高温粒子表面上の蒸気膜崩壊に関する研究*

(第2報, 微視的崩壊挙動に及ぼすサブクーリングの影響)

阿 部 豊^{*1}, 枋 尾 大 輔^{*2}

Study on Vapor Film Collapse Behavior on High Temperature Particle Surface

(2nd Report, Effect of Subcooling on Micro-Mechanism)

Yutaka ABE^{*3} and Daisuke TOCHIO^{*3} Yamagata University, Dept. Mechanical Systems Engineering,
4-3-16 Jonan, Yonezawa, Yamagata, 992-8510 Japan

Thermal detonation model is proposed to describe vapor explosion. According to this model, vapor film on pre-mixed high temperature droplet surface should be collapsed for the trigger of the vapor explosion. It is pointed out that the vapor film collapse behavior is significantly affected by the subcooling of low temperature liquid. However, the effect of subcooling on micro-mechanism of vapor film collapse behavior is not experimentally well identified. The objective of the present research is to experimentally investigate the effect of subcooling on micro-mechanism of film boiling collapse behavior. As the results, it is experimentally clarified that the vapor film collapse behavior in low subcool condition is qualitatively different from the vapor film collapse behavior in high subcool condition. In high subcool condition, instability of the vapor film dominates the vapor film collapse on the particle surface. On the other hand, micro-mechanism at the interface between vapor and liquid such as micro-jet is dominant in low subcool condition in case of vapor film collapse by pressure pulse.

Key Words: Vapor Explosion, Thermal Detonation Model, Film Boiling, Subcooling, Micro-Mechanism

1. 緒 言

これまで様々な工業分野において蒸気爆発によるものと思われる大規模事故が発生してきている。また、原子力プラントの苛酷事故においても大規模な蒸気爆発が起こる可能性が指摘されている。これらの事故の発生を未然に防止するとともに万一事故が発生した場合にその被害を最小限に止めるためには、蒸気爆発の発生条件を明確にするとともにその定量評価を可能とすることが重要である。

現在、蒸気爆発を記述するモデルの1つとして、図1に示す熱的デトネーションモデル⁽¹⁾が提唱されている。熱的デトネーションモデルとは、図1(b)に示す高温物質の液滴が低沸点液体から蒸気膜で隔離されて分散混合している「粗混合」の段階、図1(c)に示す低沸点液体中に粗混合している高温液滴周りの蒸気膜が崩壊する「トリガ」の段階、図1(d)に示すひとたび蒸気膜が崩壊することによって発生する微粒化を伴う急速伝熱の開始とその伝播の段階、の各

Fig.1 Schematics of thermal detonation model

段階を経て大規模蒸気爆発に至るとするものである。

一方、多くの熔融液滴を用いた実験において、蒸気爆発は、低温沸点液体のサブクーリングが大きい条件でのみ発生し、サブクーリングが小さく飽和温度に近い時には、ほとんど発生していないことが報告されている⁽²⁾。その原因については、蒸気爆発の「トリガ」が高温熔融液滴まわりの蒸気膜の崩壊によって開始することから、高サブクーリング条件における高温液滴上の蒸気膜は不安定で自発的に崩壊する可能性が高くなる一方、低サブクーリング条件または飽和条件における蒸気膜崩壊の確率がそれほど高くなるためと考えられている。このような考え方を裏付けるためには、異なる低沸点液体のサブクーリング条件において、蒸気膜崩壊がどのように発生しているかを、微視的観点から詳細に捉えることが必要不可欠である。

* 原稿受付 1999年6月30日。

^{*1} 正員, 山形大学工学部(〒992-8510 米沢市城南4-3-16)。

^{*2} 学生員, 山形大学大学院。

E-mail: yutaka@mabeken3.yz.yamagata-u.ac.jp

高温物体表面上における蒸気膜崩壊に関しては多くの実験的研究がなされている⁽³⁾⁻⁽⁸⁾。これらの研究の多くは、溶融液滴を用いているため蒸気爆発に続いて微粒化が発生していたり、固体物質を用いた実験でも円筒形状または平板形状であったりして、球体系においてサブクールの異なる条件における蒸気膜崩壊の微視的挙動を観察・測定した実験はほとんどみられない。

