

# ロケットエンジン供給系流れの数値解析

## Numerical Analysis of Propellant Feed Systems in Liquid-Propellant Rocket Engines

システム評価技術グループ

根岸秀世、谷直樹、山西伸宏

Space Systems Evaluation Engineering Group

Hideyo Negishi, Naoki Tani and Nobuhiro Yamanishi

### Abstract

Numerical simulator for propellant feed systems in liquid-propellant rocket engines based on CFD is under development for supporting H-IIA rocket and next generation rocket development. This simulator consists of turbo pump system simulator and tank system simulator. In this paper, the tank system simulator based on CIP-LSM, which computes free surface behavior, temperature and pressure in rocket propellant tank, is presented. Also, the computed results of 2D sloshing and broken dam problems are presented to assess the accuracy of the solver for problems with strong deformation of the fluid. The results were in good agreement with other published data and experiments. As a result, it was clear that CIP-LSM is an effective method for predicting strong deformation of free surface flows.

### 1. はじめに

H-IIA ロケットおよび次期基幹ロケットの開発を支援することを目的として、当グループではロケットエンジンシミュレーション技術の確立を目指した研究開発を実施している。具体的には、ロケットエンジンシステムシミュレータの開発、ロケットエンジン燃焼系シミュレータの開発およびロケットエンジン供給系シミュレータの開発に分けられるが、いずれもロケットエンジンの設計や不具合対策に使用されることを前提に開発を進めている。

ロケットエンジン供給系シミュレータは主にターボポンプ系とタンク系に分けられる。ターボポンプ系では、現在インデューサの高精度シミュレーション手法の開発に力を注いでおり、インデューサから発生する逆流域の予測、キャビテーションによる性能低下の定量的な把握を目指し開発を進めている。加えて、水試験と実液の性能の違いをシミュレーション上で把握すべく熱力学的効果の数値計算手法の開発も実施しており、最終的には実液での高精度シミュレーションを目指している。一方、タンク系では、推進薬タンク内部における液体の動的挙動、およびタンク内部の圧力・温度予測のためのシミュレーション手法の開発を目指し、平成 16 年度より東京大学姫

野講師との共同研究として研究に着手した。

本稿では、ロケットタンク系シミュレータの概要と平成 16 年度の研究成果について述べる。

### 2. ロケットタンク系シミュレータの概要

#### 2.1 研究背景

一般に液体ロケットは、発射総重量のうち 6～9 割を燃料・酸化剤などの液体が占める。また液体ロケットは、その運用中に様々な振動あるいは加速度環境(数 G から  $10^{-4}$  G 程度)にさらされるため、質量の大部分を占める液体の動的挙動を事前に評価することは、液体ロケット設計における最も基本的な課題の一つであり、液体ロケットが登場した当初より数多くの研究が行われている<sup>[1,2]</sup>。

液体の動的挙動に関する代表的な問題としては、スロッシング(自由表面を有する液体の揺動現象)がある。幸いロケットタンクは、軸対称とみなせるものがほとんどであるため、発生するスロッシング現象はそれほど複雑ではない。そのためスロッシングの事前評価手法として、解析解や種々の数値計算法(有限要素法や境界要素法)が利用でき、現在では十分に精度が良く、スロッシングによる不具合はほとんど見られない。一方で、近年行われている低重力下での 2 段エンジンの再/再々着火や、今後開発が予定されている大推力ロ

ケットの飛行中には、急激な加速度変化により、もはやスロッシング（液体揺動）の範疇には入らない砕波や液の離散・合体を伴う大規模な液面変形が発生する場合がある。このような液面の大変形が発生する場合には、もはや従来のスロッシング解析で用いられてきた評価手法は利用できないため、その予測評価には計算流体力学（CFD = Computational Fluid Dynamics）技術の貢献が期待されている。

