圧力波付加時の膜沸騰蒸気膜の不安定挙動および 蒸気膜内圧力変動の測定と解析*

高島 武雄^{*1}, 飯田 嘉宏^{*2}

Destabilization of Film Boiling and Pressure Change in Vapor Film When an External Pressure Wave is Supplied

Takeo TAKASHIMA^{*3} and Yoshihiro IIDA^{*3} Oyama National College of Technology, Dept. of Mechanical Engineering,
Nakakuki 771, Oyama, Tochigi, 323-0806 Japan

Destabilization process of the vapor film formed around a hemispherical heated surface made of copper or stainless steel rod of 30 mm in diameter and immersed in R 113 is investigated experimentally. The vapor film is destabilized by an external pressure wave, which is produced by a magnetic hammer, and the configuration is taken photographs. The pressure change in the vapor film when the external pressure wave is supplied is measured by a small pressure transducer set at the stagnation point of the copper rod. The induced pressure change in the film is analyzed theoretically and is shown to be in good agreement with measured data. A sharp pressure pulse, which has a higher peak value than that of supplied external wave, is confirmed to generate in the vapor film. The maximum pressure in the vapor film is in proportion to 1.6 power of that of the external pressure wave.

Key Words: Thermal Engineering, Vapor Explosion, Phase Change, Film Boiling, Pressure Wave, Vapor Film

1. はじめに

蒸気爆発は高温液滴周囲の膜沸騰蒸気膜が自発的作用, または圧力波などの外部からの作用によって破壊して開始する。これまで膜沸騰の崩壊過程は, クエンチや蒸気爆発の発生メカニズムに関連して研究が行われている。Naylor ら⁽¹⁾ は膜沸騰状態の伝熱体に外部から圧力波を加え, 蒸気膜が外部圧力波によって破壊されることを示した。しかし, 崩壊に至る不安定過程を詳細に観察していないので不明な点が多い。

蒸気爆発の開始時に, 高温液周囲の蒸気膜が自発的に崩壊また破壊されるときには, 蒸気膜内圧力が高められ, 高温液の細粒化を引き起こしうるといふ計算が, Inoue ら⁽²⁾, 庄司ら⁽³⁾ によって行われている。実験的には, Tso ら⁽⁴⁾ が球形の伝熱体に圧力センサを取付けて, 自発的なクエンチの際に, 膜沸騰から核沸騰に移移する過程の圧力変動を測定しているが, 大きい圧力値の発生や鋭い圧力パルスの発生は観察されてい

い。

一方, 著者らは, すず液滴-水系⁽⁵⁾ の自発的な蒸気爆発と, LiNO₃-エタノール系⁽⁶⁾ での外部圧力波によって起こる蒸気爆発の蒸気膜崩壊過程を観察して, それぞれの様相の相違の詳細を明らかにした。前者の実験からは, 自発的な蒸気膜崩壊過程は, ディスク状に変形した液滴の一端から開始することなどを示し, 後者の実験からは, 圧力波の到来から蒸気膜の崩壊までに, 約 1 ms 要することなどを明らかにした。

本研究の目的は 3 点ある。第 1 は, 固体伝熱面に外部圧力波を加えて膜沸騰の不安定挙動の観察を行うことで, 蒸気爆発時の蒸気膜崩壊過程を理解する。第 2 は, 伝熱体のよどみ点に圧力センサを取付けて蒸気膜内の圧力変動を測定し, 高温液の細粒化を引き起こしうる高い圧力パルスが発生するかどうかを実験的に明らかにすることである。そして第 3 は, 蒸気膜内圧力の解析を行い測定値と比較し, 高い圧力パルスの発生メカニズムを明らかにすることである。

記号

 h : 熱伝達率 $W/(m^2 \cdot K)$ h_{fg} : 蒸発潜熱 J/kg k : 熱伝導率 $W/(m \cdot K)$

* 原稿受付 1999 年 7 月 21 日。

^{*1} 正員, 小山工業高等専門学校 (☎ 323-0806 小山市大字中久喜 771)。^{*2} 正員, 横浜国立大学工学部 (☎ 240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)。

