードで実験を再現する際には合理的だからである。

そこで、Fig. 3-10 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 コード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 [7] を満たすようにした。

$$\langle \alpha \rangle (0) = \frac{j_g}{C_0 \cdot j_g + V_{gj}} \quad (3-1)$$

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、

$$C_0 = 1.35 - 0.35 \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_f}} \quad (3-2)$$

で与えられる [8]。さらに、ドリフト速度 V_{gj} には、SIMMER-III コード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 [8] を用いた。

$$V_{gj} = \sqrt{2} (1 - \langle \alpha \rangle (0))^{1.75} \left(\frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_f^2} \right)^{0.25} \quad (3-3)$$

Fig. 3-10 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。

3. 3. 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. 3-11 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(3-1)~(3-3)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. 3-11 に示した結果を Fig. 3-10 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。

3. 4 SIMMER-III コードによる気泡凝縮実験の解析

3. 4. 1 解析体系と解析方法

本検証解析は、昨年度開発した2成分系の拡散律速型蒸発/凝縮モデルを組み込んだ SIMMER-III コードを用いて実施した。解析では、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、直角座標 2 次元体系で行った。

解析体系の概略を Fig. 3-12 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 コードの解析体系では、解析開始時に下から 48 番目のセルまでが単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。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。

3. 4. 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 コードで解析した結果を Fig. 3-13 に示す。Fig. 3-13 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 コード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. 3-14 である。従来の伝熱律速モデルを用いた SIMMER-III コードによる解析結果は、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。

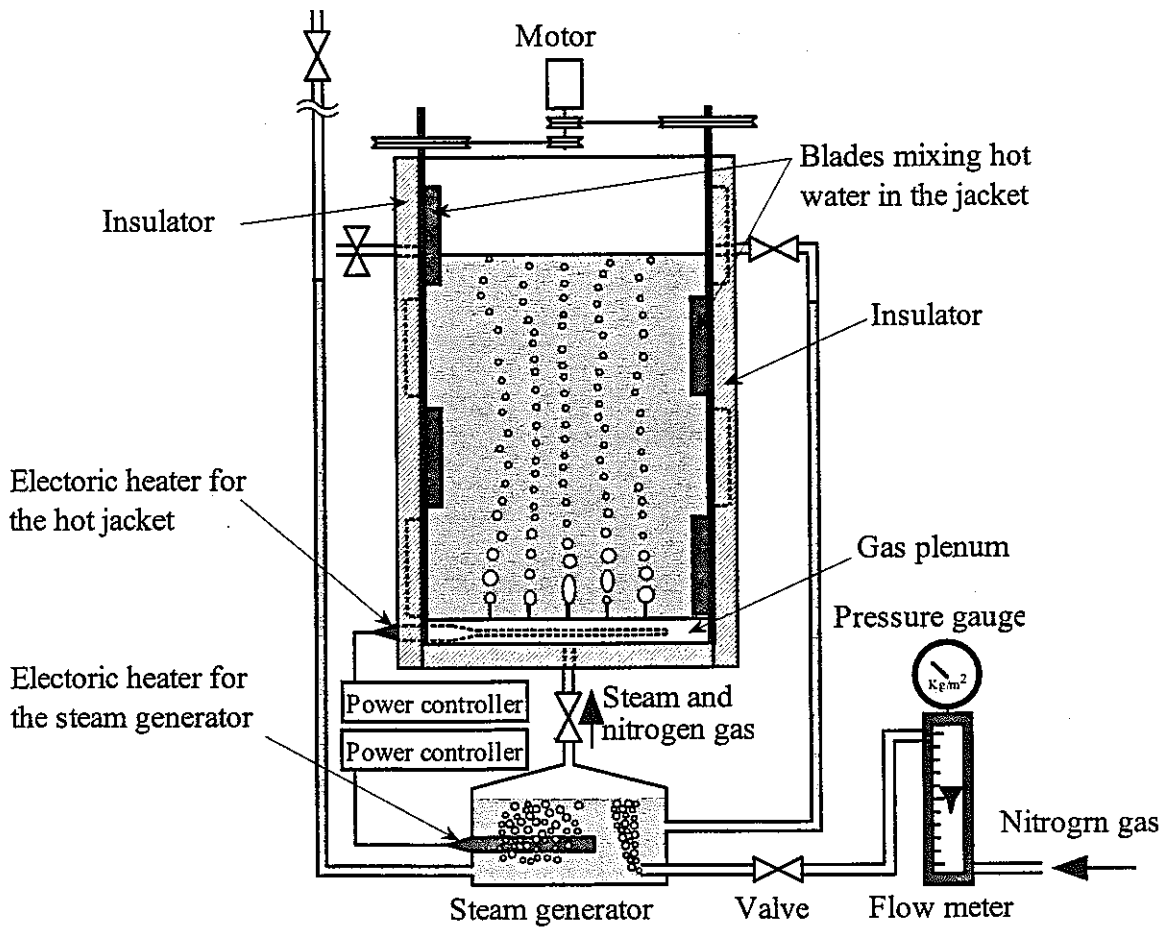
この拡散律速型の蒸発凝縮モデルを用いて解析した瞬時的なボイド率分布の時

間変化を実験結果と比較したものが Fig. 3-15 である。Fig. 3-15 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 コードの 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 コードの解析においても約 12 秒であった。

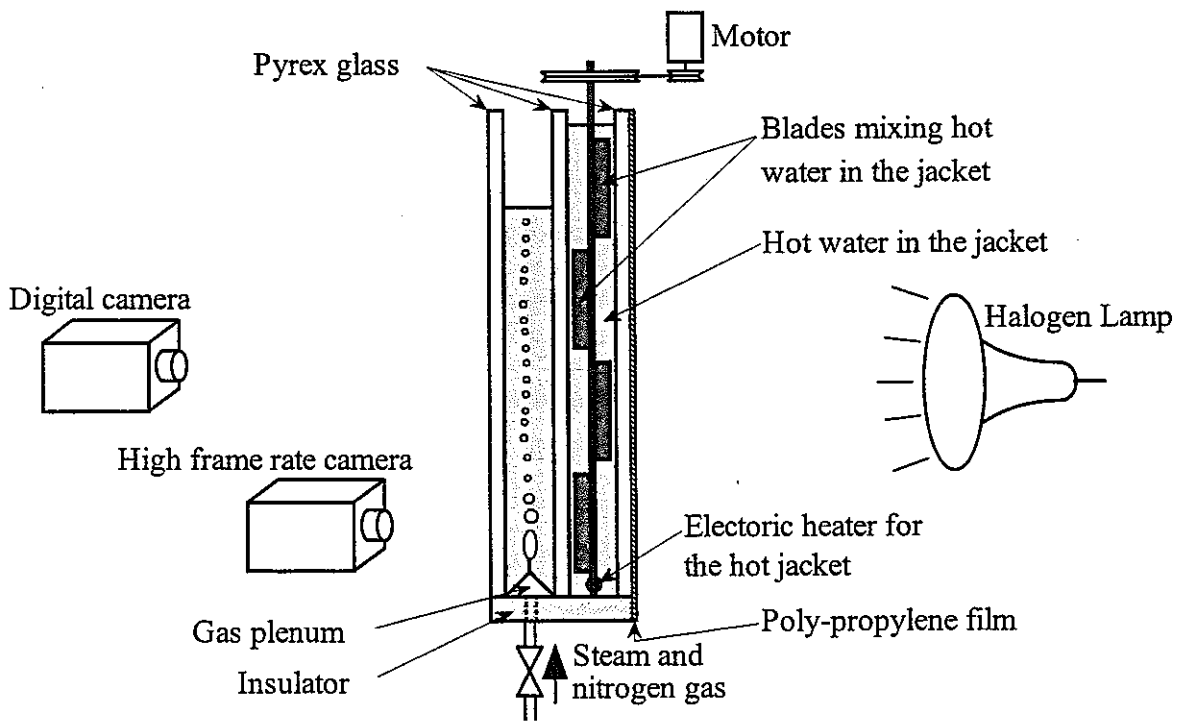
以上より、時間平均した気泡径やボイド率の定量的な分布だけでなく、瞬時的なボイド挙動も拡散律速モデルを用いた SIMMER-III コードによって定性的に再現可能であると考えられる。

3. 4. 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. 3-16 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. 3-17 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。



(a) Front view



(b) Side view

Fig. 3-1. Experimental apparatus.