また、上記のスロッシングに代表される液体の動力学現象の予測に加え、相変化を伴う熱流動現象を考慮したタンク内温度・圧力予測評価も重要な課題である。液体ロケットタンク内の推進薬は、大抵は極低温流体であるため、外部から熱を受けやすい。更に液体の動的挙動が発生すると、推進薬はタンク構造体もしくはアレッジ部ガスとの熱交換量が増加し、蒸発や凝縮を伴って推進薬温度が成層化したり、圧力が想定値から外れていく可能性がある。タンク内の推進薬温度および圧力が想定値から外れた場合、ターボポンプ式エンジンであれば、インデューサでのキャビテーションを促進する効果となり、エンジンの作動不良を引き起こす原因となりうる。しかしながら現状では、相変化を考慮した圧力・温度の予測は、0次元ないし1次元の解析的手法の域を出ていない。CFDも、相変化を扱うことは非常に難しく、近年になりようやく幾つかの計算事例<sup>[3-6]</sup>が見られるようになってきたが、実際の設計開発現場で利用できるレベルには達していないのが現状である。

以上の事を踏まえ、本研究ではCFDをベースとして、ロケットタンク内推進薬管理評価技術のブレイクスルーを目指し、タンク内部の推進薬液面挙動と相変化を考慮した熱流動現象の連成解析手法の開発を目標として、ロケットタンク系シミュレータの開発を進めている。本シミュレータは、ロケット推進薬タンク内部の熱流動現象を解析対象としているが、推進薬タンクは人工衛星、航空機、自動車など、多くの輸送機械に共通のコンポーネントであり、広く産業界に貢献できるポテンシャルを有している。

## 2.2 基本コードの概要

本研究では、基本コードとしてCIP-LSM<sup>[7,8]</sup>を採用した。CIP-LSMは、様々な加速度環境における気液二相の自由表面流を解析対象とし、CIP-CUP (CIP-Combined Unified Procedure)法<sup>[9]</sup>を気液二相流の熱流動問題に適した形に改良され

たThermo CIP-CUP法<sup>[7]</sup>を流体計算に利用し、界面捕獲法にHLSM (Hybrid Level Set Method & MARS)<sup>[8]</sup>を利用して、3次元一般曲線座標系に拡張した手法である。

CIP-LSMを採用した理由としては、①圧縮性・非圧縮性流体を統一的に解析可能、②実在流体効果の導入が容易、③一般曲線座標系が扱えるため多少複雑な形状の計算も可能、④体積保存を保ちつつ良好な界面捕獲と形状捕捉が可能、⑤表面張力および加速度効果を直接方程式系で扱い安定に計算が可能、⑥H-IIAロケットおよび再使用ロケット実験機関連の解析で実績がある<sup>[10-12]</sup>、などが挙げられる。

## 2.3 数値計算手法

### 2.3.1 支配方程式

CIP-LSMは、固定格子上で計算領域内に存在する気相と液相の運動を数値的かつ統一的に解析する。支配方程式は、式(1)-(3)に示す均質二相流を仮定した3次元圧縮性レイノルズ平均Navier-Stokes方程式と、気液界面捕獲のため、気液界面からの符号付き距離を値に持つLevel Set関数 $\phi$ と気液識別用Color関数としてHeaviside関数 $H_S$ の移流方程式(4),(5)で構成される。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \rho = -\rho \nabla \cdot \vec{u} \quad \dots (1)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \nabla : \Pi + \vec{F}_B \quad \dots (2)$$

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho (\vec{u} \cdot \nabla) e = \{\Pi : \nabla\} \cdot \vec{u} - \nabla \cdot \vec{q} \quad \dots (3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \phi = 0 \quad \dots (4)$$

$$\frac{\partial H_S}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) H_S = 0 \quad \dots (5)$$

