

## 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)

渡辺 敏晃<sup>\*1</sup>, 花岡 裕<sup>\*2</sup>, 戸倉 郁夫<sup>\*2</sup>

### Flashing Phenomena of Depressurized Liquid Nitrogen in a Pressure Vessel

(2nd Report, Mist formation and Behavior of Liquid Surface  
in early depressurization process)

Toshiaki WATANABE, Yutaka HANAOKA and Ikuo TOKURA

Flashing of liquid nitrogen in a pressure vessel (cryostat) was observed at depressurization rates from 0.01 to 4.0 MPa/s. The explosive boiling behavior was observed by using a video camera. Pressure and temperature changes in the pressure vessel were measured. In the case of high depressurization rates, mist formation was observed in the vapor phase near the vapor-liquid surface at the early stage of the depressurization process. This mist layer becomes more dense as the depressurization rate increases. Observations of mist formation and the calculated temperature drop of the vapor under an adiabatic expansion process show that mist formation depends on the vapor expansion and boiling near the vapor-liquid surface. Mist formation in flashing phenomena play an important role in which the thermal nonequilibrium states between the supercooled vapor and the superheated liquid are relaxed due to depressurization.

**Key Words:** Cryogenics, Boiling, Evaporation, Condensation, Mist, Flashing, Depressurization, Liquid Nitrogen, Thermal Stratification

### 1. 緒 言

高圧下にある液体が急激な圧力開放を受け、爆発的な沸騰を起こすフラッシング現象の解明は、おもに原子炉の安全性を対象とした高温高圧水について行われてきた<sup>(1)(2)</sup>。ところが、宇宙工学、超伝導技術の発展などにより、その使用が急増している低温流体を対象とする研究はほとんど見あたらない。液化天然ガスや液体水素をはじめとする低温流体は、常温以上の流体とは異なり、加圧状態で保存されることが多い。加えて、なんらかの理由により容器の断熱が破壊されると、外部からの多量な熱侵入により急速に昇圧して高圧状態となる。その際、適切なリーク処置が行われない場合は、貯蔵容器および系の爆発、損傷等の事故につながる。また、流動問題を考えると、低温流体はその温度の低さから気泡核を有する配管壁が熱侵入経路となり、絶えず伝熱面にさらされる状態となるため、沸騰を起こしやすく、二相流としての流動も不安定になりやすい<sup>(3)</sup>。よって、低温流体の過渡的な沸騰および圧力挙動を捕らえておく必要性が高まっている。このよ

うな観点から、著者らは冷却用寒剤として一般に広く用いられている液体窒素を試験液体とし、フラッシング時の圧力挙動、沸騰様相等について検討を加えてきた<sup>(4)(5)</sup>。

第1報では比較的遅い減圧速度において温度成層の形成によるフラッシング現象への影響を検討するとともに容器内圧力変動を数値的に予測するモデルを提示した<sup>(6)</sup>。その後、高減圧速度化を目的とした装置の改良を行い、実験を続けた結果、高減圧速度の場合、減圧過程の初期の段階で気液界面上においてミストの発生が観察された。ミストの形成となる凝縮現象についての研究は、その高い冷却性能から滴状凝縮、膜状凝縮とともに盛んに行われており、最近では分子動力学的手法を用いた研究<sup>(7)</sup>、滴状凝縮における膜成長説の提案<sup>(8)</sup>など進展がめざましい。しかし、これらはおもに固体壁面上における凝縮が対象であり、気液界面上での蒸発凝縮機構、ミスト発生については一定圧力場におけるものや<sup>(9)</sup>、衝撃波反射後にみられる凝縮の研究が散見される程度である<sup>(10)</sup>。著者らの知り得る限り、減圧場における気液界面上のミスト層の生成、成長についての報告は見あたらない。減圧場における気液界面上のミストの発生は、その後の爆発的な沸騰に先行して起こり、凝縮潜熱の放出による気相部の非平

