

6. 結言

過去にさまざまな工業・自然環境において蒸気爆発によるものと思われる事故・災害が発生しており、その発生条件や発生機構を明確にする必要がある。蒸気爆発は大きく4つの素過程に分類することが出来る。(i)高温融体と低沸点液体の接触、(ii)高温融体と低沸点液体の粗混合、(iii)蒸気膜の崩壊ならびに溶融液滴の微粒化、(iv)圧力波の伝播ならびに大規模爆発。この第3段階は蒸気爆発の発生を決定付ける段階であり、トリガリングと呼ばれている。本研究では、この蒸気爆発の発生を決定付けるトリガリング挙動に着目し、高温溶融液滴上の蒸気膜の崩壊挙動を実験的ならびに解析的に調べることにした。その結果、以下の知見を得た。

(1) 蒸気膜崩壊実験

初めに、蒸気膜が自発的に崩壊するときの挙動ならびに圧力波が到来したときの蒸気膜の崩壊挙動を実験的に調べることにした。高温溶融金属を模擬した高温の金属球上に蒸気膜を形成させ、蒸気膜を自発的に崩壊させる実験ならびに圧力パルスを用いて強制的に崩壊させる実験を行った。その結果、以下の知見を得た。

(a) 自発的な蒸気膜の崩壊実験

異なるサブクール条件で蒸気膜を自発的に崩壊させた場合、温度が急激に低下し始める時刻に低サブクール条件では蒸気泡の生成領域が鋼球の下部から上部へと伝播してゆく非一様性を持つ挙動が観測された。これに対し、高サブクール条件においては鋼球全体にわたって急激に蒸気泡が生成している一様性を持つ挙動が観測された。また、画像より膜厚を測定した結果、温度が急激に低下する以前では高サブクール条件における膜厚は低サブクール条件におけるものよりも薄いことが示された。温度が急激に低下し始めた時刻以降は高サブクール条件における膜厚が厚くなり、その大きさも振動的に増加することが示された。

(b) 強制的な蒸気膜の崩壊実験

異なるサブクール条件で圧力パルスを用いて蒸気膜を強制的に崩壊させた場合、どの条件においても圧力パルス到来時に蒸気膜全体が白く濁る白濁現象が観測され、圧力パルス通過後は鋼球表面上で一様に蒸気泡が生成している様子が観測された。また、膜厚を測定した結果、どの条件においても蒸気膜が白濁する時刻に蒸気膜厚さは最小となり圧力パルス通過後は急激に増加することが示された。

次に、圧力波到来時に起きている現象を解明するために界面温度ならびに気液界面の挙動を評価することとした。そのために熱伝導解析ならびにPIVを用いた解析を行った。その結果、圧力パルス到来以前では界面温度は飽和温度よりも高い状態であったが、圧力パルスが到来したときに、蒸気膜は白く濁り、飽和温度は界面温度以上に上昇した。圧力波通過後、飽和温度は再び界面温度以下に低下し、蒸気膜は急激に膨張し始めた。

このことより、圧力パルス到来時において気液界面近傍で凝縮が起きており、蒸気膜が白く濁る白濁現象は凝縮に起因する現象であるということが示唆された。すなわち、強制的な蒸気膜の崩壊挙動は周囲流体の流動より流体の相変化が支配的要因となる可能性が示された。

(2) 格子ガスオートマトン法の3次元15速度モデルの開発

本研究では蒸気膜の崩壊挙動を明らかにするために、格子ガスオートマトン法を用いて解析を行うこととした。しかしながら3次元的で複雑な挙動を示す蒸気膜の崩壊挙動は、従来の2次元モデルでは再現することが困難であることが考えられる。そこで新たに3次元15速度LGAモデル、3次元15速度ILGモデルならびに伝熱・相変化モデルを開発するとともに、これら開発したモデルの検証を行うために、3次元15速度ILGモデルを用いた二成分流体の分離計算、3次元15速度LGAモデルを用いた多孔質体内部の流動解析ならびに伝熱相変化モデルを用いた沸騰現象に関する解析を行うこととした。その結果、以下の知見を得た。

(a) 二成分流体の分離計算

初めに、よく混合した二成分流体の凝集・分離計算を行った。その結果、時間の経過とともに界面の大きさが減少してゆく様子が示され、同じ成分同士が凝集し、各成分に分離してゆく様子が示された。また、界面積の時間変化をLifshitz-Slyozovの理論と比較したところ、定性的に類似する傾向が見られた。