本研究においては、高温鋼球の周りに形成した蒸気膜が、異なるサブクール条件においてどのように崩壊するかについての微視的挙動を高速ビデオカメラを用いて詳細に可視観察するとともに、鋼球表面温度や周囲圧力を高速同時計測した。蒸気膜の崩壊については、外部から加えた圧力パルスによる強制崩壊実験ならびに自発的に崩壊する様子を観察する自発崩壊実験の2種類を行った。それぞれの実験に対して、異なるサブクール条件における実験結果を比較・検討することによって、微視的蒸気膜崩壊挙動へ及ぼすサブクール条件の影響を明らかにすることとした。

2. 実験

2・1 実験手順 本研究では、ステンレス鋼球表面上における蒸気膜の崩壊挙動を実験的に調べた。図2にその実験手順の概要を示す。図2(A)に示すようにバーナーで加熱したステンレス鋼球を、図2(B)に示すように3つの側面に観測窓が設置されているステンレス製の角型容器内の水中に挿入する。ステンレス鋼球は、図3に示すようにシース熱電対によって支持されているが、シース熱電対は、蒸気膜に影響を与えない鋼球頂部上方10mmの位置まで外径0.8mm内径0.55mmのステンレスチューブを通して固定されており、横振れ等がないような構造となっている。水温は広範囲にわたって変化できるようになっている。実験は、図2(B)のまま放置し、蒸気膜が自発的に崩壊する様子を観察する自発崩壊実験、ならびに図2(C)に示すようにテスト部下部に設置されたピストンを弾丸によって駆動させることで発生させた圧力パルスを当てて蒸気膜を強制的に崩壊させる強制崩壊実験の2種類の実験を行った。

Fig.2 Schematics of experimental procedure

2・2 実験装置 図4に実験装置の概要図を示す。テスト部は内側一辺の長さが54mm、肉厚3mm、高さ316mmのステンレス鋼の角パイプで構成されている。テスト部中央の3面には40mm四方のポリカーボネートの板が取

り付けられている。残る一面には、圧力測定用および高速ビデオカメラへのトリガ信号用のひずみゲージ式圧力トランスデューサーが取り付けられている。テスト部中央から上方30mmの位置に水温測定用のシース熱電対が取り付けられている。圧力パルス発生装置はテスト部の底に位置している。窒素ガスによって駆動された弾丸をピストンに当てることによって圧力パルスを発生させている。

Fig.3 Configuration of test particle

Fig.4 Schematic diagram of experimental apparatus

2・3 計測ならびにデータ処理 本実験では、蒸気膜の可視観測データ、鋼球表面温度の時間変化、鋼球周りの圧力の時間変化を同時測定している。蒸気膜の崩壊挙動の観測は、最大撮影速度40,500fpsの高速ビデオカメラを用いて行っている。鋼球表面温度の時間的変化は、図3に示すように、高速応答を得るために先端を剥き出しにして鋼球表面と面一となるよう埋め込んだクロメル-アルメル熱電対を用いて測定している。鋼球周りの圧力の時間変化は半導体式圧力トランスデューサーを用いて測定している。更に、蒸気膜の可視観測データを画像処理することによって、蒸気膜の厚さの平均値を評価した。また、鋼球表面温度の時間変化の測定値を境界条件として熱伝導方程式を解くことにより、鋼球表面での熱流束を評価した。