ここで $\rho$ は流体の密度[kg/m<sup>3</sup>]、 $\vec{u}$ は流速ベクトル[m/sec]、 $e$ は流体の内部エネルギー[J/kg]をそれぞれ示している。また $\vec{F}_B$ は重力もしくは非慣性力などの体積力[N/m<sup>3</sup>]、 $\vec{q}$ は熱流束[W/m<sup>2</sup>]を示す。また式(2)、(3)の $\Pi$ は応力テンソルであり、圧力テンソル $-p\mathbf{I}$ 、粘性応力テンソル $T_v$ および界面張力テンソル $T_\sigma$ の和であり式(6)-(8)で表される。

$$\Pi = -p\mathbf{I} + T_v + T_\sigma \quad \dots (6)$$

$$T_v = \lambda(\nabla \cdot \vec{u})\mathbf{I} + \mu(\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T) \quad \dots (7)$$

$$T_\sigma = \sigma \delta_s (\mathbf{I} - \vec{n}_s \vec{n}_s) \quad \dots (8)$$



なお  $\mu$  と  $\lambda$  は第一、第二粘性係数[Pa-Sec]であり、 $\sigma$  は界面張力係数[N/m]である。なお  $\delta_s$  は、界面でのみ 1 となるクロネッカーデルタである。また  $\vec{n}_s$  は、界面で液相側に立てた単位法線ベクトルであり、Level Set 関数  $\phi$  を用いて次式で評価される。

$$\vec{n}_s = \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \quad \dots (9)$$

Heaviside 関数  $H_s$  は、次式で定義される。

$$H_s = \begin{cases} 0.5 & (\text{if } \phi > 0 : \text{Liquid}) \\ 0 & (\text{if } \phi = 0 : \text{Interface}) \\ -0.5 & (\text{if } \phi < 0 : \text{Gas}) \end{cases} \quad \dots (10)$$

### 2.3.2 流体計算法

CIP-LSM では、流体の熱流動に関する支配方程式(1)-(3)を、Thermo CIP-CUP 法<sup>[7]</sup>で解く。Thermo CIP-CUP 法は、独立な状態量として密度を外し、流速、圧力、温度を用いる。また、式(1)-(3)の各項を特性速度の違いに応じて移流、拡散、音響の 3 Phase に分けて適宜式変形を行うなどして、これらを Fractional Time Step の概念で順次各段階の変化を計算することで 1 タイムステップを構成するのが特徴である。重力や非慣性力などの体積力は音響 phase で評価する。表面張力は、CSF モデル<sup>[13]</sup>を用いて体積力として扱い、拡散 Phase で評価する。

Figure 1 に示す様に、移流フェーズは移流方程式と見なせるので、これらを時空間 3 次精度の CIP (Constrained Interpolation Profile) 法<sup>[14]</sup>で解く。拡散フェーズは、等容過程の拡散方程式と見なし、これらを時間 1 次精度オイラー陽解法で解く。その際、状態量の微係数は空間 2 次精度の中心差分で評価する。音響フェーズは、等エントロピー過程と見なし Poisson 方程式 (BiCG-STAB 法<sup>[15]</sup>で解く) を導出し、1 次精度陰解法で解く。

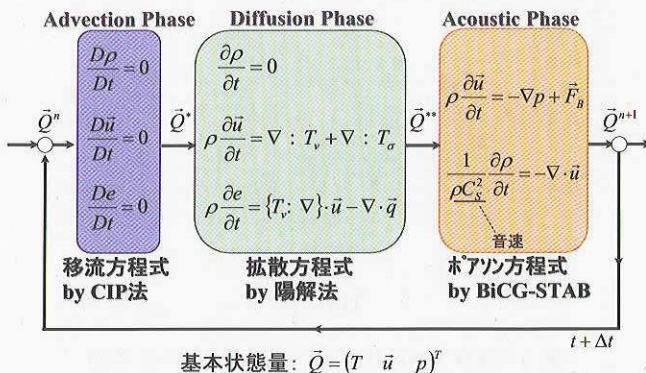


Fig. 1 Algorithm of Thermo CIP-CUP

### 2.3.3 界面捕獲法

CIP-LSM では、界面捕獲法に HLSM<sup>[8]</sup>を用いる。HLSM は、体積保存と液面勾配を考慮した MARS 法により、流束に基づく体積の移流と液面の捕獲を行い、これと Level Set 法による形状捕捉を組み合わせた手法である。界面位置は、符号付き距離関数である Level Set 関数  $\phi$  のゼロ等高面( $\phi=0$ )として陰的に捕捉し、 $\phi$  の符号に対応付けて気液属性を識別する。