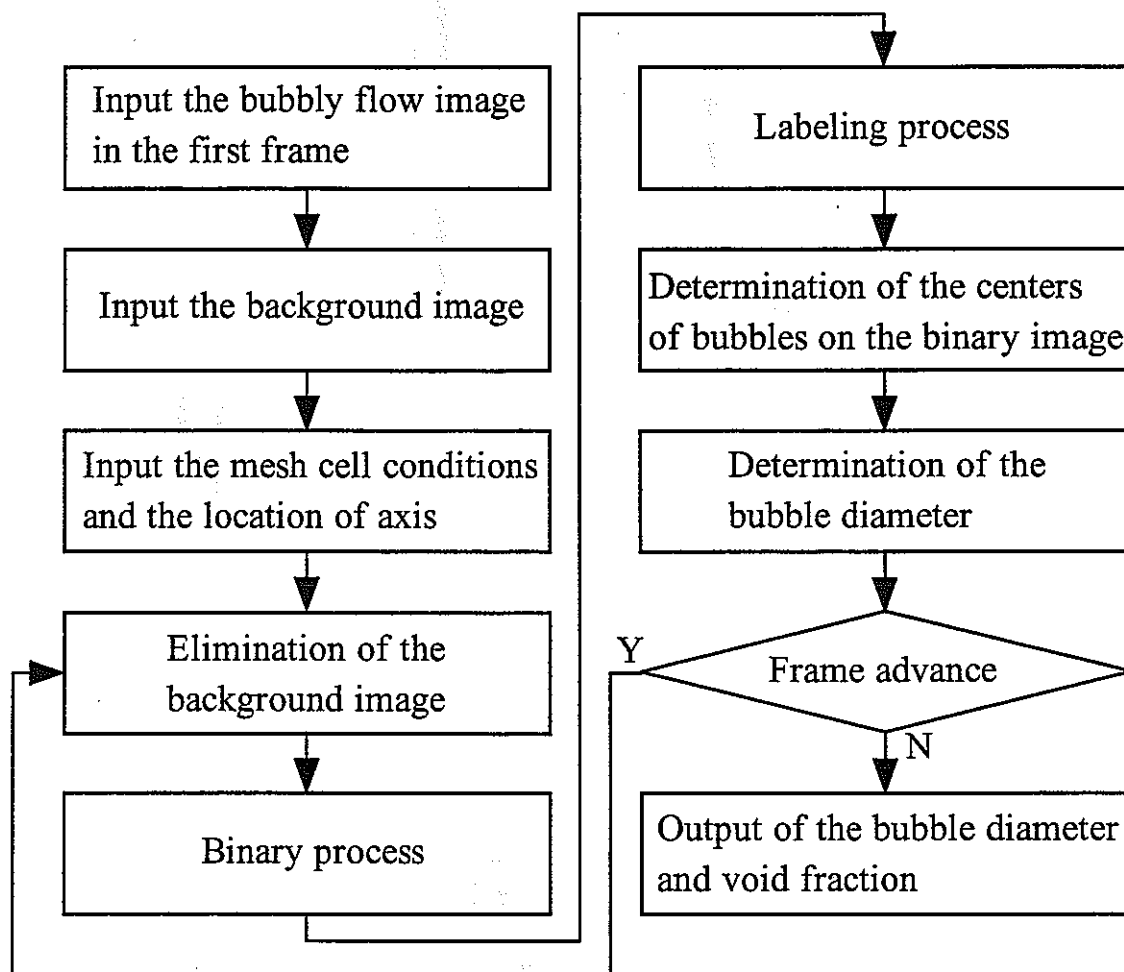
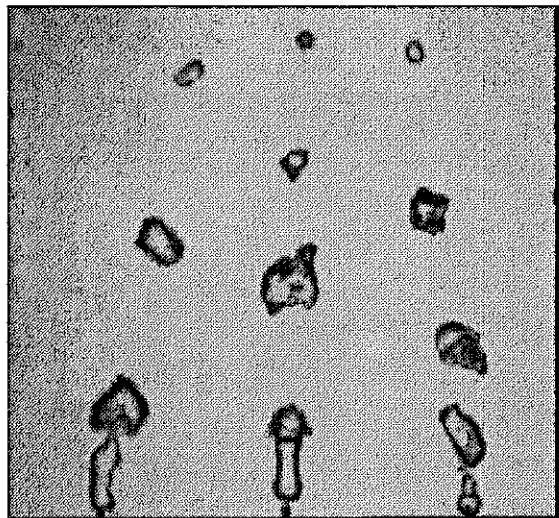
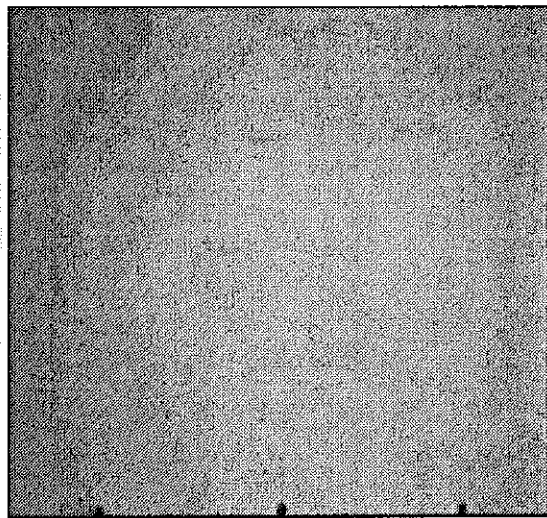


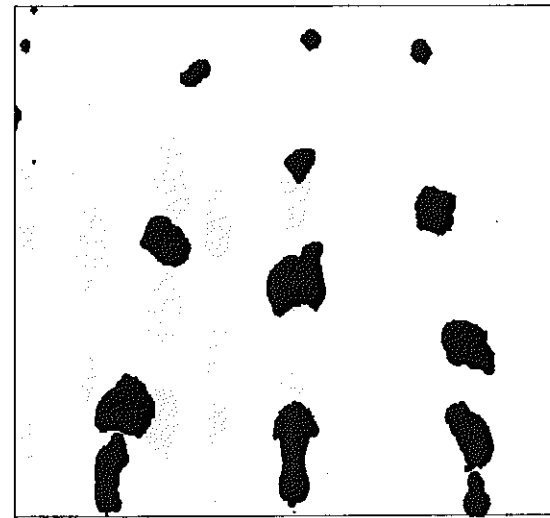
Fig. 3-2. Flow chart of image processing program.



(a) original image

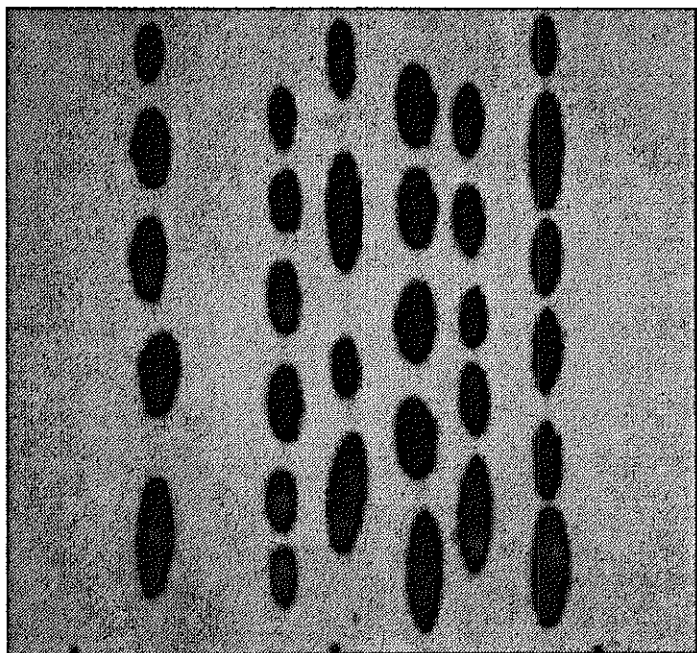


(b) background image

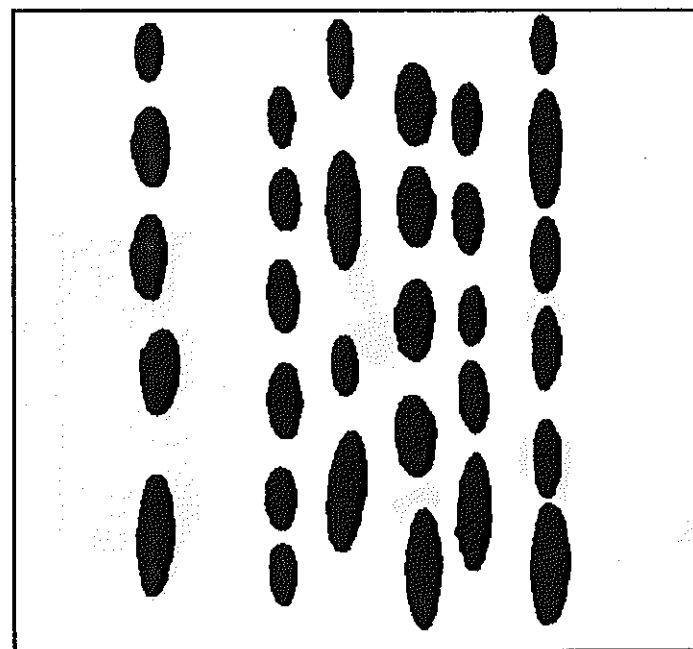


(c) binary image

Fig. 3-3. Binary process.

