

## 気液二相流の直接解析手法の開発と検証

### 二相流の実験代替シミュレーションを目指して

気液二相流解析の分野では、様々な実験相関式を用いたモデルが採用されています。このため、形状の変更などに対して実験相関式の適用限界があり、モデル定数を決定するために非常に高度な実験が必要となります。

東芝では、単相流のみならず、気液二相流解析の分野でも、粒子のイメージで連続体を表現することにより、実験相関式を用いず直接計算する新しい手法を開発しています。実験をしないで、この手法を用いて相関式を作成することで、二相流にかかわる機器開発の効率は大きく向上します。

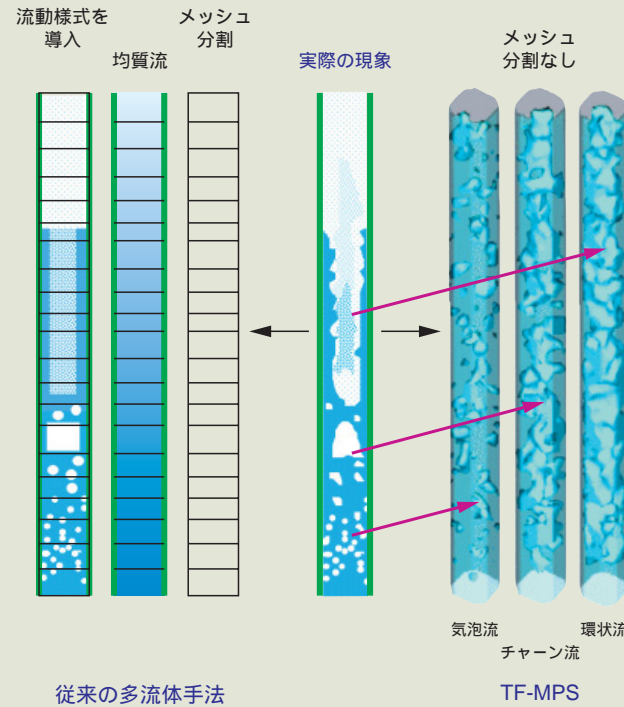


図1 従来の多流体手法とTF-MPS法による計算の概念 - 従来の多流体手法では、計算領域をメッシュ分割し、流動様式などの構成式を導入することで実現が表現できますが、TF-MPSでは、構成式を用いずに自然に流動様式を再現できます(右の図では気体表面を可視化しています)。

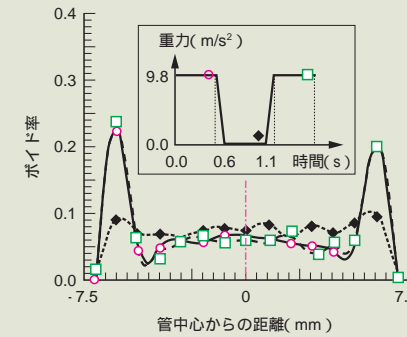


図2 重力変化による径方向ボイド率分布の解析 - 3時刻における径方向ボイド率分布を示します。重力の回復とともに分布が戻っています。

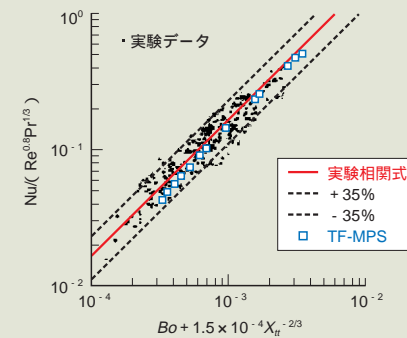


図3 管内沸騰実験と解析の比較 - 青点が解析結果で、破線は35%信頼区間を示します。

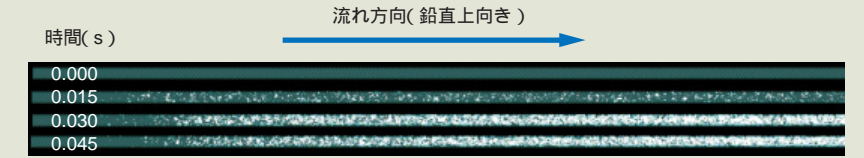


図4 管内沸騰解析 - 管に流入するサブクール水が管壁から熱を受けて気泡が生成するようすを示します。

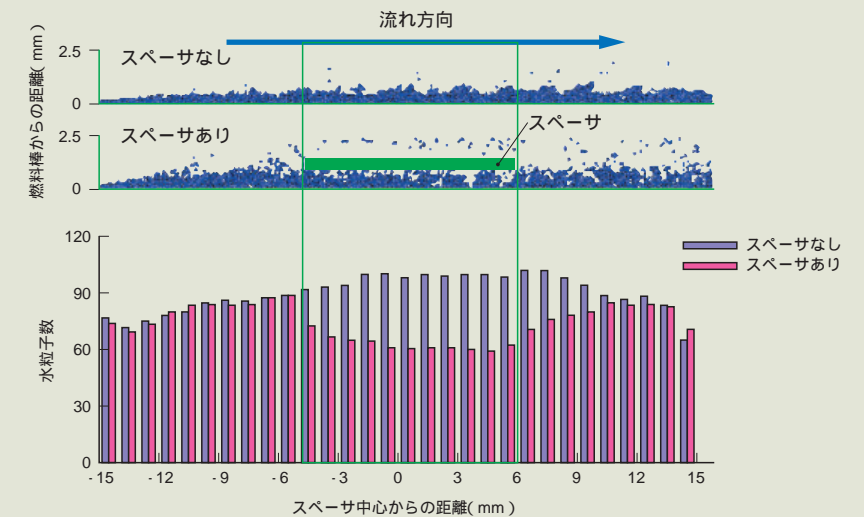


図5 燃料集合体スペーサ近傍の流動挙動解析 - 計算領域(鉛直方向×燃料棒からの距離×幅) = 30 × 2.5 × 0.6 (mm) の下端(図では左)より、気体、水を各々10及び5 m/s(入口での液膜厚さ0.2 mm)で吹き込みます。粒子サイズは0.1 mmで、気体粒子数は42,150が用いられています。