3. 実験結果

3・1 強制的崩壊実験 図5に強制崩壊実験を行った時の圧力と鋼球表面温度の時間変化ならびにその時の可視観測結果を示す。図5上図の縦軸は圧力と鋼球表面温度、横軸は時間を示している。図5上図中の時刻AからFは下図の画像のAからFに対応している。圧力パルスが到達する以前の時刻Aにおいては、鋼球表面温度にも変化がなく、鮮明で滑らかな蒸気膜が観測されている。圧力パルスが到

達し、圧力が最大値となっている時刻 B においては、温度の低下とともに鋼球表面上の蒸気膜に白濁現象が観測された。圧力パルスが通過した後の時刻 C においては、蒸気膜の表面から周囲流体へ向って微小な気泡の生成が開始している。時刻 D 以降においては爆発的な蒸気生成が鋼球全表

Fig.5 Experimental results of surface temperature, pressure and visual picture in forced collapse experiment

面にわたって発生していることが確認できる。

図 6 に、圧力パルスの到達した時刻近傍での強制崩壊実験の観測結果を異なるサブクール条件に対して示したものである。この図 6 では、圧力パルスが到達し白濁が開始した時刻を 0 ms としている。図 6 の画像は、それぞれサブクール温度 8.3 °C, 18.0 °C, 24.7 °C の条件に対して、4,500 fps の撮影速度で撮影されている。いずれの条件においても、圧力パルスが到達する以前においては鮮明で滑らかな蒸気膜が観測されており、時間 0 ms においては蒸気膜に白濁現象が観測されている。しかしながら、圧力波到達時以降の 1 ms 付近までを比較すると、低サブクール条件においては、鋼球表面にわたってほぼ均一な蒸気生成が観測された一方、高サブクール条件においては、鋼球表面に不均質な筋状の蒸気泡の濃淡部が見られた。このような不均質な筋状の蒸気泡の濃淡部は、サブクール 18.0 °C の場合より 24.7 °C の場合においてより明瞭に観測できる。

図 7, 8, 9 は、初期鋼球表面温度約 700 °C に対して、低沸点液体のサブクールをそれぞれ 12.4 °C, 18.9 °C, 26.7 °C として行った実験結果である。蒸気爆発のトリガーとして重要となる蒸気膜崩壊直後の現象に注目し、圧力パルス到着前後の 1.5 ms 間という極めて短い時間での圧力と鋼球表面温度の測定結果を画像データとともに示している。これらの画像は、40,500 fps の撮影速度で撮影した。この可視観測結果を画像解析することによって評価した蒸気部分の平均厚さの評価結果も合わせて示している。ここで、時刻 (A) 以前において評価された蒸気膜厚さは安定に存在する蒸気膜の厚さを示すものであるが、時刻 (D) 以降において評価された蒸気膜厚さとは、厳密には、「蒸気膜の厚さ」ではなく「発生した蒸気と静止液体の界面位置の平均厚さ」を示していることに注意する必要がある。

Fig.6 Observation results in forced collapse experiments (unit: ms)

Fig.7 Surface temperature, pressure and film thickness in forced collapse experiments (Subcooling=12.4°C)

Fig.8 Surface temperature, pressure and film thickness in forced collapse experiments (Subcooling=18.9°C)

Fig.9 Surface temperature, pressure and film thickness in forced collapse experiments (Subcooling=26.7°C)

いずれのサブクール条件においても、圧力パルス到達以前において、蒸気膜の平均厚さはほぼ一定であり、圧力パルス到達とほぼ同時に鋼球表面温度が降下した。そして温度降下開始とほぼ同時に蒸気膜の平均厚さが減少し始めている。圧力パルスのピークが到達した時刻において、蒸気膜厚さは最小の値に到達している。この蒸気膜厚さが最小となる時刻において、画像データより蒸気膜表面に白濁現象が観察された。蒸気膜表面に白濁が観測されて蒸気膜厚さが最小と評価された時刻の後、爆発的な蒸気泡の生成が