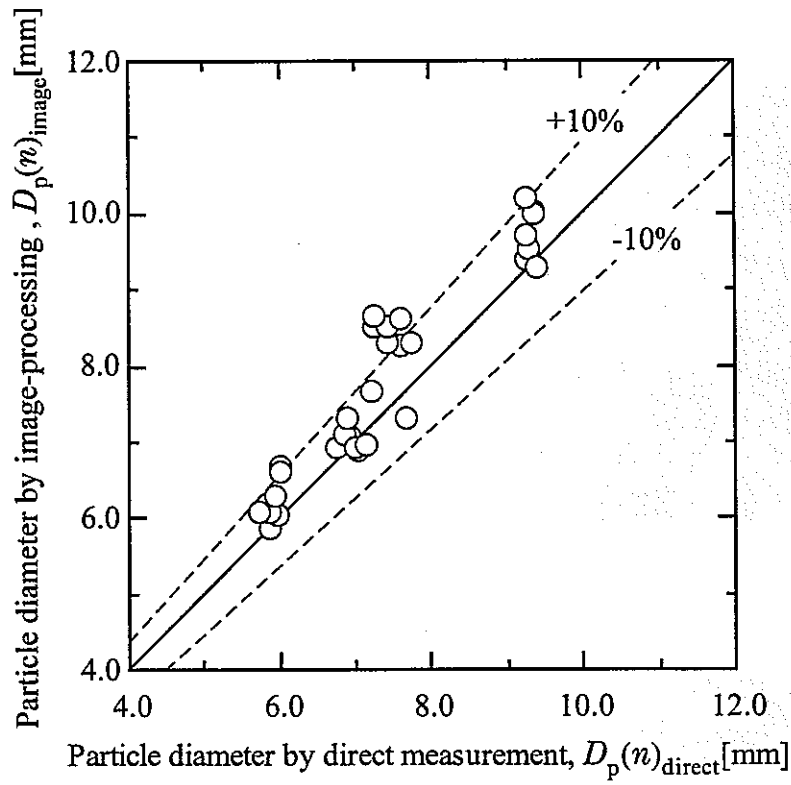


(a) original image

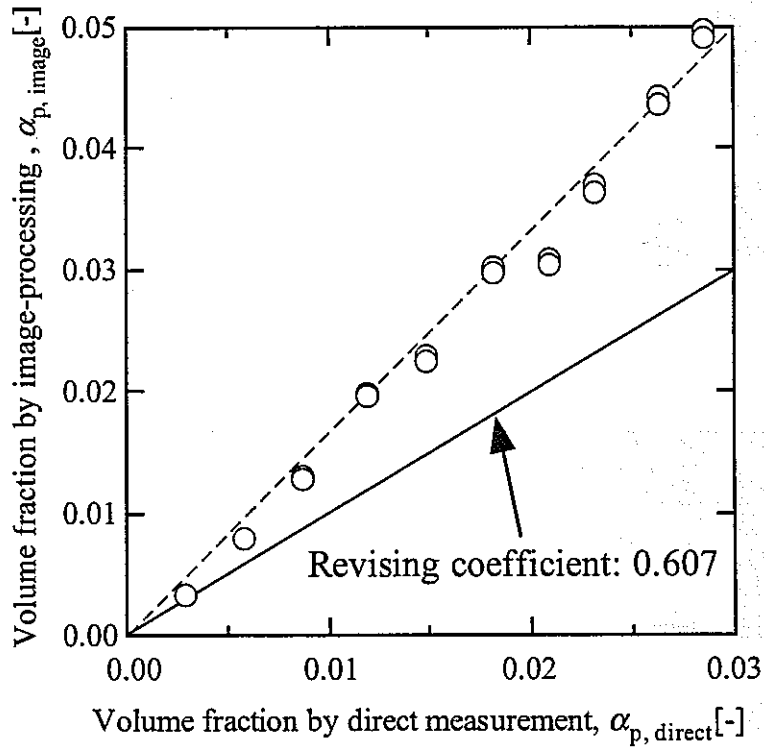


(b) binary image

Fig. 3-4. Particles for the calibration of image-processing.

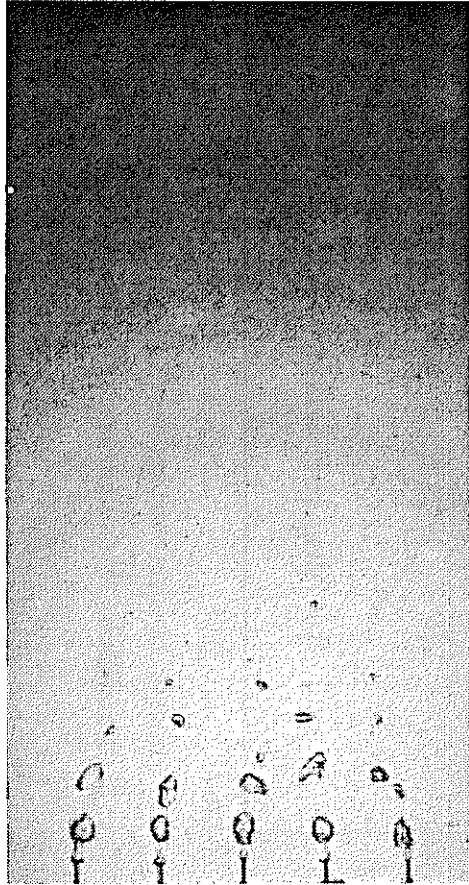


(a) calibration for particle diameters.



(b) calibration for volume fractions.

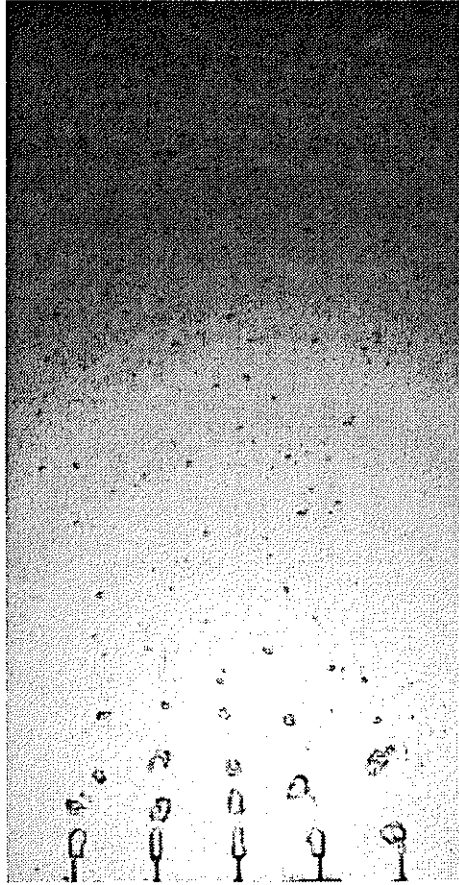
Fig. 3-5. Validity of image-processing.



(a) pure steam

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

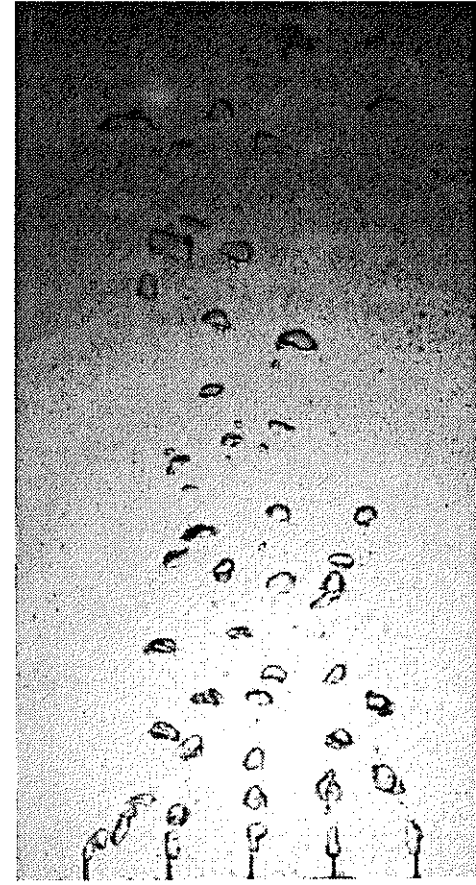
Volume fraction of nitrogen: 0%



(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%

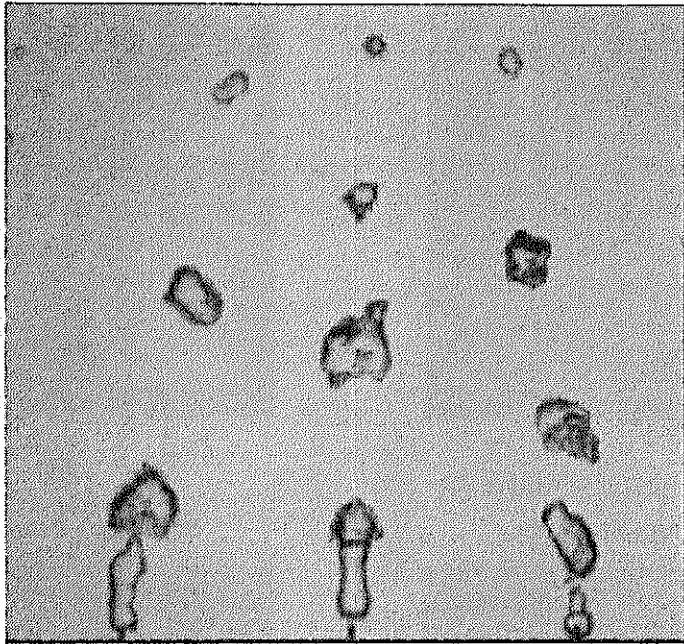


(c) steam and nitrogen gas

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

Volume fraction of nitrogen: 2.7%

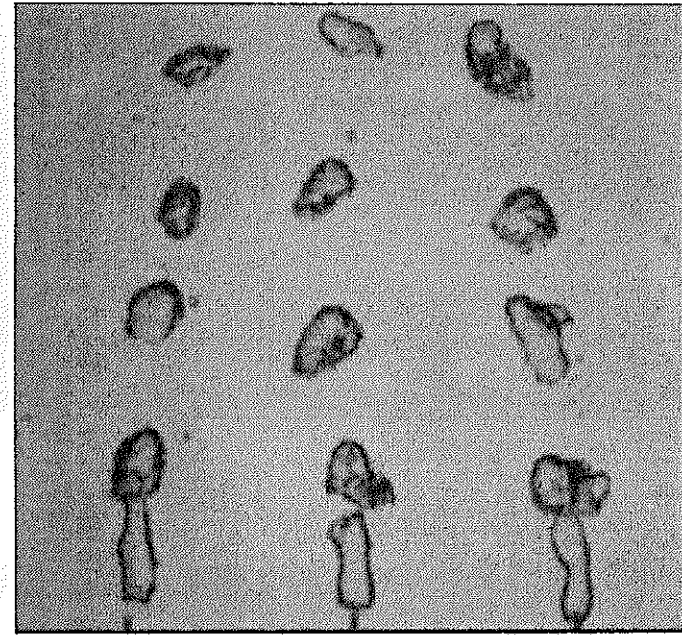
Fig. 3-6. Photographs of bubbly flows.



