

振動を受ける過熱水滴の突沸挙動

—振動強度の影響—

Ebullition Behavior of Water Droplets Vibrated under Transient Superheated Conditions during Test Runs : Effect of Intensity of Frequency

鈴木道義, 針谷安男, 戸田富士夫
SUZUKI Michiyoshi, HARIGAYA Yasuo and TODA Fujio

This paper presents an experimental study on the ebullition behavior of superheated water droplets vibrated under the transient superheated conditions during the test runs. In this study, the effect of intensity of vibration (the product of frequency and amplitude) on the disintegration of superheated water droplets due to the ebullition was considered. It was clarified from this study that the ebullition probability of those increased with a increase of the intensity of vibration.

Key Words: Superheating, Phase Change, Ebullition, Intensity of Vibration

1. はじめに

過熱液体の沸騰は極めて急激かつ爆発的であり、非常に危険なものである。このことは水冷却原子炉における一次冷却系破損事故時にみられる系圧力の低下に伴う急激な沸騰現象、あるいは金属溶解の過程で観察される接触蒸気爆発として知られる現象等に関係するものである。従って、過熱液体の沸騰開始のメカニズム、即ち核生成挙動の理解を深めることは過熱液体が関与する各種工業における安全操業を確立する上に大きな意義を持つものである。

過熱液体中における核生成は液体中に含まれる微小浮遊粒子、イオン、溶存ガス等の不純物、液体を保持する物質、液体がある過熱状態にさらされるまでの温度履歴等の影響を受けることが指摘されている^(1~7)。

著者等は以前に、大気圧下において上方の温度が高く、下方の温度が低いような定常的な温度分布を有する、水より密度の大きなシリコンオイルが入った垂直ガラスカラムの下端より水滴を注入すると、水滴は浮力によりカラム中を上昇して行き、ある温度に達すると突沸（核生成に基づく急激な沸騰）により崩壊する現象についての観察を実施した⁽⁸⁾。その際、水滴がカラム中を上昇して行く途中において、水滴表面より微小気泡が離脱する場合には、気泡が離脱する位置に応じて水滴が揺動する現象が観察された。このような揺動運動の観察された水滴の突沸時の温度は、それが観察されなか

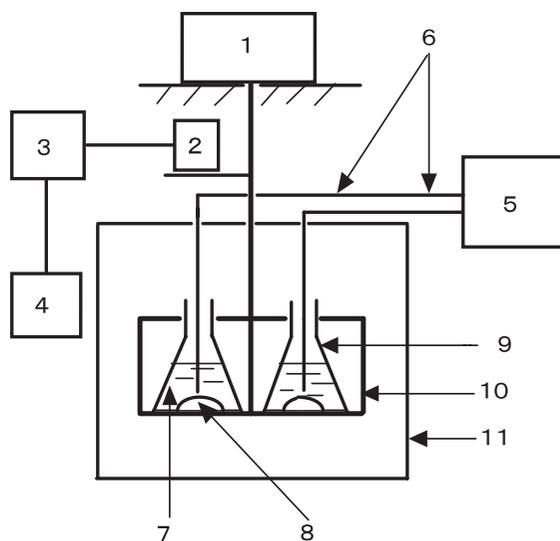
った水滴の突沸時の温度に比べて低下する傾向を有することが知られた。従って、水滴の突沸温度に与える微弱振動の影響は無視し得ないものがあると考えられる。

過熱状態にさらされた水滴に外部より振動を付加すると、水滴中に核生成に有効に働く微少不純物が存在する場合、その微少不純物と核萌芽との結合確率が増す結果として、核生成頻度が増大するため、水滴に振動を付加した場合、振動を付加しない場合に比べ水滴の突沸挙動が変化することが予測される。既に著者らは水滴の突沸挙動をコントロールするための方策を模索するための基礎的資料を得る目的で、大気圧下において静止水滴の温度が時間とともにほぼリニヤーに上昇する場合について、振動を受ける過熱水滴の突沸挙動に与える振動数の影響について報告した⁽⁹⁾。本報告は振動を受ける過熱水滴の突沸挙動に与える振動強度（振動数と振幅の積）の影響について、水滴中に含まれる微少不純物と核萌芽の結合確率への影響という観点から検討したものである。

