522 液体窒素のフラッシング初期段階におけるミスト形成

Mist Formation at Early Stage under Flashing of Liquid Nitrogen

○ 毛利 正樹 (室蘭工大) 正 花岡 裕 (室蘭工大)
正 井坂 秀治 (室蘭工大) 学 久保田 智 (室蘭工大)

Masaki MOHRI, Yutaka HANAOKA, Hideharu ISAKA, Tomo KUBOTA
Dept. of Mech. Eng., Muroran Inst. of Tech., Mizumoto-cho 27-1, Muroran, Hokkaido, 050-8585

In the case of flashing process of cryogenic fluids such as a liquid nitrogen, the mist formation has been observed in the vapor phase near the vapor-liquid surface at the early stage of depressurization process. In the experiment, the relation between the mist formation and level of liquid nitrogen was examined. The present investigation focused on the inception and growth of mist formation by the difference of the vertical temperature layer or the initial pressure. The experimental results show that the mist formation was hardly influenced to the difference in the liquid level.

Key Words : Liquid Nitrogen, Flashing, Mist Formation, Nonequilibrium State, Superheated Degree

1. 緒言

気液平衡状態にある液体が急減圧を受けると、一時的に過熱液状態となり、その後急激な相変化を起こす。この現象はフラッシングとして知られ、高温高压貯蔵容器や配管系の安全性を考える上で重要な課題となっている。しかし低温液体を対象としたフラッシングに関する研究や、比較的減圧速度の遅い場合 (100MPa/s 以下) の研究例は数少ない。そこで著者らは、液体窒素を試験液体としてフラッシングの研究を行ってきた。その結果、特定の条件下において減圧沸騰に先行し、気液界面上に濃密なミスト層形成が明瞭に観察された⁽¹⁾⁽²⁾。

本報告では、液体窒素が減圧によりフラッシングを起こす際に見られるミスト生成について、沸騰との関連性を明らかにするため、初期ミスト挙動を観察し、気相部の温度分布、初期条件等の違いによるミスト生成への影響を調べた。

2. 実験装置及び実験方法

実験装置は、装置本体、高真空排気装置、測定装置一式から構成される。その概略図を図1に示す。装置本体は压力容器と上部フランジから構成され、压力容器はパイレックスガ

ラス製で、外筒管(長さ 260mm, 内径 90mm)と内筒管(長さ 290mm, 内径 50mm)の二重構造となっている。上部フランジには静圧孔、液体窒素注入口、圧力開放用破膜ユニットなどが設けられており、減圧速度を調整するためのオリフィス(口径 5, 10, 15, 20, 25mm, 以下、 d)が装着できるようになっている。高真空排気装置は、外筒管と内筒管の間を約 10^{-4} Pa 程度まで排気することができ、断熱状態を保つことができる。

測定装置については、圧力測定は歪ゲージ式の圧力変換器を用い、温度測定は、压力容器内筒管中の気相部にシース熱電対を3本、任意の高さに設置し計測する。減圧沸騰、ミスト形成の可視化には、高速度ビデオカメラ(400pps)が用いられ、ベタカム SP レコーダでその様子を記録する。

実験方法はまず、真空ポンプで内筒管と外筒管の間を真空断熱状態にし、内筒管に液体窒素を注入する。液体窒素の液位調整後、压力容器を密閉し所定の圧力まで自然昇圧させる。その後破膜ユニットを作動させ、マイラフィルムを焼き切ることで容器内を急減圧させ、それと同時に高速度ビデオカメラで沸騰様相を可視化する。また、容器内圧力・温度データは、パーソナルコンピュータに入力、処理される。

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

Fig. 2 Time sequence of high speed video camera pictures.
($P_1=451.1\text{kPa}$, $\Sigma_{\max}=51.9\text{MPa/s}$)

Fig. 3 Time sequence of high speed video camera pictures.
($P_1=152.5\text{kPa}$, $\Sigma_{\max}=21.6\text{MPa/s}$)

3. 実験結果と考察

減圧速度は、容器内減圧過程における圧力の最大勾配値を最大減圧速度(以下、 Σ_{max})とし用いた。ミスト高さは、液体の表面沸騰によりミストが押し上げられる直前(ミストと液体の間に隙間がない状態)までの観察される高さとした。

3.1 ミスト生成・挙動

ミスト生成がどのような経過で形成、成長するかを見るために、異なる条件下でのフラッシングの可視化結果を示す。図2は初期圧力(以下、 P_i)が高い場合、図3は P_i が低い場合に対応したミスト形成・成長の様相を示す。熱電対の高さは、 $T1=63\text{mm}, T2=83\text{mm}, T3=120\text{mm}$ の高さである。図2の場合、実験条件は、 $P_i=451.1\text{kPa}, d=25\text{mm}$ 、減圧直前の液位58mm、減圧直前の気相部温度は $T1=126.1\text{K}, T2=162.9\text{K}, T3=195.5\text{K}$ であり、結果的に $\Sigma_{max}=51.9\text{MPa/s}$ であった。一方、図3は、 $P_i=152.5\text{kPa}, d=25\text{mm}$ 、減圧直前の液位62mm、減圧直前の気相部温度は $T1=108.7\text{K}, T2=142.2\text{K}, T3=180.5\text{K}$ の場合であり、その結果、 $\Sigma_{max}=21.6\text{MPa/s}$ であった。