\* 原稿受付 1995年12月27日。

<sup>\*1</sup> 正員、水産大学校 (〒759-65 下関市永田本町2-7-1)。

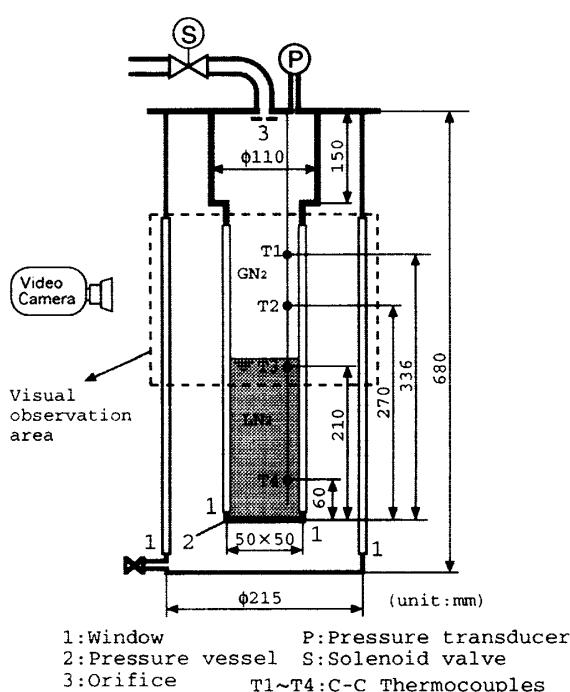
<sup>\*2</sup> 正員、室蘭工業大学工学部 (〒050 室蘭市水元町27-1)。

衡を解消することでフラッキング現象を和らげると推察される。フラッキング現象において、初期減圧過程はその後の爆発的な沸騰を左右する過程であり、ミストの発生自体、減圧速度に強く依存している。

本論文では液体窒素を減圧させ、フラッキングを起こしたときにみられるミストの発生と液面挙動の観察結果<sup>(11)</sup>をもとにフラッキング現象におけるミスト生成現象の関連性について考察するものである。

## 2. 実験装置および方法

基本的には第1報<sup>(6)</sup>に詳述した装置を用いるので、ここでは実験装置の詳細な説明と方法については割愛し、高減圧速度化に関する部分と前報と異なる部分のみを記述する。クライオスタット（図1）はステンレス製で圧力容器である内筒と外筒の二重構造になっており、上部フランジに放出用電磁弁、圧力変換器（応答周波数、560 Hz）、オリフィス（φ3, 10 mm）が取付けられる。温度測定用の熱電対は垂直方向に4箇所、設置されている。第1報と異なる点は内筒の両面の光学窓にアクリル板を用いることで透過光撮影が可能になり、鮮明な可視化観察ができるようになったこと、流路抵抗を低くする放出系の改造により、以前よりも高い減圧速度での実験が可能になったことである。また、沸騰様相の可視化には、ビデオカメラ（60 frames/s）を用いた。



## 3. 実験結果と考察

**3・1 ミスト層の形成と液面挙動の観察** フラッキング現象における気液界面上のミスト生成について詳細に調べるために、気液界面の挙動に焦点を合せ、異なる減圧速度（オリフィスの交換）で実験を行った。これらの実験において、ミストの生成・成長が観察できるように、液位はそれぞれ容器の半分程度に設定している。