(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%

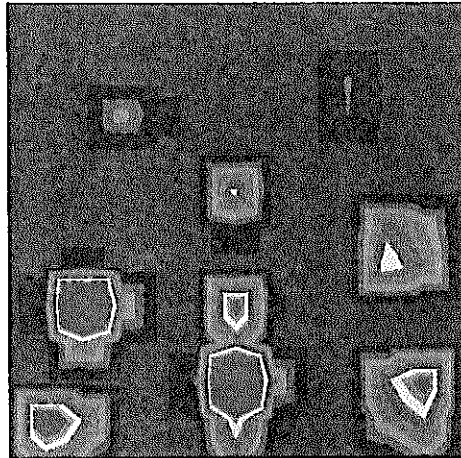


(b) steam and nitrogen gas

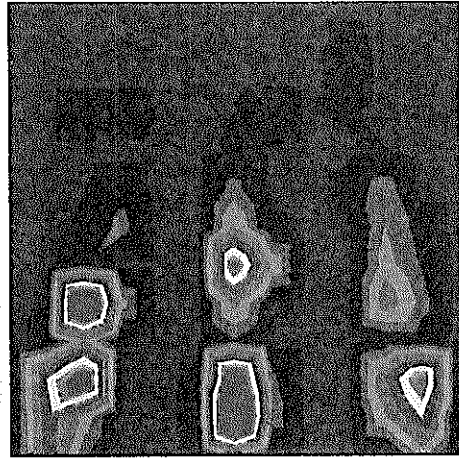
($T_f = 99^\circ\text{C}$, $Q_s = 539 \text{ L/hr}$, $Q_n = 15 \text{ L/hr}$)

Volume fraction of nitrogen: 2.7%

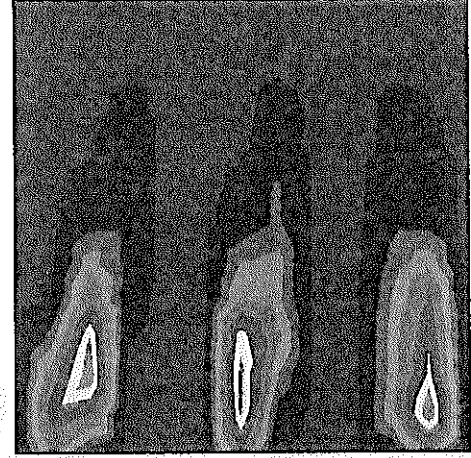
Fig. 3-7. Magnified photographs of bubbles.



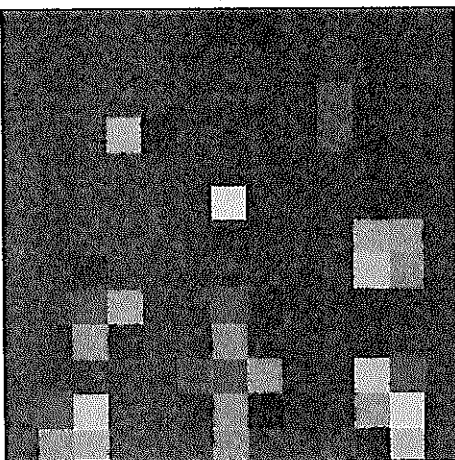
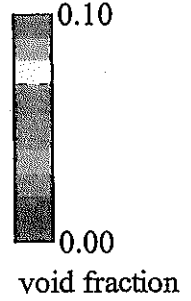
Sampling time = 1/30 sec



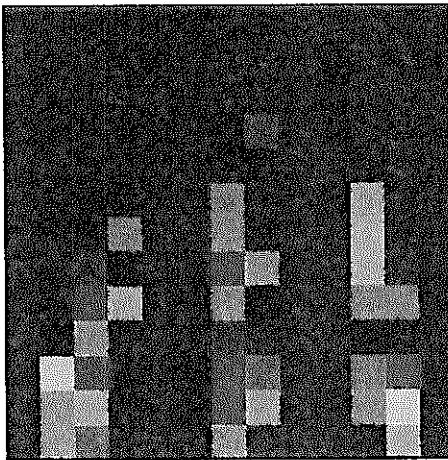
Sampling time = 1/3 sec
(a) expression with Delta-Graph



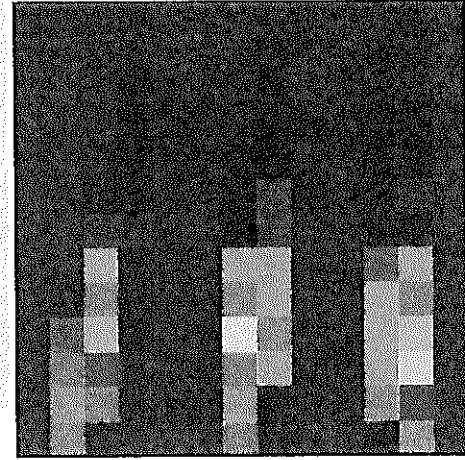
Sampling time = 10 sec



Sampling time = 1/30 sec



Sampling time = 1/3 sec
(b) expression with vcplot



Sampling time = 10 sec

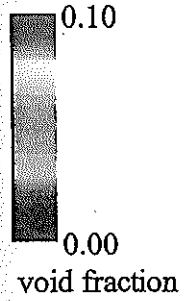
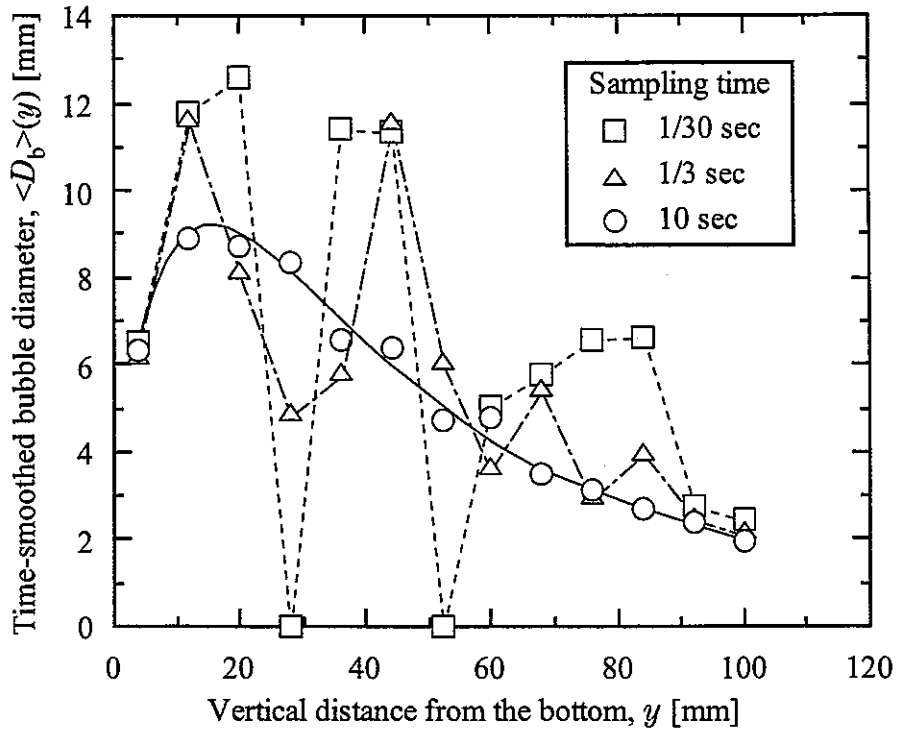
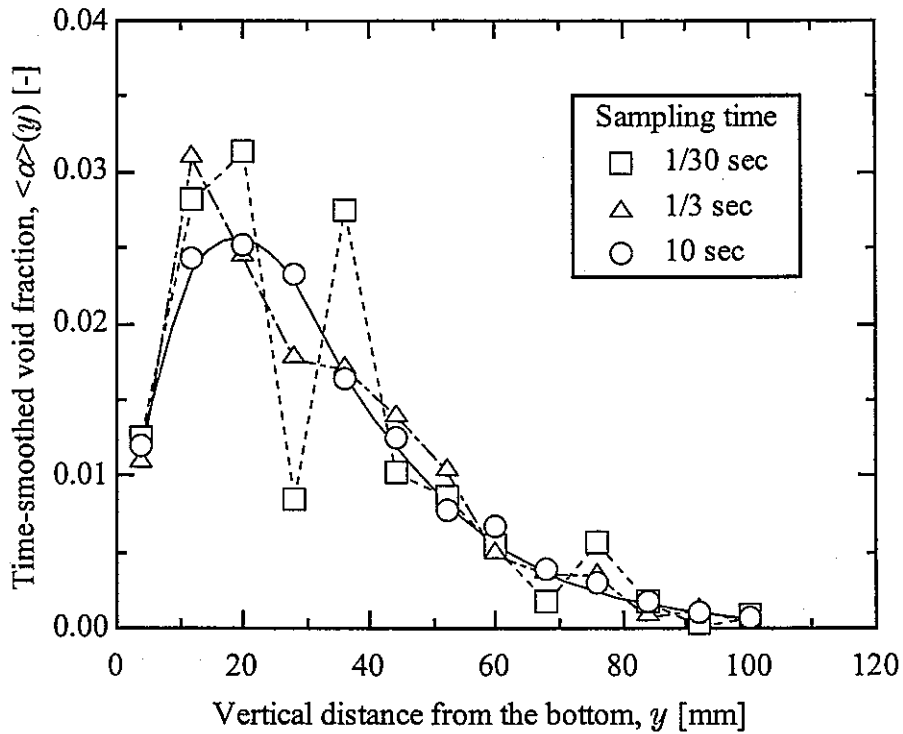


Fig. 3-8. Effect of sampling time on void distribution.