E-mail: takasima@oyama-ct.ac.jp

- m : 質量 kg
 ΔP : 圧力差 Pa
 R : 伝熱面半径 m
 s : 伝熱面と圧力センサまでの距離 mm
 T : 温度 K
 t : 時間 s
 δ : 蒸気膜厚さ m
 ρ : 密度 kg/m^3
 τ : 加える圧力波の周期の半分 ms
 添字
 l : 液体
 max: 最大値
 v : 蒸気膜
 w : 伝熱面
 s : 飽和

2. 実験装置と方法

図1は実験装置の概略図である。直径30mmの銅およびステンレス鋼(SUS304)製の半球状伝熱面1を、埋設したカートリッジヒータ9で加熱し、所定の温度にした後、フロン113(R113)液面を上昇させて膜沸騰を実現する。ガラス円筒容器15内のR113の温度は、屈折補正を兼ねた矩形の亚克力容器16に、一定温度の水を循環させて制御する。

外部圧力波は、アルミニウム製の底部17をマグネ

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

チックハンマ18で強打して加える。外部圧力波の強さは、ハンマへの供給電圧の高さによって変えた。膜沸騰時の伝熱面温度は、表面近傍に設置した直径1mmのシース熱電対6で、R113の温度も液中に入れた熱電対6とレコーダ8で測定した。圧力波は、ヒータへの電力を供給した状態で加えた。よどみ点の蒸気膜内圧力変動 ΔP_v とR113液中の圧力変動 ΔP_l は、それぞれ圧力センサ2と3、アンプ4、デジタルオシロスコープ5で測定する。現象は35mmカメラ11とストロボ12、リターダ14を用いて観察する。

図2に試験用伝熱体の詳細を示した。下方の半球部が液体につけられて伝熱面となる。図2(a)は圧力センサを取付けたもの、(b)は設置していないもので、中心部には熱電対を設置してある。最小膜沸騰温度の測定と現象の撮影には、図2(b)の形状の銅製試験部を用いた。

また、伝熱面先端から圧力センサの感圧面までの距離 s は、テフロンパッキンの厚さを変えることによって変化させて、圧力センサの取付位置が ΔP_v に及ぼす影響を調べた。

3. 実験結果

3・1 最小膜沸騰温度 圧力波を加える実験を行うに先立ち、最小膜沸騰温度(蒸気膜が崩壊するときの伝熱面温度 T_w)を測定した。図3は、液温を一定に維持した状態で、ヒータの入力を徐々に減少して T_w

(a) With pressure transducer (b) Without pressure transducer

Fig. 2 Detail of the test section

を低下させ、膜沸騰が崩壊するときの T_w の測定結果を液体サブクール度 ΔT_{sub} に対して示したものである。銅製伝熱面で浸漬深さ H が 15 mm と 5 mm の場合を示した。 $H=15$ mm では、 T_w は液温にほとんどよらない。しかし、 $H=5$ mm では、液体サブクール度 ΔT_{sub} が 0~14 K で平均 390 K、 $\Delta T_{\text{sub}} > 20$ K では、ほぼ飽和温度付近の値をとる。14~20 K の範囲は遷移域である。また、 $\Delta T_{\text{sub}} > 14$ K の範囲で、自由液面に波立ちが見られたが、 T_w が低下すると消滅した。波立ちが消滅すると、膜沸騰を維持する T_w が低下する。Shih ら⁽⁷⁾ による球の結果(●印)は、本実験の $H=5$ mm の結果に近いが、その延長線の値は $H=15$ mm の結果とほぼ一致している。

これらのことは、蒸気膜の崩壊する最小膜沸騰温度が、 ΔT_{sub} だけでなく浸漬深さにもよることを示し、球の測定値⁽⁷⁾ との比較から、蒸気膜の自然崩壊が開始する伝熱面上の位置が異なる可能性があることを示唆している。

3・2 蒸気膜の不安定挙動の観察 図4は伝熱面に付加した圧力波の典型例である。膜沸騰蒸気膜がないときの圧力変動を、液体中にセットした圧力センサと伝熱体の圧力センサでそれぞれ測定したものである。波形と圧力の大きさがほぼ同じに測定されることから、伝熱体内センサの健全性が示されている。