図2(a)は減圧速度が速い場合の減圧初期の気液界面挙動の可視化結果を示す。図2(b)には気液界面部をさらに拡大したものを示す。この場合の実験条件は、 $p_i=540.9\text{ kPa}$ ,  $H_i=211.0\text{ mm}$ ,  $d=10\text{ mm}$ ,  $T_1=112.1\text{ K}$ ,  $T_2=105.4\text{ K}$ ,  $T_3=93.6\text{ K}$ ,  $T_4=91.1\text{ K}$ 、初期圧力に対する飽和温度は95.0 Kであった。図3は対応する初期容器内温度分布(○印)である。図3に示されるように液相部および気相部はともに明りような温度成層が生じており、上方に行くに従い、そのこう配は大きくなっている。このときの容器内圧力変動を図4に示す。図4から、 $p_n=221.2\text{ kPa}$ ,  $t_n=0.20\text{ s}$ ,  $p_r=316.2\text{ kPa}$ ,  $t_r=0.48\text{ s}$ ,  $\Sigma=1598.5\text{ kPa/s}$ の値を得る。図2の可視化結果をみると、まず減圧後、最も温度の高い気液界面上の壁面からの気泡発生により、界面は乱れる( $t=33.3\text{ ms}$ )。そしてこの乱れは50.0 msにはより激しくなり、66.7 msには気泡が崩壊した場所の上で局的にミストが発生している。この局的なミスト発生については、次のような機構によるものと考えられる。沸騰気泡が気液界面で崩壊する際に、液のちぎれた部分が滴状に分散しているのとは別にそれよりも微細なミストがみられることから、気泡内部の蒸気が放出、凝縮され、ミストとなっているようみえる。また、83.3 msにおいては、気液界面上に層状にミストがみられ、このミスト層は時間の経過とともに、その厚さを増していく。ミスト層の下には沸騰により生じた気液二相共存領域が現れ、成長を始める。ミスト層はこの沸騰層の成長により押し上げられ、観察領域から外れてしまう。最終的には圧力容器は気液混合状態で満たされる。

一方、第1報で論じた比較的減圧速度が遅い場合の例について、減圧初期段階の可視化結果を図5(a)に示す。図5(b)は特に気液界面部を拡大したものである。このときの条件は、 $p_i=541.6\text{ kPa}$ ,  $H_i=211.0\text{ mm}$ ,  $d=3\text{ mm}$ ,  $T_1=112.2\text{ K}$ ,  $T_2=105.7\text{ K}$ ,  $T_3=93.7\text{ K}$ ,  $T_4=90.4\text{ K}$ 、初期圧力に対する飽和温度は95.0 Kである。これらの条件はオリフィス口径の違いを除いて減圧速度が高い場合とほとんど同じである。温度分