次に、計算領域内に配置する粒子の数密度を変化させた条件ならびに数密度を一定として計算領域内に配置する赤・青粒子の割合を変化させた条件で凝集・分離の計算を行った。その結果、これらの値を変化させることで界面形状の複雑さ、すなわち凝集・分離の度合いが変化することが示された。

これらの特性から、新たに開発した3次元15速度ILGモデルは、界面の変形を伴うような流体の挙動を再現するのに有効なツールとなりうることが示された。

(b) 多孔質体内部の流動解析

二成分流体の凝集・分離計算より得られた複雑形状を多孔質体とみなし、内部に流体を流したときの流動に関する解析を行った。その結果、多孔質体の入口、出口で圧力勾配を与えると、圧力勾配を与えた方向に流動が生じた。また、出口端において流速を測定した実験結果と計算結果を比較すると、定性的な一致が見られた。

次に、計算領域に配置する多孔質体の空隙率を変化させて計算を行い、解析より得られた結果と従来提唱されている多孔質体内部の摩擦損失係数を記述するErgunの式の比較を行った。その結果、両者は定性的な一致が見られ、またその値もほぼ同じとなることが示された。

以上の結果より、新たに開発した3次元15速度LGAモデルは、複雑流路内流動のような微意私的な流動を再現するのに有効なツールであることが示された。

(c) 沸騰現象に関する解析

高温の固体球を水中に投入した場合の沸騰現象に関する数値シミュレーションを行った。その結果、固体球周りを膜が覆う様子ならびに形成された膜が上方へ離脱してゆく様子を再現することが出来た。また、凝縮の効果を考慮することで沸騰の様相を変化させることが出来た。次に、固体球表面より放出される熱流束を用いて沸騰曲線との比較を行い、沸騰曲線と類似した変化を示していることが確認できた。

(3) 3次元格子ガスオートマトン法を用いた蒸気膜の崩壊挙動に関する解析

圧力パルスを用いて蒸気膜を強制的に崩壊させた場合の実験結果より、圧力パルス到来時に凝縮現象が起こっている可能性が示唆され、圧力パルスを用いて蒸気膜を強制的に崩壊させた場合の蒸気膜の崩

壊挙動は、流体の相変化が支配的であることが考えられた。そこで、この蒸気膜の崩壊挙動に対して支配的となる要因をより明確にするために、本研究で新たに開発した3次元、伝熱・相変化格子ガスオートマトン法を用いた数値シミュレーションを行うこととした。

(a) 流動のみを考慮した場合の蒸気膜の崩壊挙動に関する解析

流動のみを考慮した場合の蒸気膜の崩壊挙動に関する解析を行った。その結果、固体球上の膜は剥離する様子が示され、下流側へと伸長する様子が示された。この結果と実験結果との比較を行った結果、この解析結果は実験結果と定性的に異なることが示された。

(b) 流動ならびに壁伝熱を考慮した場合の蒸気膜の崩壊挙動に関する解析

流動ならびに壁伝熱を考慮した場合の蒸気膜の崩壊挙動に関する解析を行った。その結果、圧力パルスによる圧力の増大によって膜は収縮するものの、圧力パルス通過後に膨張する様子は見られなかった。実験結果との比較を行った結果、この解析結果は実験結果と定性的に異なることが示された。

(c) 流動、壁伝熱ならびに相変化を考慮した場合の蒸気膜の崩壊挙動に関する解析

流動、壁伝熱ならびに相変化を考慮した場合の蒸気膜の崩壊挙動に関する解析を行った。その結果、圧力パルスの到来とともに膜は収縮し、圧力パルス通過後は膜が膨張する様子が示された。実験結果との比較を行った結果、この解析結果は実験結果と定性的に類似することが示された。

以上の数値シミュレーションの結果より、流動のみを考慮した場合には実験結果と定性的に異なったが、流動ならびに相変化を考慮した場合には実験結果と類似することが示された。

本研究で得られた実験結果ならびに格子ガスオートマトン法を用いた解析結果を総合すると、圧力パルスを用いて蒸気膜を強制的に崩壊させた場合の蒸気膜の崩壊挙動は周囲流体の流動より流体の相変化が支配的となる可能性が示された。