610 高温球表面上の蒸気膜崩壊の微視的挙動に関する研究

Study of Micro-Mechanism of Vapor Film Collapse on the High Temperature Sphere Surface

正 阿部豊 (筑波大) ○学 柳田洋志 (山形大)
正 成合英樹 (筑波大) 正 八木田幹 (山形大)

Yutaka ABE, University of Tsukuba, Ten-noudai 1-1-1, Tsukuba-shi, Ibaraki
Hiroshi YANAGIDA, Yamagata University, Jounan 4-3-16, Yonezawa-shi, Ymagata
Hideki NARIAI, University of Tsukuba, Ten-noudai 1-1-1, Tsukuba-shi, Ibaraki
Miki YAGITA, Yamagata University, Jounan 4-3-16, Yonezawa-shi, Ymagata

Keywords : Vapor Explosion, Thermal Detonation Model, Micro-mechanism, Vapor Film Collapse

1、緒言

蒸気爆発現象を記述するモデルのひとつとして熱的デトネーションモデルが提唱されている。このモデルにおいては、熔融液滴が蒸気膜に覆われ液-液接触が起こっていない粗混合状態において、熔融液滴周辺に形成される蒸気膜の内的あるいは外的な要因による自発崩壊、あるいは外部からの圧力波の伝播による強制的な蒸気膜の崩壊が蒸気爆発発生要因であるとされている。

報告では、蒸気爆発のトリガ条件とされる膜崩壊の挙動を調べることを目的に、熔融液滴を模擬した高温鋼球表面上に形成させた蒸気膜の自発的な崩壊ならびに圧力波による強制的な崩壊の微視的挙動を実験的に結果について報告する。

2、実験装置・実験方法

図1に実験装置を示す。直径 15mm の鋼球が、表面温度を計測するためのシース熱電対によって吊り下げられている。鋼球の真横に設置された圧力計により鋼球の周囲圧力が計測される。更に高速度ビデオカメラによって蒸気膜崩壊の様子を観察する。強制的な膜崩壊を調べるための圧力波発生装置は、窒素ガスで駆動する弾丸をテスト部下部のピストンに衝突させることにより圧力波を発生させる仕組みになっている。

図2に実験方法を示す。まず、自発的に蒸気膜を崩壊させる実験を行う場合は、(a)鋼球をガスバーナーで設定温度まで熱し、(b)加熱を止め、テスト部水温を設定温度に保ったテスト部水中へ鋼球を挿入して蒸気膜を形成させ、その状態から蒸気膜が自発的に崩壊する様子を観察した。次に、圧力波を当てて強制的に蒸気膜を崩壊させる実験を行う場合は、(a),(b)までは自発的崩壊の実験と同じ手順で行い、鋼球表面温度が設定値に達した時、(c)圧力波発生装置により発生させた圧力波を蒸気膜に当てて蒸気膜を強制的に崩壊させた。実験において、蒸気膜崩壊の微視的挙動を、高速度ビデオカメラで撮

影すると同時に、テスト部中央での圧力と鋼球表面温度を同時に計測した。

3、実験結果

3-1 強制崩壊実験

図3は圧力波による強制的な蒸気膜崩壊実験の結果である。初期鋼球表面温度は約 900°C、低温液のサブクールは約 20°C の場合であり、画像は 4,500fps で撮影したものである。

Fig.1 Schematic Diagram of Experimental Procedure

Fig.2 Experimental Procedure

圧力波の到達以前($t=-1.1\text{ms}$)において、鋼球表面上に鮮明で滑らかな蒸気膜が観察されているが、圧力波が到達した時刻 $t=0.0\text{ms}$ において、膜厚がいったん減少し蒸気膜が白く濁る現象が観察された。また、上のグラフより圧力波の到達と同時に鋼球表面温度が低下していることがわかる。圧力波通過後は、鋼球表面温度が徐々に上昇し、鋼球表面全体で激しい蒸気の生成が観察された。

3-2 自発崩壊実験

図4は、入水時の鋼球表面温度と低温液のサブクールが及ぼす沸騰モードの違いを示している。入水時に低温液中で鋼球表面に沸騰膜が形成されたときを「Film boiling」、蒸気膜が形成されなかったときを「Nucleate boiling」とした。この図より、鋼球表面温度が高くサブクールが低い方が鋼球表面上に膜沸騰になりやすく、鋼球表面温度が低くサブクールが高い方が膜沸騰になりにくい傾向があることがわかる。

図5は、自発的な蒸気膜崩壊実験の結果の一例である。入水時の鋼球表面温度は約 600°C 、低温液のサブクールが約 20°C の場合であり、画像は $4,500\text{fps}$ で撮影したものである。

可視観測結果より、初め鋼球表面は図3と同様鮮明で滑らかな蒸気膜に覆われていたが、時刻 A($t=0.25\text{s}$)において鋼球下部において蒸気膜の不安定が見られ始めるとともに、鋼球表面温度の降下が計測された。鋼球下部より発生した蒸気膜の不安定は、時間の経過とともに上方へ伝播し、やがて鋼球表面全体が核沸騰領域で覆われる様子が観察された。このとき圧力に変化は見られなかった。

自発的な膜崩壊が伝播する時間は、図3の強制的な膜崩壊と比較して、約3桁程度の大きな時間間隔となっていた。

4、結言

高温鋼球表面上に形成された蒸気膜の自発的および圧力波による強制的な微視的崩壊挙動を実験的に調べることにより、以下のことを確認した。

- 1、圧力波による強制的な蒸気膜の崩壊の場合、圧力波の到達と同時に蒸気膜厚がいったん減少し、圧力波の通過後激しい蒸気の生成が観察された。
- 2、自発的な蒸気膜の崩壊の場合、鋼球下部から発生した蒸気膜の不安定が上方へ伝播する様子が観察された。このとき、鋼球周辺で圧力の変動は計測されなかった。

Fig.3 Experimental Result for Forced Collapse Experiment

Fig4 Difference of Boiling Mode

Fig.5 Experimental Result for Self Collapse Experiment