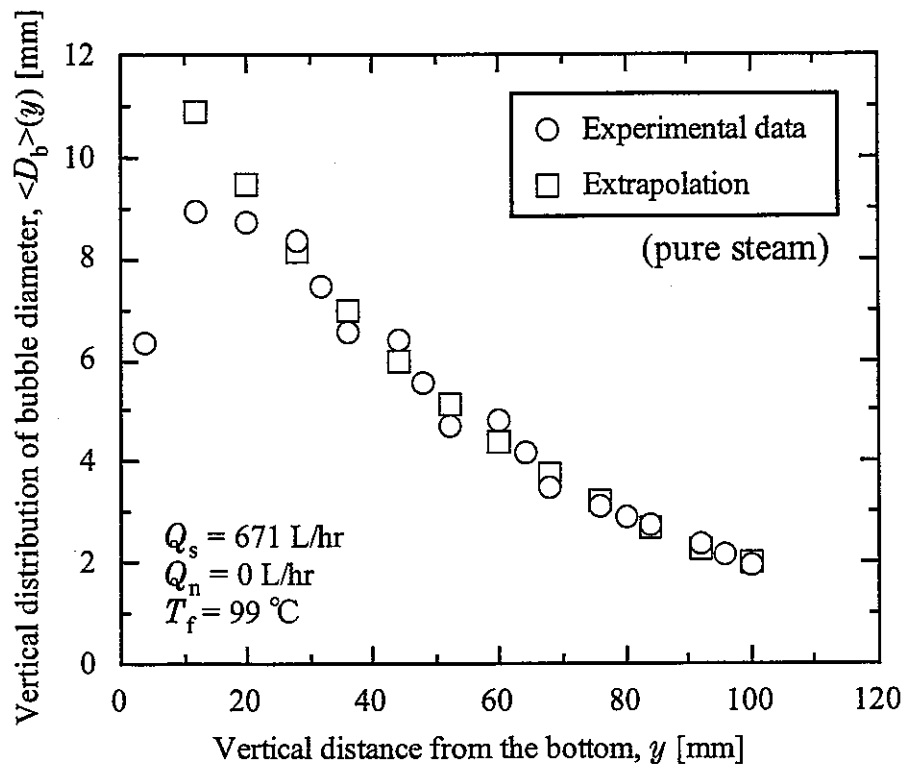


(a) time-smoothed bubble diameter.

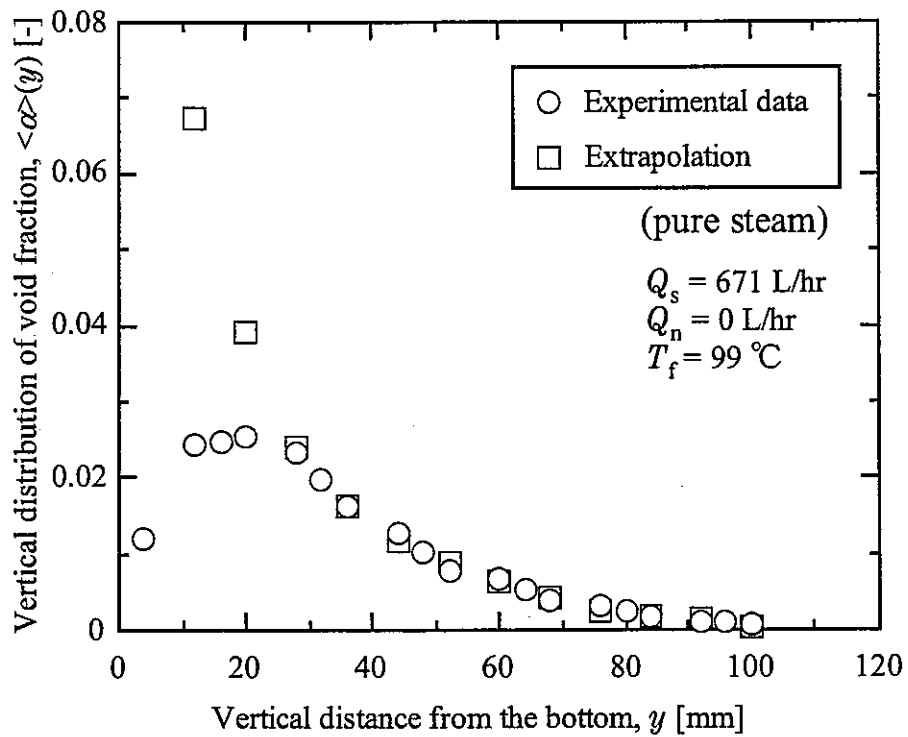


(b) time-smoothed void fraction.

Fig. 3-9. Effect of sampling time on the distributions.

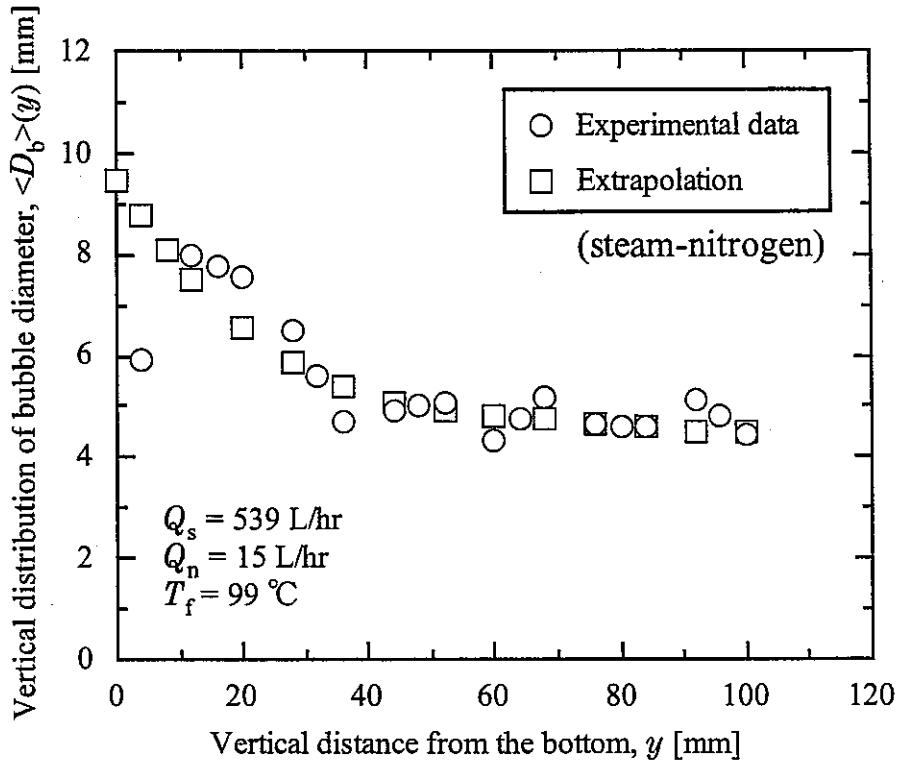


(a) vertical distribution of bubble diameter.

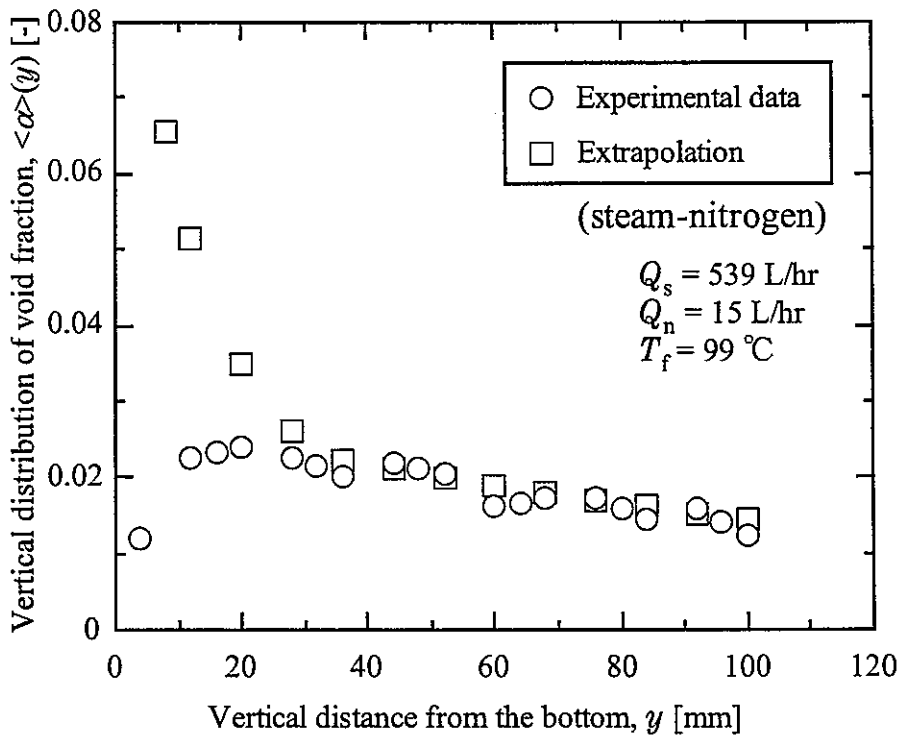


(b) vertical distribution of void fraction.

Fig. 3-10. Experimental data for pure steam.



(a) vertical distribution of bubble diameter.



(b) vertical distribution of void fraction.

Fig. 3-11. Experimental data for steam-nitrogen mixture.