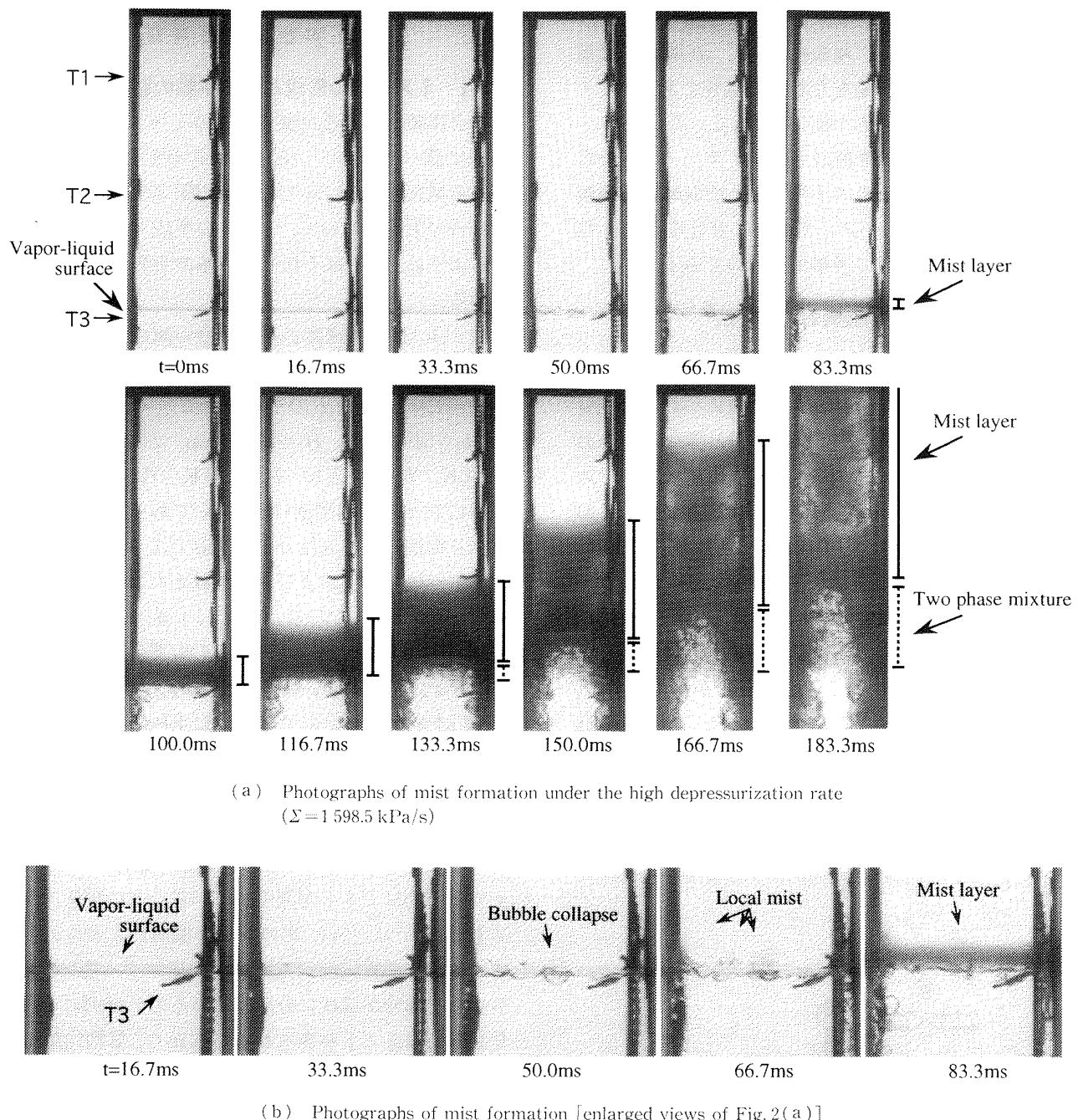


Fig. 2

布を前出の図3に別記号(×印)に変えて示す。図3にみられるように、容器内に形成された温度分布はほぼ一致している。図4には対応する圧力波形を示す。この波形より、 $p_n = 341.1 \text{ kPa}$ ,  $t_n = 0.84 \text{ s}$ ,  $p_r = 368.9 \text{ kPa}$ ,  $t_r = 1.40 \text{ s}$ であり、結果的に  $\Sigma = 238.3 \text{ kPa/s}$  が得られる。オリフィス口径の違いによるこれらの諸量への影響は統報にて詳細に検討する予定である。可視化結果をみると、200.0 msにおいて壁面近傍の気液界面から気泡の発生が起こり、界面に乱れが生じている。400.0 msにおいては、気液界面上の気泡崩壊の場所付近で、かすかに局所的なミストの発生が観察される。その後、壁面からの沸騰が激しくなり、気液

界面は壁面から中心に向かって進行する沸騰気液二相領域に覆われる。時間の経過に伴い、さらに沸騰領域は容器底部へと進行し、最終的に全体沸騰へと移行するが、結果的には濃い層状のミストはみられなかった。このように遅い減圧速度の場合には、濃いミスト層はフラッシング事象の最終段階までみられない。

これらの二つの事例から、以下のことがわかる。ミスト層は高減圧速度の場合に発生し、減圧速度が高いほど、ミスト層は濃くはっきりと確認できる。この層状のミスト発生は気泡の崩壊時にみられる局所的なミスト発生の後に起こっている。

### 3・2 気相部温度変化とミスト層の形成

ミスト

の発生は、以上述べたように液面上部の蒸気相の減圧膨張プロセスに依存すると考えられるので、減圧前に蒸気相を形成する窒素蒸気の断熱膨張による温度降下を簡単に算出してみた。計算における仮定は断熱等エントロピー過程で、蒸気は理想気体であるとし、また蒸気の流失による熱損失はないものとする。実際の計算は式(1)を用い、 $p_i$ ,  $T_i$ にはそれぞれ初期圧力、温度、 $\rho$ には実測の圧力値を代入する。ただし、比熱比