図3で得られた安定な膜沸騰状態を示す温度条件で、圧力波を付加したときの蒸気膜の不安定挙動を 35 mm カメラで観察した。図5に、 $T_w=423$ K、 $T_l=313$ K の温度条件での撮影時の代表的な圧力波形とこ

れに対応した蒸気膜の不安定挙動を示す。時間 t は圧力波の立上りを零とした。

①は圧力波が到来する前であるが、すでに蒸気膜に乱れが観察される。これは、容器とシリコンゴムを通して伝熱面に振動が伝わるためと考えられる。②では、部分的に不安定が成長し、蒸気膜の厚さが均一ではなくなっている。蒸気膜の乱れは圧力波が加わる方

Fig. 4 Comparison between pressure responses measured at the end of the rod and in R 113, respectively

Fig. 5 Typical pressure response and vapor film configuration during destabilizing process

Fig. 3 Effect of liquid subcooling and immersed depth of the heater on the minimum film boiling temperature

向と平行になっている。③では約2.5 mm 間隔のしま模様が成長している。しまの白い盛り上がった部分は、微小な気泡の集合と考えられる。その後、④では、直径約1.6 mmの半球状の気泡が観察され、蒸気膜の凹凸が明確になっている。しかし、⑤で大部分の領域で蒸気膜が消滅したか、またはきわめて薄くなっているように見える。このあと蒸気膜は回復するが、⑥では、よどみ点に蒸気泡の噴出のような現象が見られ、その上部もかなり厚い蒸気膜に覆われている。これは固液接触によって急激な蒸発が起こったものと考えられる。

なお、最終的には蒸気膜が復元され、膜沸騰状態に戻る。

3.3 蒸気膜内の圧力変動 図6に、伝熱面が銅の場合の蒸気膜内の圧力変動 ΔP_v と、R 113 中の圧力変動 ΔP_l を同時に測定した結果の一例を示す。大きな圧力変動が1 ms 以内に終了している。同様に、図7は伝熱面がSUS 304の場合の代表的な測定例で、時間軸を拡大して示した。図7中の s は、圧力センサの取付位置を表し、感圧面から伝熱面先端までの距離で示した。

$\Delta P_{l,max}$ は、図6では0.068 MPa、図7では0.15 MPaであるのに対し、 $\Delta P_{v,max}$ は約0.12 msと0.2 ms後に、それぞれ0.57 MPaと2.18 MPaの高圧のパルスを示している。また蒸気膜に $\Delta P_{l,max}$ が0.26 MPa以上の圧力波が付加されたときは、センサの測定可能範囲(3.5 MPa)を超えたが、このときも最終的な蒸気膜の崩壊は観察されなかった。

多くの測定結果によれば、 ΔP_l の最初の圧力ピークの直後に ΔP_v の鋭い圧力パルスが観察されること、

Fig. 6 Typical pressure records measured in vapor film and in liquid (1)

この圧力パルスの値は ΔP_l の値をはるかに上回る高い値を示すこと、が明らかになった。このような圧力パルスの発生は、蒸気爆発においては高温液を変形飛散させ、初期の細粒化を引き起こす要因になりうることを考えられる。

次に、伝熱面の熱物性(熱拡散率)の圧力変動に及ぼす影響を調べた。

図8は、 $\Delta P_{l,max}$ に対する $\Delta P_{v,max}$ の値を、銅とSUS 304伝熱面について示したものである。圧力波が加わり蒸気膜厚さが減少すると、熱流束の増加によって伝熱面表面温度が低下する。銅に比べてSUS 304のほうが熱拡散率が小さいことから、表面温度の低下の度合いも大きく、蒸気膜厚さもより薄くなり、 $\Delta P_{v,max}$ も大きい値を示すことが予想される。実験によると、その傾向が見られるものの顕著とはいえない。両者とも、 $\Delta P_{v,max}$ は $\Delta P_{l,max}$ の約1.6乗に比例

Fig. 7 Typical pressure records measured in vapor film and in liquid (2)

Fig. 8 The maximum induced pressure peak measured in vapor film versus the external peak pressure supplied to the film