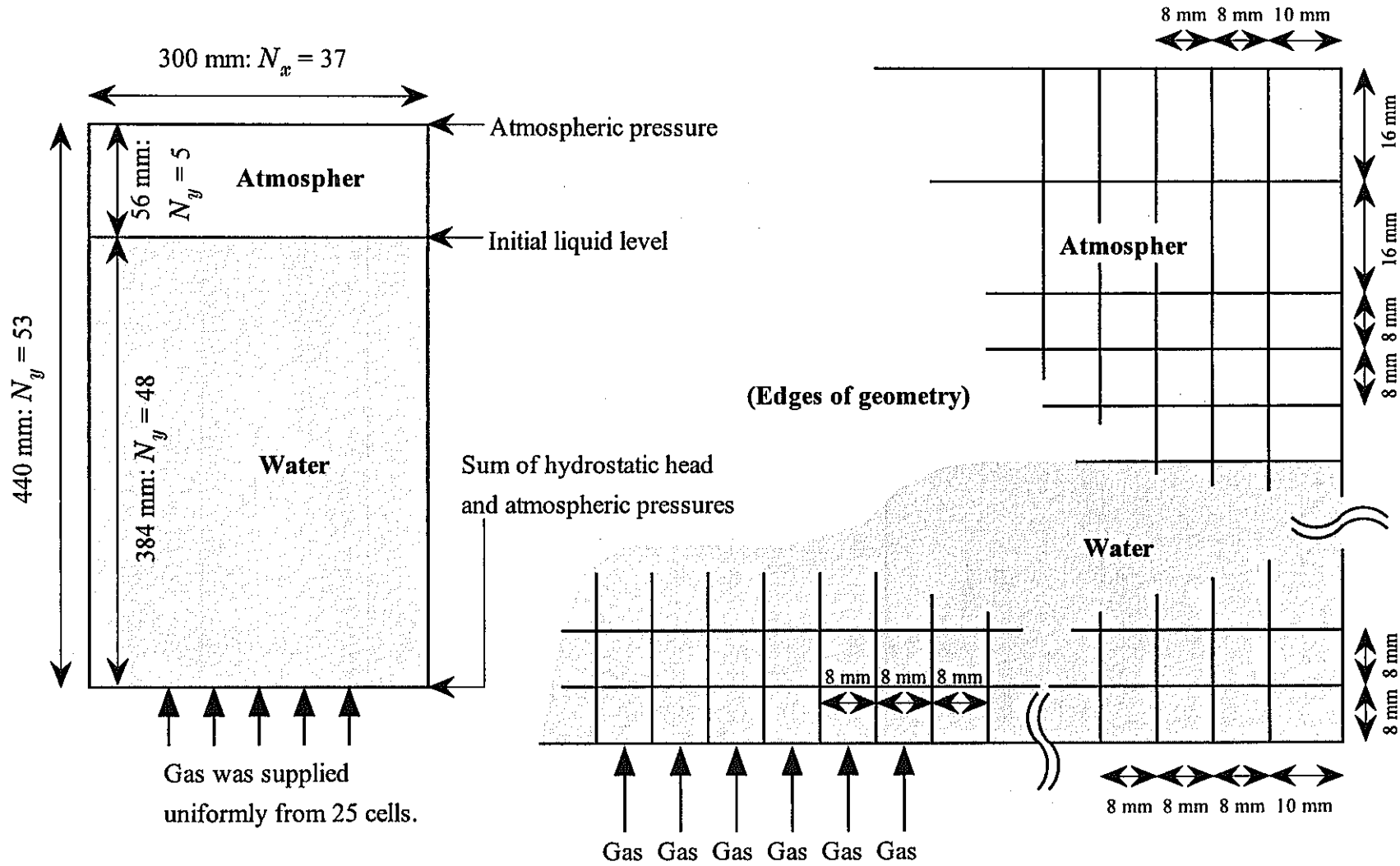
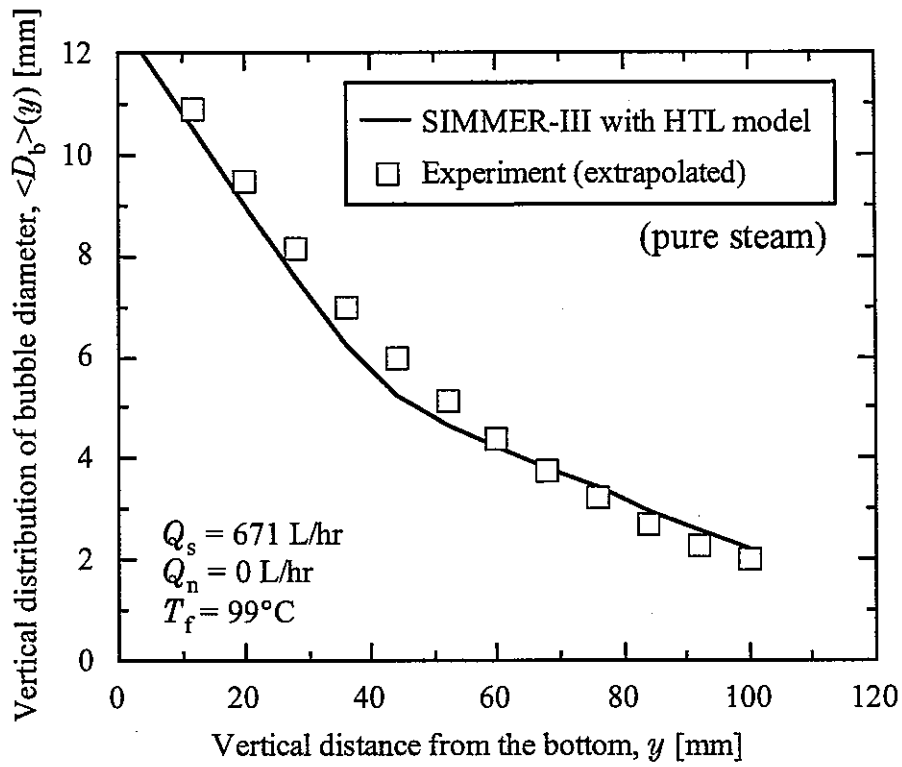
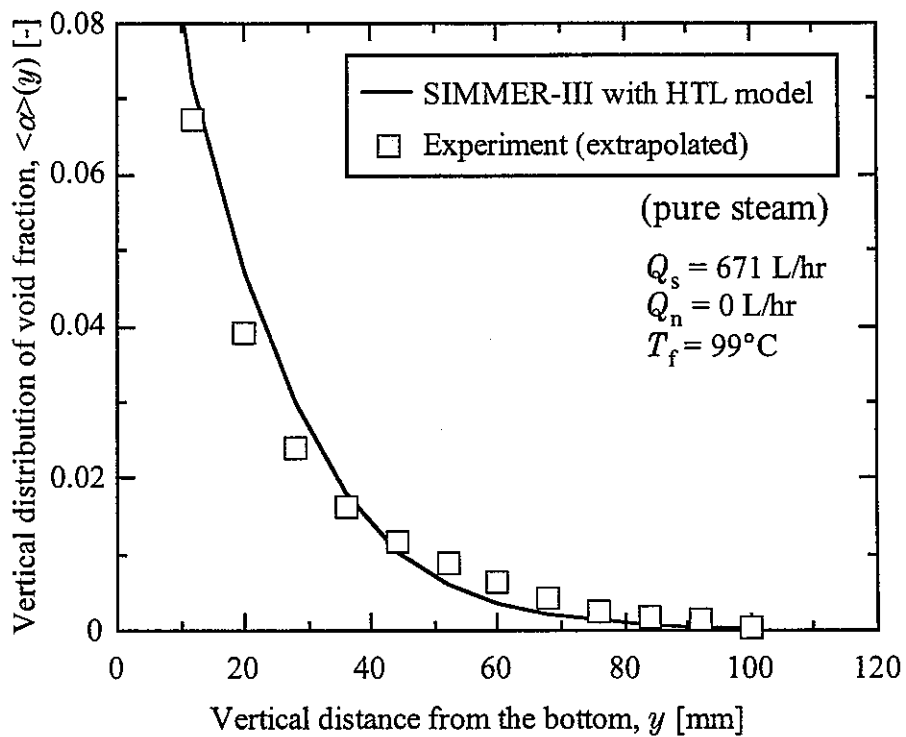


Fig. 3-12. Geometric model for analysis.

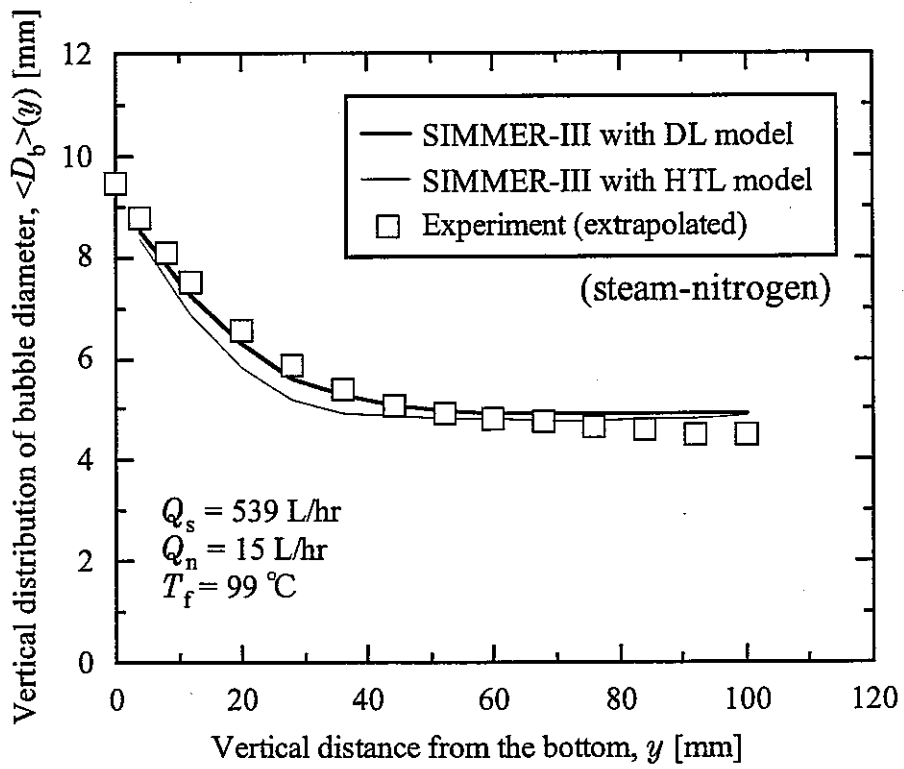


(a) vertical distribution of bubble diameter.