HLSM では、Level Set 関数  $\phi$  に加えて、液相体積率  $H_V$  も独立な状態量として導入する。 $H_V$  は式(10)で定義される Heaviside 関数を各計算セルで体積分して式(11)で定義される。

$$H_V = \frac{1}{V_\Omega} \iiint_{\Omega} H_s dV \quad \dots (11)$$

ここで、 $V_\Omega$  は各計算セルの体積を表す。

解くべき  $H_V$  の式は、式(5)を保存形に直し各計算セルで体積分して式(12)の様に導出される。

$$V_\Omega \frac{\partial H_V}{\partial t} = - \iint_{\partial\Omega} H_s \vec{u} \cdot d\vec{S} + H_V \iint_{\partial\Omega} \vec{u} \cdot d\vec{S} \quad \dots (12)$$

HLSM は、各タイプステップで Thermo CIP-CUP 法の音響 Phase 後に、Fig. 2 に示す手順で界面を輸送・再構成する。まず Level Set 関数  $\phi$  を CIP 法、液相体積率  $H_V$  を MARS 法でそれぞれ輸送する。

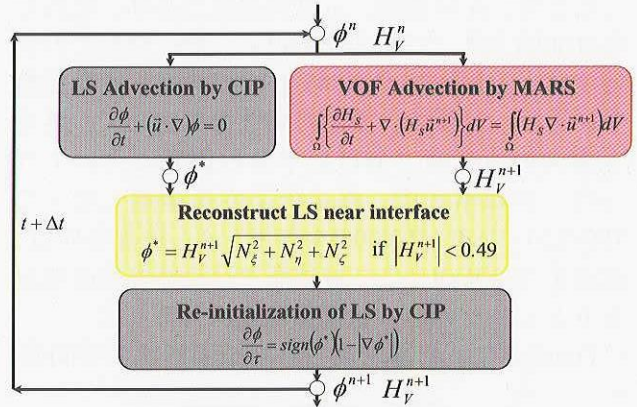


Fig. 2 Algorithm of HLSM

この時、移流計算の過程で Level Set 関数  $\phi$  の距離関数としての性質が失われているので、再初期化という独特の操作でそれを回復するのが従来の Level Set 法である。しかし従来の手法では、この段階で数値的誤差により界面位置( $\phi=0$ )が非物理的に移動してしまう欠点がある。そこで、体積保存を維持して求めてある次の時刻の液相体積率  $H_V$  から界面位置を再構成し、界面位置を固定 (Clip) したまま Level Set 関数  $\phi$  の再初期化を行う



ことで、体積保存を良好に満たしながら次の時刻での Level Set 関数  $\phi$  を求めるのが HLSM の特徴である。

### 3. 成果概要

新規に CFD コードを開発もしくは導入した場合、その有効性と妥当性および限界を見極めておくことは、数値計算の信頼性を確保する上で極めて重要である。そこで平成 16 年度は、CIP-LSM コードの精度検証を実施した。本稿では、その一環として実施した自由表面流解析の代表的ベンチマーク問題である横スロッシング問題とダム崩壊問題の計算結果について報告する。

#### 3.1 横スロッシング問題の数値計算

比較的穏やかな液面挙動の例題として横スロッシング問題を取り上げた。比較する実験は岡本らによる実験<sup>[17]</sup>を選択した。

解析モデルは、Fig. 3 に示すような横幅 1.0 [m]、高さ 1.2 [m]、奥行き 0.1 [m] のアクリル製矩形水槽内に水が 50 [%] 満たされているとした。気相は空気とし、地上重力環境とした。水槽内の温度と圧力は 25 [°C]、1 気圧とした。流体には、式(13)で表される水平加速度を与える。

$$F = A\omega^2 \sin \omega t \quad \dots (13)$$

ここで、 $A$  は振幅、 $\omega$  は角速度であり、それぞれ 0.0093 [m]、5.311 [rad/sec] とした。なおこの各速度による周波数は 0.845 [Hz] であり、固有振動数に近い。計算は、鏡面对称性を考慮して、奥行き方向の対称面で分けた半分の領域について行った。計算格子は、格子依存性を確認した上で 100×120×5 cell (=60,000) を利用した。境界条件は、壁面を Slip Wall とし、対称面では流速の垂直成分を 0 とし、その他の状態量は 0 次外挿した。