### 気液二相流を直接計算する

長さ30 cm、直径2 cmのパイプの底面から空気を吹き込み、この中に入れてある水を支えるためにはどれだけの強さで空気を吹き込めばよいでしょうか。また、そのとき水はどのような形状をしているのでしょうか。二相流解析ではこのような問題を対象とします。水の形状を流動様式、空気の容積割合をボイド率と呼びます。この問題に対して、流動様式や気液間の抵抗係数などの構成式を用いずに、計算で直接答えを得ることはできません。また構成式を用いても、複雑形状では精度を確保することに限界があり、原子力プラントなど多くの工学分野で、気液二相流を精度よく扱う手法が求められています。

近年、MPS(Moving Particle

Semi-implicit)法と呼ばれる粒子法が越塚・岡(東京大学)により開発されました<sup>(1)</sup>。MPS法は流体や構造を粒子的に扱う汎用性の高い手法です。流体解析では流体のふるまいを表すナビエ・ストークス方程式に適用されます。

東芝は、MPSの考え方を2種類の流体に拡張し、液体の表面張力を導入するとともに、2種類の流体間の相変化モデルを導入した手法を開発しました。これをTF-MPS(Two Fluid MPS)法あるいは総称的にFLUIDLET法と呼んでいます。図1に示すように、従来の二相流の流動解析では対象領域をメッシュに分割します。流動様式を考慮しない均質流モデルでは、気液はならされて霧状になっています。流動様式などを構成式として導入すると、相が分離して流れるようすが計算結果として現れますが、メッシュ分割の制約

を受けた計算結果となります。これに対してTF-MPSではメッシュ分割は必要なく、気泡流、チャーン流、環状流と呼ばれる流動様式が自然に表現されます。

### 検証解析

ここでは、当社が開発したTF-MPSを用いた気液二相流の代表的な解析例について説明します。

#### 無重力状態における気泡の運動

賞雅(東京商船大)は、管内二相流において通常重力状態ではサドル型の径方向ボイド分布であったものが、微小重力状態に移行する過程で平坦化し、重力の回復とともにもとの分布に戻ることを実験で示しました<sup>(2)</sup>。これは気泡の運動メカニズムを明らかにした注目すべき成果でした。図2は、TF-MPSを用いた重力を変化させたときのボイド率分布の解析結果です。こ

れは実験の挙動の本質を再現しています。二相流に関する実験式は微小重力状態では適用できないので、TF-MPSは今世紀の宇宙開発において重要になると考えられます。

#### サブクール沸騰

Schrock & Grossmanは、管内で沸騰が生じる二相流において、管壁からの伝熱量と二相流動の関係を調べる実験を行いました。実験結果は、二相流を扱うときの代表的無次元数 Lockhart-Martinelliパラメータ $X_{tt}$ と Boiling数の関数(横軸)と、二相伝熱と単相伝熱の比(縦軸)について整理されています(図3)。実験結果の分布にTF-MPSによる計算結果も合わせて表示していますが、データのばらつき範囲である±35%区間に計算結果は納まっており、沸騰現象を精度良く表せています。沸騰により気泡が生成され

ようすを図4に示します。

#### 原子炉燃料集合体スペーサ近傍の流れ

沸騰水型原子炉燃料集合体では、燃料棒間の間隔を維持するスペーサが燃料棒の冷却特性に大きく影響することが知られています。燃料の改良にあたってはスペーサの影響を精度良く評価することが必要となり、従来は実験を行って調べていました。ここでは、TF-MPSでスペーサの影響を検討した例を示します。図5は、燃料棒表面近傍の液体粒子分布をスペーサの有無について比較したものです。ヒストグラムは時間平均された液体粒子数の分布を示しています。この解析結果はスペーサ部で燃料棒表面近傍の液膜が薄くなるという実験的知見と整合しており、スペーサの影響を評価できる可能性が示されました。

### 今後の展望

気液二相流の実験では、局所的な特性は現在も計測困難な状況にあります。ここで述べたTF-MPS法は、こうした特性を直接計算で評価し、設計などで用いられているサブチャンネル解析法などのマクロな手法で必要とされる構成式を作成する目的で開発してきました。今後は様々な分野への適用も図っていきます。

### 文献

- (1) Koshizuka, S., et al. A Particle Method for Incompressible Viscous Flow with Fluid Fragmentation, Comput. Fluid Dynamics J., 4, 1995, p.29-46.
- (2) Takamasa T.; Kondo, K. ANS Proc. National Heat Transf. Conf., 1994, p.187-190.

白川 典幸

電力・社会システム社  
電力・産業システム技術開発センター  
システム解析技術開発部主査