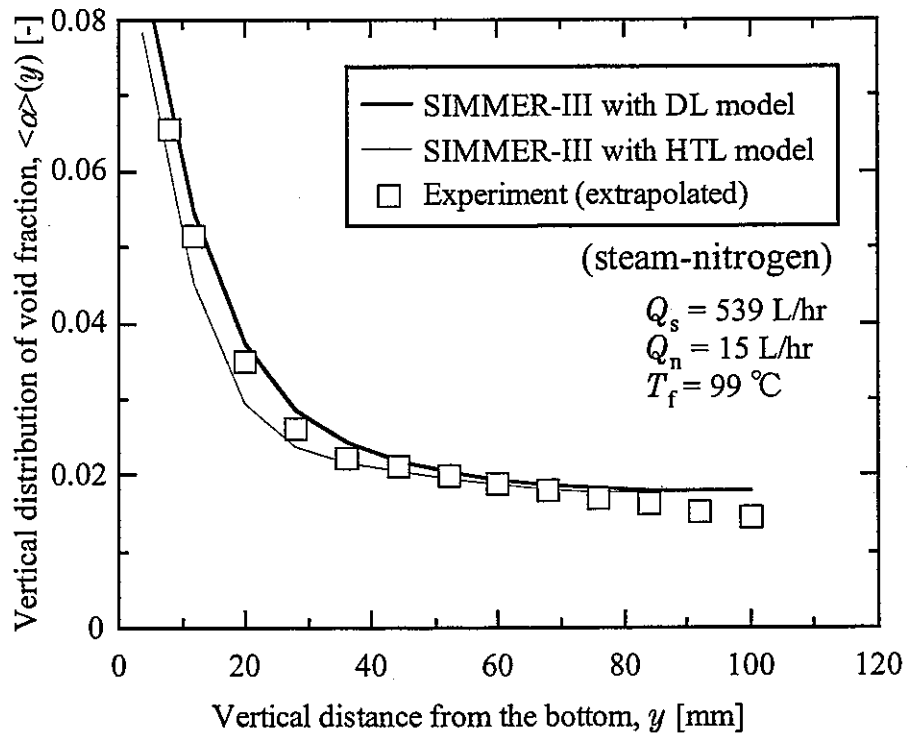


(b) vertical distribution of void fraction.

Fig. 3-13. Comparison between heat-transfer-limited (HTL) model and experiment for pure steam system.



(a) vertical distribution of bubble diameter.



(b) vertical distribution of void fraction.

Fig. 3-14. Comparison between diffusion-limited (DL) model and experiment for steam-nitrogen system.

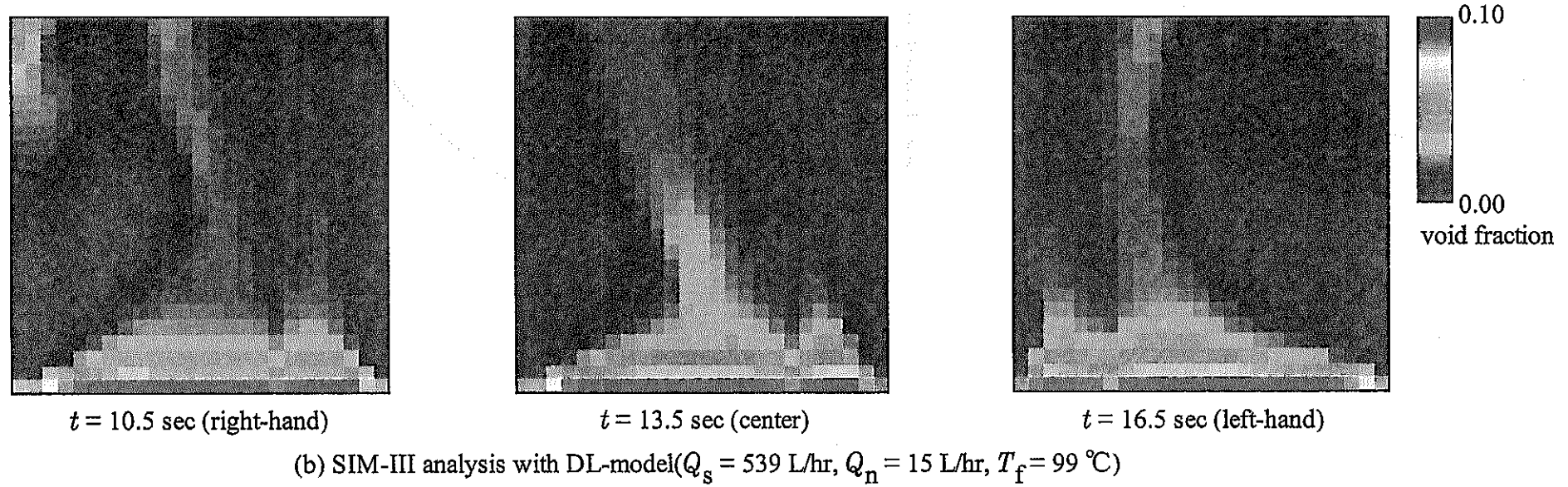
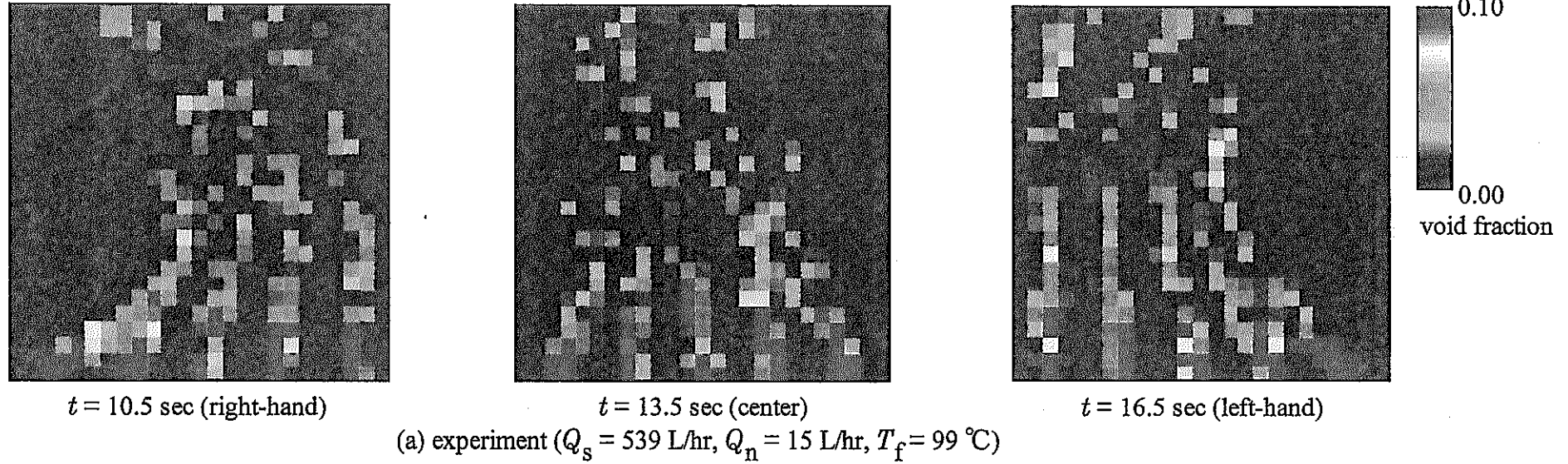
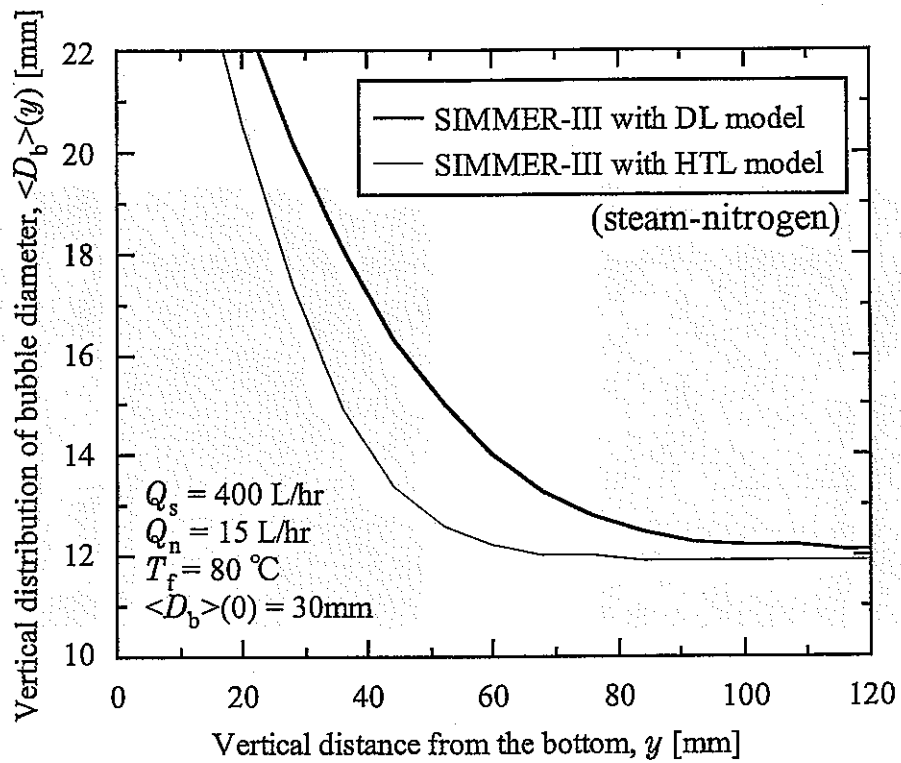
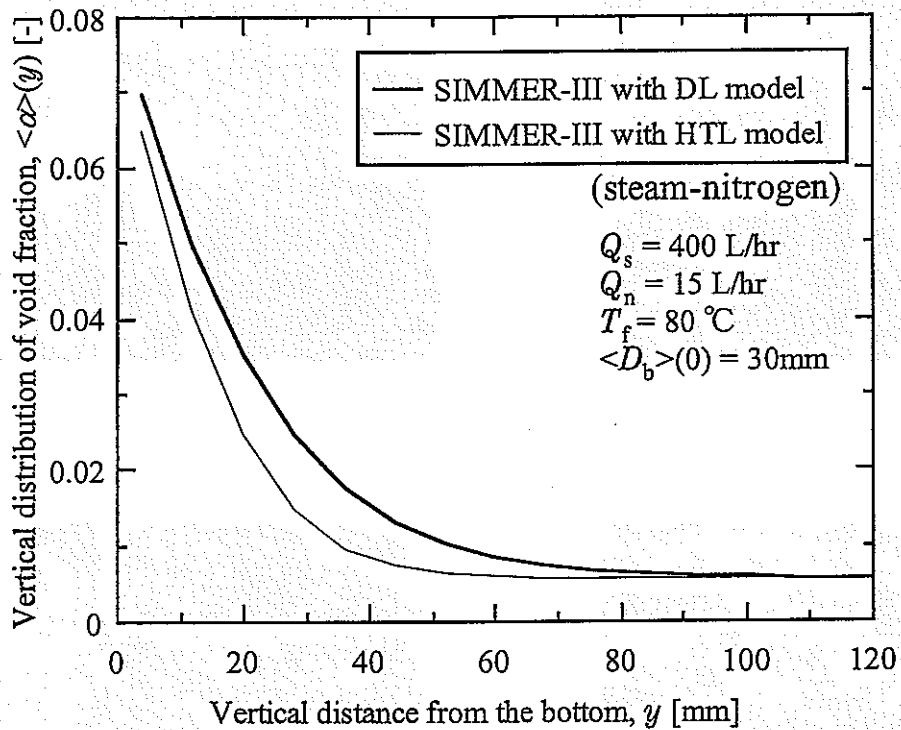


Fig. 3-15. Comparison of void distributions between SIMMER-III analysis and experiment for steam-nitrogen system.