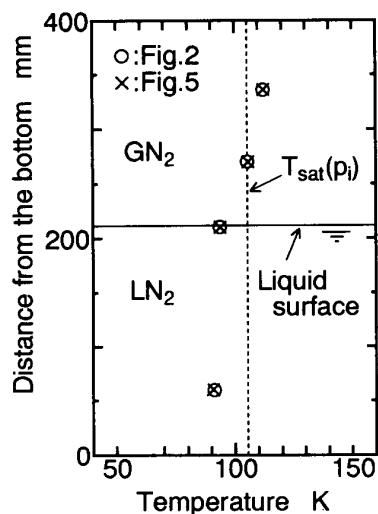


Fig. 3 Comparison between initial temperature distributions for Fig. 2 and that for Fig. 5

$\gamma$ はその蒸気温度に対するものを用い、実在气体の状態に近づけた。

図6は減圧速度が速い場合に対する蒸気相温度の計算結果を示す。図6中の一点破線は減圧後の実測圧力に対応する蒸気の飽和温度の線である。熱電対T1, T2付近の蒸気はともに減圧により温度降下を起こし, T1付近においては160.0 ms, T2付近においては120.0 msで飽和温度線と交差する。図2(a)の可

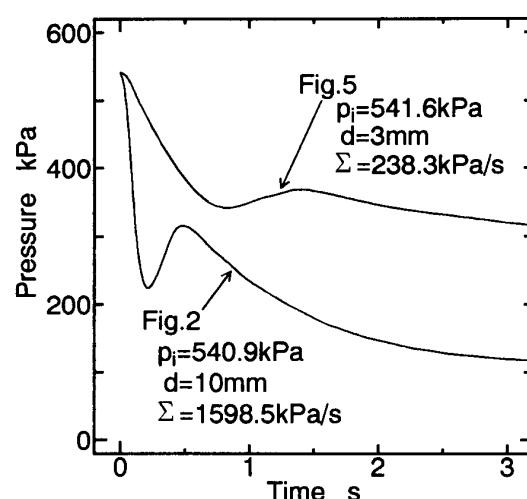
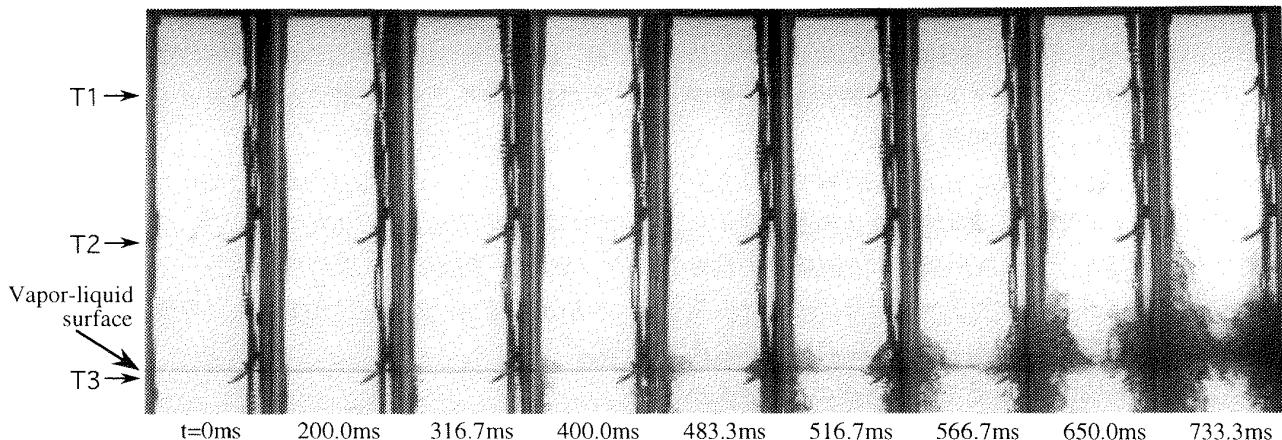
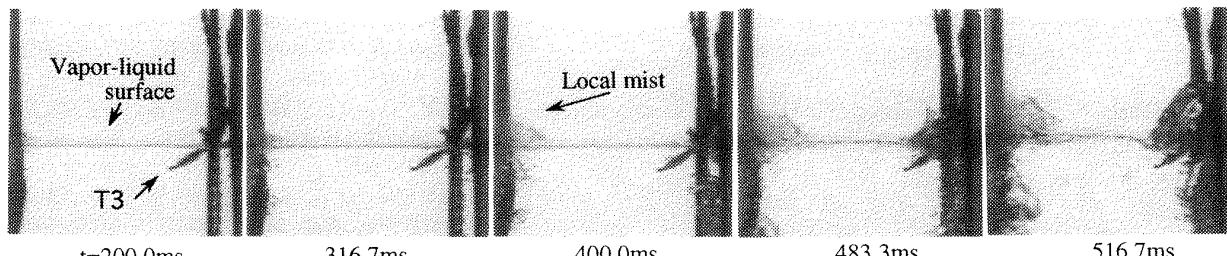