Figure 4 に、計算で得られた液面形状の時間変

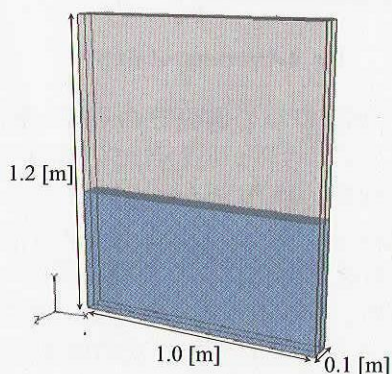


Fig. 3 Computational Model for 2D Sloshing Problem

化を示す。液面形状は、実験結果や他の計算結果と比較してほぼ一致しており、定性的に妥当な結果であることが確認された。特に、 $t=12.0$  [sec] 付近はスロッシングが最大振幅となる時刻であり、壁付近での小さな砕波が再現されている。

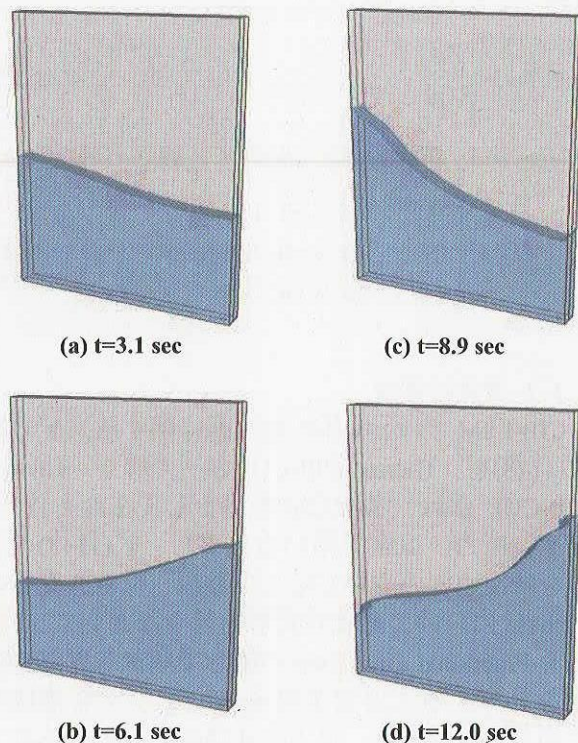


Fig. 4 Computed Free Surface Profiles for Horizontal Forced Oscillation ( $A=0.093$  m,  $\omega=5.31$  rad/s,  $f=0.845$  Hz)

Figure 5 に、水槽左壁での水位履歴を示す。比較のため岡本らの実験計測値および汎用ソフト FLUENT の結果も合わせて示した。図より、計算結果は実験および FLUENT と良好な一致を示しており、妥当な結果であることが確認された。

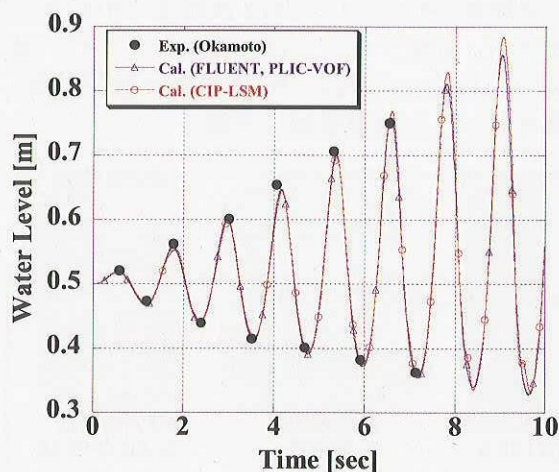


Fig. 5 Water Level History on Left Vertical Wall



Figure 6 に、各時刻での水の初期体積に対する体積誤差を示す。体積誤差は  $t=12.0[\text{sec}]$ 迄の時刻で約  $0.015 [\%]$ 以内であり、体積保存が良好に維持されていることが確認された。