発生している。

図 10 は、平均蒸気膜厚さとして評価された値を、それぞれのサブクール条件毎にまとめて比較したものである。図 10 においては圧力パルス到達時刻を時刻 0 ms としている。圧力パルス到達前の時刻 0 ms 以前においては、鮮明で平滑な蒸気膜が安定に形成されており、その蒸気膜厚さの評価値は、サブクールが小さい程厚くサブクールが大きくなるほど薄くなる傾向となっていた。更にサブクールが小さく 5°C 程度の条件においては、0.3mm を越える蒸気膜厚さが計

測されていた。蒸気膜に白濁現象が発生していた時刻 0 ms 付近において、蒸気膜の厚さは最小値となっており、その後急速に増加する結果となっている。この時刻 0 ms 以降において、サブクール条件の違いはほとんど見られなかった。図 11 には、測定された鋼球表面温度を境界条件として熱伝導方程式を解いて算出した熱流束を、蒸気膜厚さに対して示す。図 11 中の点 A から F は図 9 中の記号 A から F に対応している。始め熱流束は、蒸気膜厚さの減少と共に急激に増加し、最大値となった後、膜厚の増加と共に漸減している。熱流束の最大値は、プール沸騰の限界熱流束より高く 60 MW/m^2 程度の値となっている。白金細線上の蒸気膜を圧力パルスによって崩壊させた井上らの実験⁽⁵⁾においても 10 MW/m^2 程度の熱流束が計測されており、このように短い時間の瞬間的な高い熱流束の発生は、蒸気膜崩壊に共通の現象と推定される。図 10 より、一旦蒸気膜が崩壊し爆発的な蒸気泡生成が発生した後の気液界面位置の時間変化を求めると、おおよそ 0.25 m/s と評価される。このような気液の界面位置変化が、相変化のみによって達成されるために必要となる熱流束は約 540 MW/m^2 と評価される。この値は、図 11 の値よりはるかに大きな値である。このことは、図 10 に示した値が、蒸気膜崩壊後においては気泡発生によって移動した界面位置の平均値を示しており、この界面位置の内側に液相が残留していることを示唆するものである。

Fig.10 Time variation of film thickness in forced collapse experiment

Fig.11 Relationship between film thickness and heat flux

3・2 自発的崩壊実験 図 12 は、鋼球表面上の膜沸騰に圧力パルスなどの外的強制力を働かせず自発的に崩壊させたときの鋼球表面温度の測定結果を、画像とともに示

したものである。水のサブクール温度を約 8°C とし、初期鋼球表面温度をそれぞれ約 500°C 、 600°C 、 700°C に昇温した後、水中に挿入し膜沸騰を形成させている。膜沸騰期間中の温度勾配は、初期鋼球表面温度に関わらずほぼ同一であった。また、明瞭なクエンチを確認することもできた。そのクエンチ温度は初期鋼球表面温度に関わらずほぼ同程度の値であった。図 12 の上図中の点 A から F は、下図の画像の A から F に対応している。図 12 下図の画像は、低サブクール条件の実験であったため膜沸騰が自発的に崩壊するのに時間を要したことから 30 fps の遅い撮影速度で撮影している。画像 A から C においては、蒸気泡の離脱時を除いて鮮明で滑らかな蒸気膜が安定に存在していた。これに対して、クエンチが始まっている画像 D 以降では、蒸気膜の不安定が始まっていることが確認できる。

Fig.12 Surface temperature in self collapse experiment

図 13 に、自発的崩壊実験において撮影したクエンチ時刻近傍における鋼球表面での蒸気膜崩壊挙動の画像を示す。初期鋼球表面温度は約 700°C であり、サブクール温度はそれぞれ 10.0°C 、 17.2°C 、 24.2°C に設定している。図 13 では、クエンチ点を 0 ms として、750 fps の撮影速度で撮影した。0 ms において、いずれのサブクール条件においても蒸気膜は鮮明で滑らかであることが確認できた。しかしながら、時刻 1.33 ms 以降においては、サブクール条件の違いによって、明らかに気液界面の変動に違いが見られた。サブクールが小さく 10.0°C である場合には、時刻 1.33 ms