して増加している。図8中には、銅の実験値を最小二乗法で近似した直線を破線で記入した。また曲線で示した実線は後出の理論値で、実験で得られた外部圧力波に対して計算したものである。

圧力センサの感圧部は平面であるため、よどみ点付近の表面形状が球面とは異なる。センサは感圧面が、完全な半球面の場合のよどみ点から、わずかに後退した位置となるように取付ける。蒸気膜の厚さはきわめて薄いことから、圧力センサ感圧部と伝熱面からの距離 s が測定に影響を及ぼすことが考えられる。そこで容易に変えることができる $s=0.8\text{ mm}$ と 2.8 mm の場合について、蒸気膜内圧力の測定を行い、センサ取付けによる影響を推定した。両者の間に顕著な差異は見られないことから、圧力センサを取付けたことによる、 ΔP_v への影響は少ないと判断した。ただし、 $s=2.8\text{ mm}$ の $\Delta P_{v,\max}$ が大きくなる場合があることと、約 $80\text{ }\mu\text{s}$ 後に、再度圧力パルスを発生する場合がある点に相違が見られた。

4. 解 析

膜沸騰状態に外部圧力波を加えたときに得られる蒸気膜内のパルス状の高い圧力値の発生メカニズムを明らかにするために、蒸気膜内の圧力と伝熱面表面温度の変化を求める解析を行った。

4.1 計算式と計算例 図9に計算モデルを示す。図5の写真に示したように、実験結果では蒸気膜の厚さが伝熱面で様にはならない。しかし、解析は蒸気膜厚さ δ と蒸気膜内圧力 P_v が大きく変動する短時間の間のみ行うことと、計算で得られる値はよどみ点付近のものとするので、 δ と P_v は一様と仮定する。

以上の仮定により P_v は伝熱体半球部の中心から蒸気膜界面までの距離を R として式(1)から求める。

$$P_v = \left\{ \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + R \left(\frac{d^2 R}{dt^2} \right) \right\} \rho_l + P_l \dots\dots\dots (1)$$

Fig. 9 Model for simulation

蒸気は理想気体とみなし、気液界面の温度と圧力は Clausius-Clapeyron の式に従うとした。

熱の釣合い式は、蒸発潜熱を h_{fg} 、蒸気質量を m とすると、式(2)となる。

$$h_{fg} \frac{dm}{dt} = \frac{k_v(T_w - T_s)}{\delta} + h(T_s - T_l) \dots\dots\dots (2)$$

伝熱面温度 T_w の変動は一次元球座標系の熱伝導方程式から求め、初期状態で伝熱体温度は一様とし、伝熱体表面温度は測定された T_w とした。境界条件は、半球表面での熱流束が蒸気膜を通過する熱流束と等しく、半球中心は断熱とした。

液体側の熱移動は熱伝達によるとして、あらかじめ設定した熱伝達率 h を用いた。図10に、 $\Delta P_{v,\max}$ の計算値に対する h の影響を示した。図10中の点線は実験値を示す。 $10^4\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ で実験値とほぼ一致しており、 $5000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 以下で一定値に近づいている。また、水の場合の Fletcher ら⁽⁸⁾ の解析では、サブクール度が 80 K で、約 $800\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ となっている。さらに、本研究で使用した R113 の熱伝導率は、水に比較して小さい。これらの点を考慮して、本計算では $h=500\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ とした。

初期蒸気膜厚さは、西尾・上村⁽⁹⁾ による球まわりのサブクール膜沸騰熱伝達の実験式から算出した。

ΔP_l は、加えられた圧力波の測定値から半周期 τ と最大値 $\Delta P_{l,\max}$ を読み取り三角関数で近似した。

4.2 測定値と計算値の比較 図11は、 $h=500\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ としたときの、銅の伝熱面の場合の ΔP_v と ΔP_l の測定値と計算値を比較したものである。併せて、蒸気膜厚さ δ と伝熱面温度 T_w の変動に関する計算値も示した。 ΔP_l の波形が一部近似しきれていない点と、 $\Delta P_{v,\max}$ の計算値がやや小さい点を除いて、測定値の全体の傾向をよく示している。この結果から、蒸気膜内に発生する高い圧力パルスは、周囲の液体圧力の上昇による蒸気膜厚さの減少によるといえる。

