

審査の結果の要旨

氏名 許 渲

本論文はメッシュレス手法である MPS-MAFL 法による核沸騰と膜沸騰の数値シミュレーションについて記述したもので論文は5章より構成されている。

第1章は序論で、沸騰様式として核沸騰および膜沸騰があり、原子炉の除熱などにおいて工学的に幅広く利用されている伝熱形態であると述べられている。こうした沸騰を伴う気液二相流の解析には、従来より集中定数モデルが用いられてきたが、最近では実験相関式を必要とせず基礎方程式のみに基づいた機構論的な解析が試みられている。そして、気液界面の大変形に適用できるメッシュレス法がその有力な手法であるとしている。論文提出者が所属する研究室でこれまで研究されてきたメッシュレス法としてMPS法とMPS-MAFL法を紹介し、本研究の目的はMPS-MAFL法を用いて沸騰の機構論的な解析をおこなうことであるとしている。

第2章では本研究で用いられている数値解析手法についてまとめている。任意ラグランジュ・オイラー記述の熱流動の支配方程式、MPS法で用いる粒子計算モデル、および粒子の不均一配置に拡張したモデル、計算メッシュを用いない対流項離散化スキームであるMAFL法、その他沸騰の解析に必要な表面張力、相変化、密度比が大きい場合の圧力計算のアルゴリズム等である。このうち、膜沸騰の解析コードは論文提出者が新たに開発しており、その中で用いられている相変化モデルは独自に考案したとしている。

第3章は原子炉の反応度事故(RIA)などに見られる過渡時の核沸騰のMPS-MAFL法での解析について述べている。RIAでは急速な出力上昇による沸騰により負の反応度が投入されるが、従来の定常沸騰での相関式では評価することができず、高熱流束および高サブクール条件での過渡沸騰現象については解明されていないとしている。なお、核沸騰における単一気泡の成長と離脱は、YoonがMPS-MAFL法を用いて既に定量的解析に成功していることを述べている。この解析では蒸気内の温度分布を一様とし、蒸気流動の計算も必要ない。この成果を踏まえて、実験の条件での過渡沸騰の解析をおこなっている。熱流束が限界熱流束を超えているにもかかわらず、過渡的に気泡の成長と離脱が生じることが計算され、気泡の成長にかかる時間が模擬実験の結果と一致していると述べている。さらに、初期気泡核半径の影響を調べ、気泡の成長にかかる時間は初期気泡核半径にほとんど依存しないという結果を得ている。これは、過渡沸騰実験では多数の細かい気泡が発生することをよく説明するとしている。

第4章は大気圧下における水の膜沸騰を解析した成果である。従来の研究と

して、座標変換を用いた Son-Dhir の研究、および界面追跡法を用いた Juric-Tryggvason の研究を紹介し、大気圧下の水の膜沸騰は、気液の密度比が大きいだけでなく蒸気膜が非常に薄くなるため非常に難しい問題であり、まだシミュレーションされたことが無いとしている。膜沸騰では、蒸気膜の中の熱流動により沸騰熱伝達が支配されているため、新たに、蒸気の熱流動も解析する必要があり、新しい計算コードが開発された。大気圧下の水と蒸気では密度比が大きいいため、それぞれの相で別々に圧力場を解くアルゴリズムが導入されている。初期の蒸気膜に擾乱を与え、計算をおこなったところ、安定した蒸気膜が維持されることが示された。熱伝達量を Berenson の実験相関式と比較したところ、40-60%程度であり、過小評価となっている。

第5章は結論であり、メッシュレス法である MPS-MAFL 法を用いて、核沸騰と膜沸騰の機構論的な数値シミュレーションをおこなったとしている。核沸騰では RIA の条件で気泡の成長時間が定量的に予測できるとともに、小さな気泡が多数見られる理由を説明できたことが成果であると述べられている。膜沸騰では、大気圧下の水-蒸気系で安定した蒸気膜を計算することが初めてできたが、定量的な伝熱量については過小評価であることが述べられている。

以上を要するに本論文は MPS-MAFL 法を用いて沸騰の数値シミュレーションをおこない、過渡状態の核沸騰解析では気泡成長開始時間について実験と一致する結果を得るとともに、膜沸騰解析では実際の大気圧下の水の膜沸騰を初めて解析している。この成果はシステム量子工学、特に原子力熱流動工学に進展をもたらすのみならず、工学諸分野における沸騰伝熱の数値シミュレーションの進歩に貢献するところが少なくない。よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。