において鋼球下部に発生した微小気泡の領域が、比較的整然と整列しつつ下方から上方へゆるやかに伝播している様子が確認できる。時刻 5.33ms においても、気泡の発生領域は鋼球上部にまで到達していなかった。また、気泡を発生していない鋼球上方の領域に界面波の発生を確認することもできる。サブクールが 17.2℃ においては、やはり気液界面の変動が、鋼球下部から上方へ伝播する様子が観測できたが、気泡発生はサブクールが 10.0℃ の場合に比べて、より大きな気泡がより激しく発生していることが確認できた。サブクールがさらに高く 24.2℃ の条件においては、時刻 1.33ms において、すでに発生気泡は鋼球表面全体をほぼ均一におおっており、本実験における撮影速度では、蒸気発生非均一性を確認することはできなかった。また、発生気泡と液相界面の位置が、時刻 1.33ms および 4.00ms 付近では鋼球に近く、時刻 2.67ms および 5.33ms 付近では鋼球から離れているというように、時刻毎に間欠的に変化している様子も観測することができた。これは、サブクールが高いことによる凝縮量の増大によって、蒸発-凝縮振動が発生していたためと推定される。

図 14 には、図 13 に示した可視観測結果を画像処理することによって評価した気液界面位置の平均値を示したものである。図 14 においては、クエンチ点を時刻 0ms としている。時刻 0ms 以前は、鋼球表面には鮮明で滑らかな蒸気膜が安定に存在しており、図 14 に示した値は蒸気膜の平均厚さを示している。このとき、低サブクール条件における蒸気膜の厚さに比較して、高サブクール条件における蒸気膜の厚さがより薄くなっている。一方、クエンチ後の 0ms 以降では、蒸気膜が崩壊し気泡生成が開始しているものと判定できることから、図 14 に示した値は気液界面位置の平均値を示しているものと理解できる。このとき、低サブク

ール条件における気液界面位置の増加に比較して、高サブクール条件における気液界面位置の増加が大きくなっていた。さらに、サブクールが最も大きい 24.2℃ の条件においては、その大きさが振動的に変化していることが確認できた。このことは、図 13 に示したサブクールが 24.2℃ の条件において、気液界面が間欠的に振動していた事実に対応している。

図 15 に、自発的崩壊実験における膜厚と熱流束の関係を示す。結果は大きく変動しているが、おおよその傾向として蒸気膜界面位置の増大とともに熱流束が増加していることが確認できる。この傾向は図 11 に示した強制崩壊実験における結果と明確に異なるものとなっており、圧力パルスによる強制崩壊と自発的崩壊挙動が異なることを示唆するものと考えられる。

蒸気膜の自発的崩壊において、サブクールが小さい場合に蒸気膜崩壊がゆるやかにより長い時間にかけて発生するのに対して、サブクールが大きい場合にはより短い時間に鋼球表面全体に均一に激しく蒸気生成が発生するという事実は、溶液液滴を用いた実験において、蒸気爆発が低沸点液体のサブクールが大きい条件でのみ発生し、サブクールが小さく飽和温度に近い時にはほとんど発生していない、という事実と整合する結果であると考えられる。すなわち、蒸気爆発の開始条件となる高温溶液液滴まわりの蒸気膜崩壊が、高サブクール条件においてはより短時間に粒子全体に均一に発生するのに対して、低サブクール条件においては比較的ゆるやかに進行することから、低サブクール条件では蒸気膜崩壊が蒸気爆発のトリガー条件として働く確率がより低くなっていることが本実験における微視的観点からの可視観測によって明らかにされたものとする。

Fig.13 Observation results in self collapse experiments (unit: ms)