(a) vertical distribution of bubble diameter.



(b) vertical distribution of void fraction.

Fig. 3-16. Comparison of the condition which gives remarkable difference between diffusion-limited (DL) and heat-transfer-limited (HTL) models for steam-nitrogen system.

4. 結 言

平成 11 年度より三カ年計画で実施している先行基礎工学研究「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 一相変化を伴う多成分多相流のモデル化手法の開発一」のうち、平成 12 年度について以下の成果を得た。

- 1) 多成分蒸発／凝縮モデルの開発：多成分蒸気に含まれる非凝縮性ガスの蒸発／凝縮挙動に及ぼす影響を扱うための拡散律速モデルについて検討した。この結果、多成分系での蒸発／凝縮挙動に適用可能な物理モデルを開発し、高速炉安全解析コード SIMMER-III に組み込んだ。さらに、サンプル問題によるテスト計算によって、導入した多成分系の拡散律速型蒸発／凝縮モデルの定性的な効果を確認するとともに、数値解析の安定性や計算効率に問題がないことを確認した。
- 2) 拡散律速型蒸発／凝縮モデルの検証：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手法を新たに開発し、気泡凝縮実験から定量的な実験データを得た。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結果、拡散律速型蒸発／凝縮モデルを導入した SIMMER-III コードが、伝熱律速モデルに基づく従来のモデルと比べて、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ことを確認した。

平成 12 年度までに得られた成果に基づき、今後は、以下の課題を実施する。

- 1) 多成分蒸発／凝縮モデルの開発：拡散律速型蒸発／凝縮モデルを導入した SIMMER-III コードについて、新たに実施する非凝縮成分を含む気泡群の凝縮実験、あるいは、既存の単一大気泡の凝縮実験による検証を進める。
- 2) 相間界面積変化モデルの開発：相変化に伴う気泡や液滴の界面積変化の挙動について、過去の実験データ、各種相関式等を広くサーベイすることで、ソース項のモデル化手法について検討する。更に、これまで検討した流動変化に伴う界面積変化挙動のモデル化手法と合わせて、実験解析等を通じて SIMMER-III コードの改良を図る。
- 3) 複合現象解析による総合検証：開発・改良モデルを導入した SIMMER-III コードを高速炉の安全解析上の複合現象に適用し、総合的なモデル検証によって高速炉の安全評価における改善効果を評価する。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり，ご協力を頂きました九州大学大学院工学研究院・中川 清技官，同工学研究府・高江 俊介氏（現在（株）東芝），宇山 孝士氏，石橋 崇氏に御礼申し上げます。

記号説明

$a_{A,B}$	成分 A/B 間の単位体積当たりの接触境界面積 (m^2)
a_i	単位体積当たりの接触境界面積 (m^2)
C_0	分布パラメータ
D_b	気泡直径 (m)
D_{jB}	混合ガス内での蒸気成分 j の拡散係数 ($m^2 s^{-1}$)
$\langle D_b \rangle$	断面平均気泡直径 (m)
$D_p(n)_{direct}$	実測した n 番目の固体粒子の相当直径 (m)
$D_p(n)_{image}$	画像処理で求めた n 番目の固体粒子の相当直径 (m)
e_A	成分 A の比内部エネルギー ($J kg^{-1}$)
$h_{A,B}$	成分 A- B 接触における A 側の熱伝達係数 ($W m^{-2} K^{-1}$)
h_g	気相側熱伝達係数 ($W m^{-2} K^{-1}$)
h_o	凝縮側熱伝達係数 ($W m^{-2} K^{-1}$)
h^*	対流を考慮した熱伝達係数 ($W m^{-2} K^{-1}$)
i_A	成分 A のバルクでの比エンタルピー ($J kg^{-1}$)
i_{Con}	凝縮エンタルピー ($J kg^{-1}$)
$i_{lg,j}$	蒸気成分 j の蒸発潜熱 ($J kg^{-1}$)
i_{vap}	蒸発エンタルピー ($J kg^{-1}$)
i_A^1	成分 A の境界面での比エンタルピー ($J kg^{-1}$)
j_g	気相の体積流束 ($m s^{-1}$)
k_j	蒸気成分 j の物質移動係数 ($kg m^{-2} s^{-1}$)
k^*	対流を考慮した物質移動係数 ($kg m^{-2} s^{-1}$)
l	代表長さ (m)
Nu	ヌセルト数
p_B	混合蒸気圧 (Pa)
p_j	蒸気成分 j の蒸気分圧 (Pa)
Q_n	窒素の体積流量 ($m^3 s^{-1}$)
Q_s	水蒸気の体積流量 ($m^3 s^{-1}$)
$q_{A,B}$	成分 A/B 接触における A 側から接触境界面への熱移行率 ($W m^{-3}$)
$q_{A,B}^1$	成分 A/B 接触における接触境界面での正味のエネルギー移行率 ($W m^{-3}$)
$R_{A,B}$	質量移行率 $\Gamma_{A,B}$ に対する境界面積の修正係数
R_j	質量移行率 Γ_j に対する境界面積の修正係数
Sh	シャーウッド数
T_A	成分 A のバルクでの温度 (K)
$T_{A,B}^1$	成分 A/B 接触における境界面温度 (K)
t	時間 (s)
V_{gj}	ドリフト速度 ($m s^{-1}$)
x_j	蒸気成分 j のモル分率
y	水槽底面からの鉛直方向距離 (m)

ギリシャ文字

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
$\Delta\rho$	気液密度差 (kg m^{-3})
ρ_f	液体の微視的密度 (kg m^{-3})
ρ_g	混合蒸気の微視的密度 (kg m^{-3})
$\bar{\rho}_A$	成分 A の巨視的密度 (kg m^{-3})
$\Gamma_{A,B}$	成分 A から B への単位体積当たりの質量移行率 ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-3}$)
Γ_j	蒸気成分 j の単位体積当たりの質量移行率 ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-3}$)
κ	熱伝導率 ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
σ	表面張力 (N m^{-1})
ω_j	蒸気成分 j の質量分率

下付き添字

A, B, C, D 成分

Gm 蒸気場の物質成分

m = 1	:	燃料,
m = 2	:	スチール,
m = 3	:	ナトリウム
m = 4	:	FP ガス

G, g 混合蒸気

i 接触界面

K(k) 流体と接触する固体エネルギー成分 (k = 1 - 6 に対して, それぞれ L4, L5, L6, k1, k2 及び k3 を表す)

Lm 液体場のエネルギー成分

m = 1	:	液体燃料
m = 2	:	液体スチール
m = 3	:	液体ナトリウム
m = 4	:	燃料粒子
m = 5	:	スチール粒子
m = 6	:	制御材粒子

M 物質成分

M = 1	:	燃料
M = 2	:	スチール
M = 3	:	ナトリウム
M = 4	:	制御材
M = 5	:	FP ガス

ng 相変化しない蒸気成分

o 凝縮成分

sat 飽和状態

 ∞ バルク

上付き添字

I 境界面

I(k) 固体/流体接触の境界面 ID (k = 1 - 6 に対してそれぞれ I4, I5, I6, I22, I29 及び I30 を表す) .

NE 非平衡質量移行

参考文献

- [1] 守田 他 5 名, 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
—相変化を伴う多成分多相流のモデル化手法の開発—, 核燃料サイクル開発機構,
JNC TY9400 2000-013, 平成12年4月
- [2] Sa. Kondo et al., Status and Achievement of Assessment Program for SIMMER-III, A
Multiphase, Multicomponent Code for LMFR Safety Analysis, Proc. 8th Int. Topical
Mtg. on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-8), Vol. 3, pp. 1340-1348,
Kyoto, Japan, Sept. 30-Oct. 3, 1997.
- [3] Sa. Kondo et al., SIMMER-III: A Computer Program for LMFR Core Disruptive
Accident Analysis -Version 2.H Model Summary and Program Description -, Japan
Nuclear Cycle Development Institute, JNC TN9400 2001-002, Nov. 2000.
- [4] OpCode, Inc., HISTORIAN Plus User's Manual, OpCode, Inc., Houston, Texas, 1987.
- [5] 鈴木 他 3 名, 画像処理を用いた拡散律速型蒸発/凝縮モデルの検証, 核燃料サ
イクル開発機構, JNC TN9400 2001-041, 平成13年4月
- [6] M. Ishii, N. Zuber, Drag Coefficient and Relative Velocity in Bubbly, Droplet or
Particulate Flow," AIChE J., Vol. 25, pp. 843-855 (1979).
- [7] I. Kataoka, M. Ishii, 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).
- [8] M. Ishii, T.C. Chawla, Local Drag Laws in Dispersed Two-Phase Flow, Argonne
National Laboratory, ANL-79-105 (1979).