Fig. 10 Effect of heat transfer coefficient on the maximum vapor film pressure

Fig. 11 Comparison between calculated results and experimental data. Effect of materials of heat transfer surface is also shown

Fig. 12 Effect of diameter of heat transfer surface on the maximum vapor film pressure

伝熱面の熱物性値の影響を調べるために、伝熱面をアルミニウムと仮定して同じ条件で計算し、銅の場合と比較した結果を図 11 に併せて示した。伝熱面表面温度の下がり方に差が見られるほかは、 $\Delta P_{v,max}$ や蒸気膜厚さには、ほとんど差が見られない。

銅伝熱面の場合について、測定値から得られた τ と $\Delta P_{i,max}$ から計算された $\Delta P_{v,max}$ を、 $\Delta P_{i,max}$ に対して示した結果を図 8 に示したが、実験値をよく表しているといえる。

図 12 は $\Delta P_{v,max}$ に対する伝熱体直径 d の影響の計算結果である。 $d=20$ mm 付近で $\Delta P_{v,max}$ が最大値になり、蒸気爆発においても液滴径が蒸気膜崩壊や細粒化に影響することを示唆している。

5. ま と め

フロン 113 中で膜沸騰状態にある端部が半球状の伝熱面に、下方から外部圧力波を加える実験を行った。蒸気膜の不安定挙動を写真撮影して観察した。また、蒸気膜内の圧力変動を伝熱体内部に取付けたセンサで測定する実験も行い、計算値と比較した。以上の実験と計算から、次のような結果を得た。

- (1) 伝熱面には微小気泡の集合と思われる白いしまがでる。
- (2) いったん蒸気泡が消滅したかに見えるがよどみ点とやや上部で急激な蒸気の発生が見られる。
- (3) 蒸気膜内に高い圧力パルスが発生し、その値は加えた外部圧力波の値を大きく上回る。
- (4) 蒸気膜内に発生する圧力波の最大値は付与圧力波の最大値の約 1.6 乗に比例した。
- (5) 簡単な計算モデルに基づく蒸気膜内圧力値の計算結果は蒸気膜内に生ずる高い圧力パルスの実験値をよく説明できる。
- (6) 伝熱体の熱物性値は、 $\Delta P_{v,max}$ や蒸気膜厚さには、ほとんど影響を及ぼさない。

文 献

- (1) Naylor, P. and Patrick, M. A., Film Boiling Destabilization, *Proc. 8th Int. Heat Transf. Conf.*, 4(1986), 2037-2042.
- (2) Inoue, A. and Bankoff, S. G., Destabilization of film Boiling Due to Arrival of a Pressure Shock: Part I Experimental, *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 103-3(1981), 459-464.
- (3) 庄司正弘・ほか 3 名, 急激な温度こう配をつけた水中で生ずる小規模蒸気爆発の研究 (冷却液サブクール効果についての検討), *機論*, 52-479, B(1986), 2633-2639.
- (4) Tso, C. P. and Strauss, J. H., Quenching of an Instrumented Sphere in Freon-12 and Liquid Nitrogen in a Vapour Explosion Study, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 16(1983), 943-953.
- (5) Takashima, T. and Iida, Y., A Study on Mechanism of Spontaneous Vapor Explosions with Single Drops, *JSME Intl. J. Ser. B*, 38-1(1995), 114-120.
- (6) 高島武雄・飯田嘉宏, 外部圧力波によって生ずる単一液滴の蒸気爆発の蒸気膜崩壊過程, 第 31 回伝熱シンポ講演論文集, A341(1994-5), 811-813.
- (7) Shih, C. and El-Wakil, M. M., Film Boiling and Vapor Explosions from Small Spheres, *Nucl. Sci. Eng.*, 77(1981), 470-479.
- (8) Fletcher, D. F. and Sigurdson, M., The Effect of Coolant Viscosity on Natural Convection Film Boiling, *Proc. Int. Semi. Vapor Explos. Explos., Erupt.* (1997), 131-137.
- (9) 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 (第 1 報, 白金球-大気圧水のプール沸騰系), *機論*, 52-476, B(1986), 1811-1816.