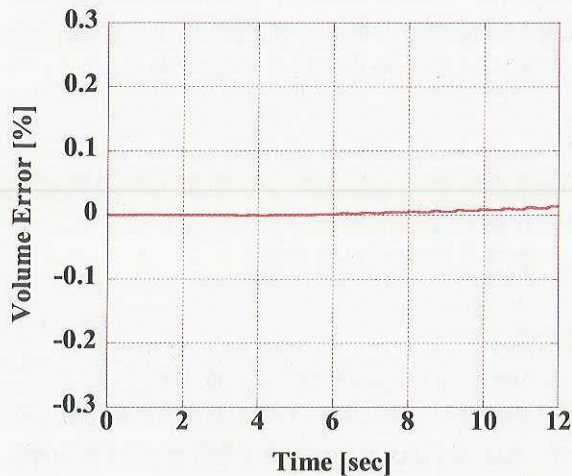


Fig. 6 Volume Error for 2D Sloshing Problem

### 3.2 ダム崩壊問題の数値計算

液の合体・分離や波の砕波など複雑な界面挙動が発生する例題としてダム崩壊問題を取り上げた。比較する実験は越塚らによる実験<sup>[18]</sup>を選出した。

解析モデルは、Fig. 7 に示す様に代表長さを  $L=0.146 [\text{m}]$ として、横幅  $4L$ 、高さ  $4L$ 、奥行き  $L$  のガラス製矩形水槽とした。初期条件として、水槽内左側  $1/4$  の領域に横幅  $L$ 、高さ  $2L$ 、奥行き  $L$  の水柱を考え、それが重力の効果で崩壊していく様子を再現する。気相は空気とし、地上重力下(1G)とした。水槽内の温度と圧力は  $25[^\circ\text{C}]$ 、1 気圧とした。計算は、鏡面对称性を考慮して、奥行き方向の対称面で分けた半分の領域のみ行った。計算格子は、格子依存性を確認した上で、 $100 \times 100 \times 12$  ( $=120,000 [\text{cell}]$ )の等間隔構造格子を用いた。境界条件は、外側境界を全て壁面とし、No-Slip Wall とした。対称面では、流速の垂直成分を  $0$  とし、その他の状態量は  $0$  次外挿した。時間刻み  $\Delta t$  は  $0.2 [\text{msec}]$ とした。

Figure 8 に、計算で得られた崩壊する水柱の液面形状変化を示す。  $t=0.0[\text{sec}]$ から重力の効果により水柱が崩壊を始め、水槽右壁に衝突し壁に沿って打ち上がった後、砕波して水槽左壁に向かっていく一連の大規模な液面挙動が再現された。また波の打ち上がりや砕波に伴い発生する、液の分離や合体も再現されていることが分かる。越塚らの実験で得られた画像と比較しても、計算での液面