図2において、 $t=0\text{ms}$ が破膜した瞬間である。 $t=15\text{ms}$ で気液界面近傍に薄っすらとミストが発生しているのがわかる。 $t=23\text{ms}$ においてミスト高さが最大(15mm)となり、その後気液界面の表面沸騰によりミストは上方に押し上げられる。 $t=198\text{ms}$ では、液中底部に気泡が発生しており、その後上昇した気泡がミストを押し出している。 $t=2860\text{ms}$ は、沸騰現象が収束した後の様子である。同様に図3の場合も $t=0\text{ms}$ が破膜した瞬間で、 $t=20\text{ms}$ がミスト発生時間である。 $t=65\text{ms}$ の時に最大ミスト高さ(3mm)をとり、 $t=190\text{ms}$ では気液界面の表面沸騰により上昇するミストの様子がみられる。 $t=1023\text{ms}$ ではミスト層が気相部に拡散していく様子が見られ、 $t=6860\text{ms}$ の時にはミストは完全に消滅している。これらの図から、 P_i が高いと減圧速度は速くなり、ミストは高く、濃く発生し、またミストが発生する時間や最大高さをとる時間も早くなる傾向がみられる。

3.2 減圧速度と過熱度

気液界面近傍の過熱度とミスト生成には、密接な関係があると考えられる。そこで、 Σ_{max} と過熱度の関係を検討した。図4に、液位60mm、気相部温度を $T1$ 部の位置とした過熱度と Σ_{max} との関係を示す。過熱度は、容器内圧力から飽和温度を算出し、その飽和温度と気相部温度との差によって算出した。この図から、減圧速度が小さく、オリフィス径が小さな場合は、過熱度が約40Kの付近で一定の値を取ることがわかる。また、 $d=20\text{mm}$ 以上となると減圧速度の増加と共に過熱度の上昇がみられる。これは、過熱度はオリフィス径が小さな場合には、減圧速度に関係なく一定であるのに対し、オリフィス径が大きな場合には、減圧速度に依存することを意味する。また、この図より $d=15\text{mm}$ の場合、データにバラツキが見られる。これは、 $d=15\text{mm}$ が両者の特性を併せ持つ遷移領域となっているためであると考えられる。

3.3 初期液位の影響

減圧直前の気相部温度分布のミスト形成に与える影響を調べるため、図5は減圧直前における気相部温度の垂直分布を示す。なお、液位は60mmである。気液界面の高さを0とし、気液界面温度は、容器内圧力から窒素ガス飽和温度を算出している。図から気相部に垂直方向の温度成層が明瞭に見られる。これは、容器内が完全断熱されていないことに起因する。また、 P_i が高くなるにつれ気相部温度は高くなり、気液界面との温度差は増大することがわかる。この温度差のため、気液界面近傍の過熱度が大きくなり、このことから気相部温度分布がミスト生成に大きく関わっているものと考えられる。

そこで、液位を変化させることにより、容器内に形成される温度成層への影響について検討した。図6は、 $P_i=450\text{kPa}$ とし、液位を60mm、48mm、25mm、15mmに変化させた時

Fig. 4 Relationship between Σ_{max} and superheated degree(ΔT)_{sat}.

Fig. 5 Vertical temperature distributions before depressurization.

Fig. 6 Vertical temperature distributions before depressurization. ($P_i=450.0\text{kPa}$)

の減圧直前の気相部温度分布の比較を示す。図から、初期液位の高さに関わらず、気相部温度分布に変化がないことがわかる。また、液位を変えてもミスト形成に変化がなかった事が実験から確認できた。これより、液位の高さに関係なく温度成層の相似性がそのまま成立し、ミスト形成にも特に影響しないことがわかった。しかし、液位を下げたことにより、沸騰が激しくなった。これは、液位が減少したため急減圧時に生じた圧力波の吸収が弱かったためだと考えられる。

4. 結言

- (1) オリフィス径が小さい場合、過熱度は一定の値をとるが、オリフィス径が大きくなると、減圧速度の増加に伴い過熱度の増加が見られる。
- (2) 容器内の液位が変化しても、温度成層形成には変化はなく、ミスト生成にも影響はない。

参考文献

- (1) 渡辺・他2名, 減圧に伴う液体窒素のフラッシング現象(第2報, 減圧初期におけるミスト層の形成および液面挙動), 機論, 63-610, B(1997), 2148-2153.
- (2) 久保田・他, 液体窒素のフラッシング現象におけるミスト形成, 第38回伝熱シンポジウム, (2001), vol.1, 285.