Fig. 4 Comparison of pressure time histories



(a) Photographs of mist formation under the low depressurization rate ( $\Sigma = 238.3 \text{ kPa/s}$ )



(b) Photographs of mist formation [enlarged views of Fig. 5(a)]

Fig. 5

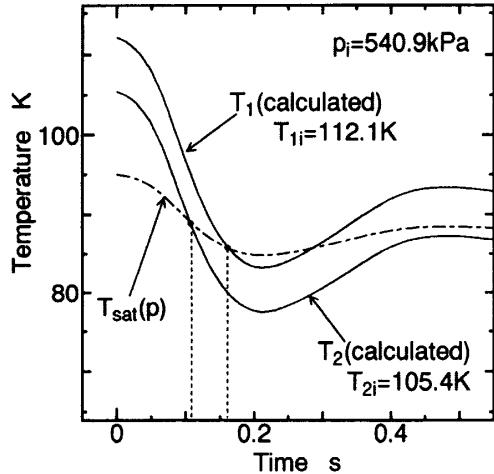


Fig. 6 Relationship between variation of saturation temperature and that of estimated temperature in the case of high depressurization rate

視化結果において、T1付近でミストが発生しているのは166.7 ms, T2付近では133.3 msと150.0 msの間であるから、凝縮するのに有限な過飽和度が必要であることと凝縮核が形成されてから可視化観測可能な大きさに成長するまでに有限の時間がかかる事を考慮に入れると、ほぼ観測結果と一致しているといえる。図7に減圧速度が低い場合の計算結果について示す。この場合も、T1, T2ともに温度は下降するが、飽和線と交差する前に系の圧力が沸騰による圧力回復過程に移行し、増圧し始め、凝縮条件を満足せずに終わる。よって凝縮によるミスト形成は断熱膨張の影響を大きく受けていることが推測される。

本研究のように減圧場における気液界面上のミストの生成は、減圧による蒸気の断熱膨張と沸騰気泡からの蒸気供給、界面上での気泡崩壊による凝縮核の供給などが複雑にかかわっており、一定圧力下における蒸発面上でのミスト発生と異なる。もし、液相からの沸騰・蒸発蒸気が供給される形でミスト層の形成、成長が起こっていると仮定するならば、ミスト発生は急激な減圧により過熱化した液相部から蒸発潜熱という形で熱を奪い、断熱膨張により温度下降した気相部に対し、凝縮潜熱の放出として熱供給を行うことになる。結果的にミスト発生は蒸発を促進する働き<sup>(9)</sup>に加え、減圧により生じる過熱液体と過冷蒸気が共存する非平衡状態(準安定状態)を爆発的な沸騰に先行して緩和する働きがあると推察される。