Fig.14 Time variation of film thickness in self collapse experiment

Fig.15 Relationship between film thickness and heat flux

4. 結 言

強制的および自発的な蒸気膜の崩壊挙動を、異なるサブクール条件において可視観測した。その結果、以下の事実を明らかにした。

- (1) 強制的崩壊実験においては、圧力パルスの到達と同時に蒸気膜表面に白濁が発生し、そのとき膜厚は最小値となった。その後、爆発的な蒸気生成が発生していたが、低サブクール条件においては鋼球表面全体にわたって均質な蒸気生成が発生していたのに対して、高サブクール条件においては気液界面に不均質な蒸気生成が観測された。
- (2) 一方、自発的崩壊実験においては、クエンチより後の気液界面の変動は、低サブクール条件においては鋼球の底部から上端に向かってゆやかに不均質に伝播していたのに対して、高サブクール条件においては高速で均質な蒸気の生成が鋼球全体にわたって発生していた。
- (3) 更に、蒸気膜の自発的崩壊において、サブクールが小さい場合に蒸気膜崩壊がゆやかにより長い時間にかけて発生するのに対して、サブクールが大きい場合

にはより短い時間に鋼球表面全体に均一に激しく蒸気生成が発生していた。

- (4) これらの事実は、熔融液滴を用いた実験において、蒸気爆発が低温沸点液体のサブクールが大きい条件でのみ発生し、サブクールが小さく飽和温度に近い時にはほとんど発生していない、という事実と整合する結果であると考えられる。
- (5) すなわち、蒸気爆発の開始条件となる高温熔融液滴まわりの蒸気膜崩壊が、高サブクール条件においてはより短時間に粒子全体に均一に発生するのに対して、低サブクール条件においては比較的ゆるやかに進行することから、低サブクール条件では、蒸気膜崩壊が蒸気爆発のトリガー条件として働く確率が低くなるものと考えられる。

謝 辞

本研究の遂行に当たっては、八木理公（日本原子力研究所）、小林朋能（三菱化工機㈱）、出口幹（曙ブレーキ㈱）、柳田洋志（山形大学院）の各氏にご協力いただきました。また、本研究は、日本原子力研究所基礎研究推進制度(JANP)の援助を受けて実施しました。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- (1) Board, S.J., Hall, R.W. and Hall, R.S., "Detonation of Fuel Coolant Explosions", Nature, Vol.254, (1975), pp.319-325.
- (2) Matsumura, K. and Nariai, H., "Self-Triggering Mechanism of Vapor Explosions for a Molten Tin and water System", J. Nucl. Sci. Thech., 33(4), (1996), pp.298-306.
- (3) Nelson, L.S. and Duda, P.M., "Steam Explosion Experiments with Single Drops of Iron Oxide with CO₂ Laser", High Temperature-High Pressure, Vol.14, (1982), pp.259-281.
- (4) Plesset, M.S. and Chapman, R.E., "Collapse of an Initially Spherical Vapor Cavity in the Neighborhood of the Solid Boundary", J. Fluid Mech, Vol.47(283), (1971)
- (5) Inoue, A. and Bankoff, S.G., "Destabilization of Film Boiling due to Arrival of a Pressure", Trans. ASME, J. Heat Trans., Vol.103, (1981), pp.459-471.
- (6) 西尾茂文、上村光宏、"サブクール沸騰における膜沸騰熱伝達と極小熱流束条件に関する研究"、日本機化学会論文集 B 編、52-476, (1986), pp.1811-1816.
- (7) 庄司正弘ほか 3 名、"急激な温度こう配をつけた水中で生じる小規模蒸気爆発の研究"、日本機化学会論文集 B 編、52-479, (1986), pp.2633-2639.
- (8) 飯田ほか 2 名、"高温液小滴と低沸点液による蒸気爆発の機構に関する研究"、日本機化学会論文集 B 編、53-485, (1987), pp.222-230.