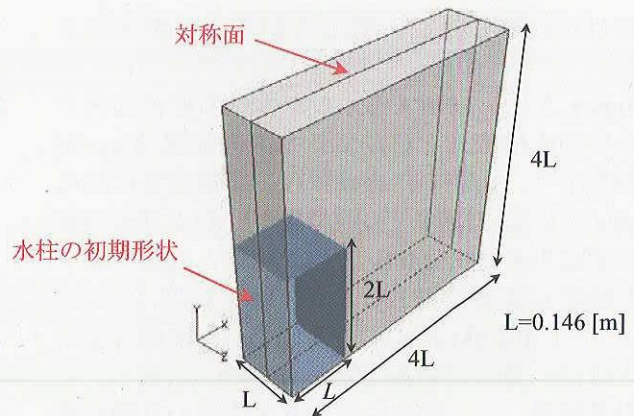


Fig.7 Computational Model for Broken Dam Problem

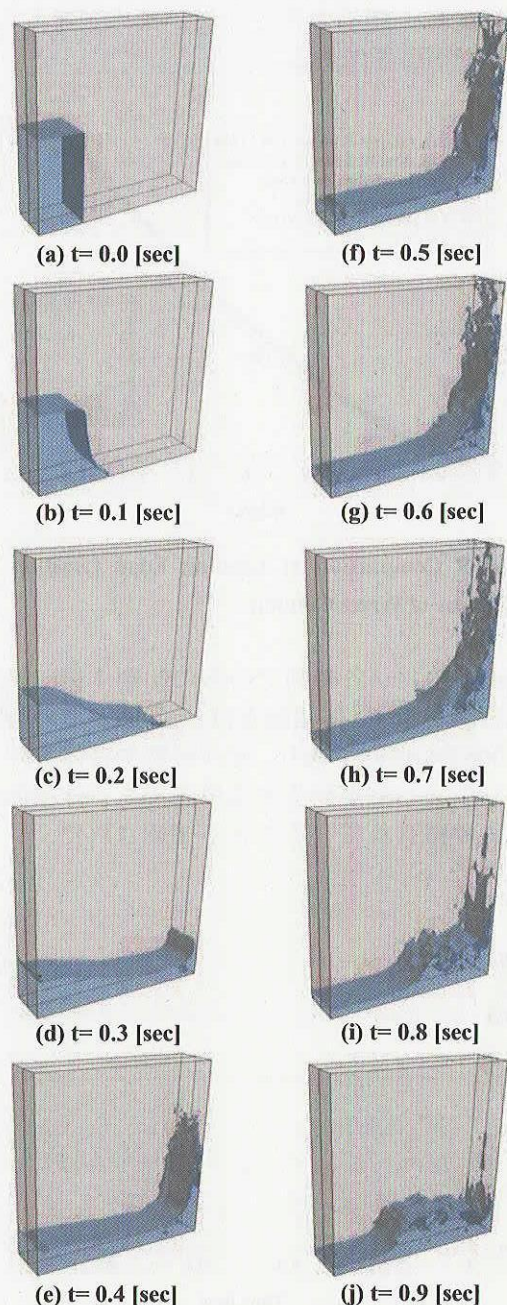


Fig. 8 Computed Free Surface Profiles for Collapse of Water Column



形状は定性的に良く一致していることが確認された。

Figure 9 に、崩壊する水柱が水槽右壁に衝突するまでの水槽底面を移動する水際線位置  $X_{front}$  の履歴を示す。比較のため越塚らの実験結果に加え、Martin らによる同様な実験結果<sup>[19]</sup>、および他の数値計算結果として MPS 法<sup>[18]</sup>の結果と汎用ソフト FLUENT による結果も合わせて示した。

図より、CIP-LSM による計算結果は、他の計算手法とほぼ一致していることが分かる。ただし、どの計算結果でも、実験結果より水際線の移動が速く評価されている。これは、完全に乾いた面上を濡れが進行する際の壁面における抵抗力を、計算では精度良く評価できていないためと考えられ、今後検討が必要である。

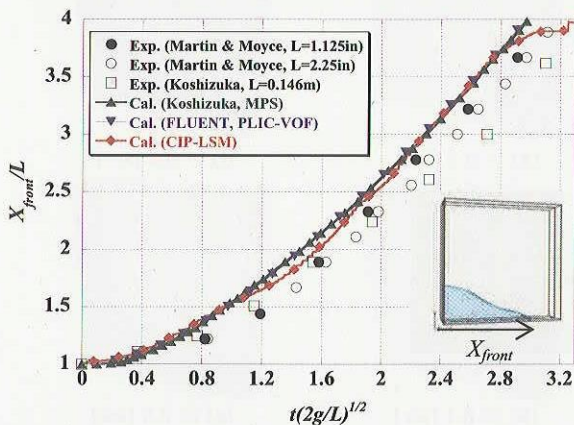


Fig. 9 Comparison of Leading Edge Location in Collapse of Water Column

Figure 10 に、各時刻での水の初期体積に対する体積誤差を示す。体積誤差は  $t=1.0[\text{sec}]$  迄の時刻で約 0.006 [%] 以内であり、液の分裂や合体を伴う大規模な液面挙動が発生する場合でも、体積保存が良好に維持されていることが確認された。