#### 4. 結 言

本研究では液体窒素をフラッシングさせた場合に、気液界面上に発生するミストについて、おもに可視化

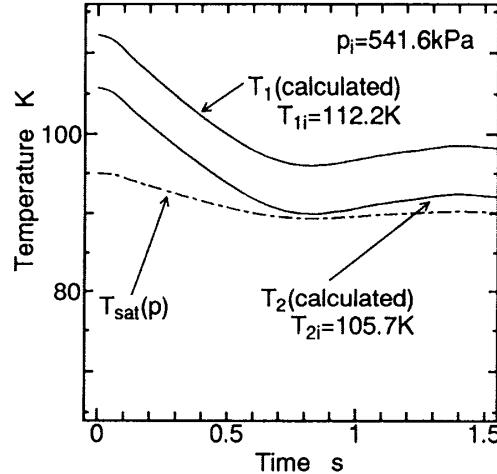


Fig. 7 Relationship between variation of saturation temperature and that of estimated temperature in the case of low depressurization rate

観察から考察を行った。その結果、以下の結論を得た。

(1) 減圧後、気液界面において沸騰気泡の崩壊位置上方において局所的にミストが発生し、減圧速度が速い場合には、このミストが層状に発達し、明りょうなミスト層領域が形成される。これに対し、減圧速度が低い場合には、みられない。

(2) 減圧場における液面上のミストの発生は、蒸気の断熱膨張に加え、過熱液相部の沸騰による液面変動、およびその結果としての凝縮核の供給や蒸発蒸気の供給を伴う点で、一定圧力場における蒸発面上のミスト生成とは異なる。

(3) ミストの発生は、減圧により生じる非平衡状態の解消を促進すると推察される。

最後に、実験遂行に当たりご助力をいただいた本学小川徳哉技官、および同大学院生 舟橋誠君に感謝する。

#### 文 献

- (1) Edwards, A. R. and O'Brien, T. P., Studies of Phenomena Connected with the Depressurization of Water Reactor, *J. Br. Nucl. Energy Soc.*, 9(1970), 125-135.
- (2) Alamgir, M. and Lienhard, J. H., Correlation of Pressure Undershoot During Hot-Water Depressurization, *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 103-1(1981), 52-55.
- (3) 赤川浩爾・ほか4名、液体窒素蒸発器の不安定流動(第2報、並列垂直管の核沸騰域と膜沸騰域)、機論, 55-516, B (1989), 2465-2471.
- (4) 横山真吾・ほか2名、液体窒素のフラッシング現象に関する実験的研究、機論, 58-549, B(1992), 1498-1503.
- (5) Yokoyama, S., ほか3名, A Study of Liquid Nitrogen Flashing under Rapid Depressurization, *Proc. 2nd JSME-KSME Thermal Eng. Conf.*, 3(1992), 321-326.
- (6) 渡辺敏晃・ほか2名、減圧に伴う液体窒素のフラッシ

- グ現象(第1報、比較的遅い減圧速度の場合), 機論, 61-585, B(1995), 1849-1854.
- (7) 藤川重雄・ほか3名、会合性液体の蒸発・凝縮現象に関する分子論的研究(衝撃波管による実験と分子動力学ミュレーション), 機論, 61-581, B(1995), 215-222.
- (8) 原口忠男・ほか2名、滴状凝縮の液滴初生の顕微鏡観察, 機論, 56-529, B(1990), 2697-2703.
- (9) 熊田俊明・ほか2名、ミストの発生を伴うナトリウムの自然蒸発(第2報、ミスト発生領域の観察および内縁位置の測定によるCSMの検討), 機論, 43-370, 2(1977), 2278-2287.
- 
- (10) Maeno, K., Shock Wave Propagation in Low Temperature Fluids and Phase Change Phenomena, *Adiabatic Waves in Liquid Vapor Systems*, (1990), 69, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- (11) Watanabe, T., ほか2名, Mist Formation in Flashing Phenomena of Liquid Nitrogen under Rapid Depressurization, *Proc. 4th Asian Thermophys. Properties Conf.*, 2(1995), 495-498.