

合同セッション1（「原子炉における機構論的限界熱流束評価手法」研究専門委員会、
熱流動部会、計算科学技術部会）数値シミュレーションの現状と限界熱流束評価に向けた課題
Current status of Numerical Simulation and Issues for CHF Evaluation

沸騰現象の直接数値シミュレーションにおける現状と課題

Current Status and Issues for Direct Numerical Simulation of Boiling Phenomena

*小瀬 裕男¹¹大和システムエンジニア**1. はじめに**

近年、解析に用いる計算機の大規模化、数値解析技術の進展により、沸騰現象に対する詳細な解析が行われつつある。特に、最近では実験式や経験式を用いず、気液界面の微視的な構造を評価対象として、気液界面の動的な挙動や熱伝達を直接数値的に解析する、直接数値シミュレーション（DNS）が注目されてきている。本報告では、沸騰現象に対する DNS の現状について、その進展や最近の研究例を紹介するとともに、限界熱流束評価に向けて克服すべき技術的課題について議論する。

2. 沸騰現象の DNS に対する現状

沸騰現象の DNS では一般的な CFD と同様に、質量、運動量およびエネルギーの保存式を解く。くわえて、気液界面の微視的な挙動を表現するための気液界面モデリングや表面張力モデルといった計算モデル、さらには沸騰現象を模擬するために、相変化や気液界面における jump 条件、核生成、Micro-layer 蒸発などの物理モデルが必要となる。このように様々な素過程を必要とする沸騰現象の DNS が最初に報告されたのは、Lee ら[1]による移動格子を用いた研究例とされるが、当時の解析技術では気泡の変形や合体を再現することはできない。その後、VOF 法や level set 法などといった界面追跡法に代表される高精度な気液界面スキームの登場によって、気泡の大変形や気液間熱伝達を直接解くことが可能となり、たとえば Son らによる核沸騰中の単一気泡成長や離脱[2]、あるいは高熱流束下における核沸騰現象への適用[3]、さらに最近では Sato ら[4]による界面追跡法を用いた、核沸騰から膜沸騰に至る現象の3次元プール沸騰 DNS による研究例が報告されるなど、近年の DNS は飛躍的な技術的進展を遂げている（詳細なレビューに関しては[5]を参照）。ただし、その多くは飽和プール沸騰を対象としており、発生する気泡はせいぜい数個程度に限られている。実際の現象として想定されるサブクール状態の流動沸騰に適用した報告例は極めて少ないのが現状である。

3. 沸騰現象の DNS に対する課題

限界熱流束評価に向けて、DNS が有用な手段であることは間違いない。しかしながら、次に挙げるような克服すべき技術的課題が数多く残されていることも事実である。1) 現象のマルチスケール性：たとえば気泡の発泡まで想定すると、 μm から m （あるいは μs から s ）オーダーの空間（あるいは時間）スケールが要求されるため、フルスケールの DNS は現実的に困難、2) 核生成モデル：一般的には不均質核生成理論といわれるが、十分に確立されたモデルは存在しない、3) 発泡点密度のモデル化：発泡点密度を理論的に予測することは困難であり、何らかの経験式を導入するなどのモデル化が必要、4) その他：解析条件として仮定する初期熱流動場や伝熱面上の性状などは、評価結果に大きく影響するため、適切な条件設定が非常に重要である。実用的には解くべき問題やスケールに応じて最適な手法やモデルを組み合わせた DNS が必要と考えられる。

参考文献 [1] Lee et al., J. Heat Trans. 111 (1989), [2] Son et al., J. Heat Trans. 121 (1999), [3] Son et al., Int. J. Heat Mass Trans. 51 (2008), [4] Sato et al., Int. J. Heat Mass Trans. 125 (2018), [5] Kharangate et al., Int. J. Heat Mass Trans. 108 (2017)

*Yasuo Ose¹¹YSE