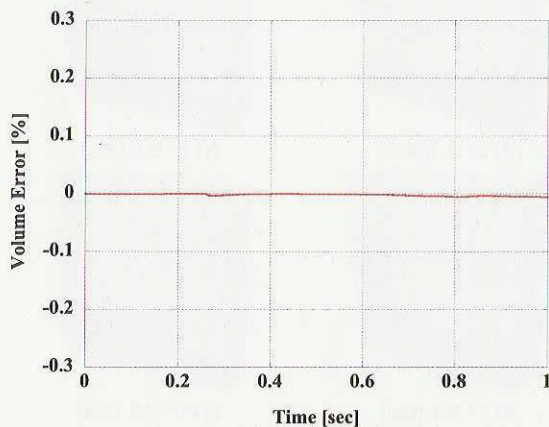


Fig. 10 Volume Error for Broken Dam Problem

#### 4. まとめ

CIP-LSM を用いて横スロッシング問題とダム崩壊問題の計算を実施し、実験結果および他の計算手法と比較して妥当な結果が得られることが確認された。今後も更にコードの検証を実施し信頼性向上に努めると共に、乱流モデルや相変化モデルの導入に取り組んでいく予定である。

#### 謝辞

本研究を実施するにあたり、東京大学姫野武洋講師より多大なご指導をいただいている。ここに記し、著者らの謝意を表する。

#### 参考文献

- [1] H.N. Abramson (editor), NASA SP-106, 1966
- [2] 小松敬治ほか, “宇宙機における液体の動的挙動の研究,” NAL-NASDA 共同研究成果報告書, 第1報(1989), 第2報(1990)
- [3] T. Kunugi, *Computational Fluid Dynamics J.*, Vol.9, 2001, pp.563-571
- [4] 斎藤直ほか, “プール沸騰の直接数値計算,” 第14回数値流体力学シンポジウム, 講演論文集, F08-1, 2002
- [5] 岸本悟志ほか, “沸騰・凝縮現象の数値シミュレーション,” 日本混相流学会年会講演会 2005, 講演論文集, 2005, pp.273-274
- [6] D. Lakehal et al, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 23, 2002, pp.242-257
- [7] 姫野武洋ほか, 機論(B), 69 巻, 678 号, 2003
- [8] 姫野武洋ほか, 機論(B), 69 巻, 687 号, 2003
- [9] T. Yabe et al, *J. of Comp. Phys.*, 169, 2001, pp.556-593
- [10] Himeno et al., AIAA Paper 2001-3822, July 2001
- [11] Himeno et al., AIAA Paper 2002-3987, July 2002
- [12] Himeno et al., AIAA Paper 2003-4894, July 2003
- [13] J.U.Brackbill et al., *J. of Comp. Phys.*, 100, 1992, pp.335-354
- [14] 矢部孝ほか, “CIP 法 -原子から宇宙までを解くマルチスケール解法-,” 森北出版, 2003, ISBN4-627-91831-3
- [15] 藤野清次ほか, “反復法の数理,” 朝倉書店, 1996, ISBN4-254-11404-4
- [16] M. Sussman et al., *J. of Comp. Phys.*, 114, 1994, pp.146-159
- [17] T. Okamoto et al., Proceedings of JSCE, 441, I-18, 1992, pp.39-48
- [18] S. Koshizuka et al., *Computational Fluid Dynamics J.*, Vol.4, No.1, 1995, pp.29-46
- [19] J.C.Martin, and W.J.Moyce, *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, Ser.A, Vol.244, 1952, pp.312-324