2. 実験方法

図1に実験装置の概略を示す。清浄な硬質ガラス製三角フラスコ（容量50cm³）に平均孔径5 μ mのガラスフィルターでろ過し、十分に脱気した清浄な流動パラフィンを、三角フラスコの底面が十分に隠れるまで注入する。次いで、水道水をメンブランフィルターでろ過した後、十分に脱気したものを母液とする体積1 $\times 10^{-2}$ cm³の水滴をマイクロシリンジで作製し、三角フラスコ底面中央に置く。その後、この水滴上方約2cmの高さまで流動パラフィンを注入する。この三角フラスコを加熱槽内部に置いた、加振器に接続された三角フラスコ保持具にセットし、大気圧下（1022～994hPa）において、ある一定の加熱速度で加熱する。水滴温度が100 $^{\circ}$ Cに到達すると同時に三角フラスコ加振装置を作動させ、供試水滴に振動を加え始める。その後

も振動を加えつつ加熱を続け、水滴を過熱状態にさらし、水滴が突沸するときの温度及び水滴温度が100 $^{\circ}$ C経過後突沸するまでの時間を測定する。水滴突沸時の温度は水滴上方2mmの位置に挿入した熱



- | | | | |
|---|---------------------|----|------------------|
| 1 | Vibrator | 7 | Liquid Paraffine |
| 2 | Displacement Sensor | 8 | Water Droplet |
| 3 | Displacement Meter | 9 | Flask |
| 4 | Oscilloscope | 10 | Flask Holder |
| 5 | Recorder | 11 | Heating Vessel |
| 6 | Thermocouple | | |

Fig. 1 Schematic diagram of test apparatus

電対の指示値によった。予備実験によれば本実験の加熱速度範囲(3.8~6.3K/min)ではいずれの場合も、このようにして得られる温度と三角フラスコ底面に接触させた熱電対によって得られる温度との差異は1℃以内であった。

本実験に用いた加振装置は、モーター、無段変速器、偏心円板から構成されている。即ち、振動数は無段変速器によって、振幅は偏心円板の偏心量を変えることによってそれぞれ所定の値を得た。なお、振動数、振幅は三角フラスコ保持具支持棒に取り付けた変位センサーの出力をオシロスコープに導き測定した。本加振装置によって得られる振動波形はほぼサインカーブに近いものであった。

実験は下記に示す二つの場合について行った。一つは、水道水をポアサイズ $\sigma = 1.2 \mu\text{m}$ のメンブランフィルターでろ過して得られるものを母液とする体積 $v=1 \times 10^{-2} \text{cm}^3$ の水滴に、振幅 $a=1.22\text{mm}$ と一定に取り、振動数を0,10,15,20,25Hzと変化させた場合、もう一つは、水道水をポアサイズ $\sigma = 1.2 \mu\text{m}$ のメンブランフィルターでろ過して得られるものを母液とする体積 $v=1 \times 10^{-2} \text{cm}^3$ の水滴に、振動数20Hzと一定し、振幅 a を0, 0.22, 0.64, 0.80, 1.00mmと変化させた場合である。何れの実験条件においても供試水滴数は100個であり、振動数誤差は $\pm 2\%$ 以内、また振幅誤差は $\pm 3\%$ 以内であった。

3. 実験結果と考察

3.1 過熱水滴の突沸挙動

水道水をポアサイズ $\sigma = 1.2 \mu\text{m}$ のメンブランフィルターでろ過して得られるものを母液とする体積 $v=1 \times 10^{-2} \text{cm}^3$ の水滴に、振幅 $a=1.22\text{mm}$ と一定に取り、振動数を0,10,15,20,25Hzと変化させ、振動を受ける過熱水滴の突沸挙動を観察した。図2に振動数が25Hzの場合の過熱水滴の突沸温度と経過時間との関係を示す。次に、水道水をポアサイズ $\sigma = 1.2 \mu\text{m}$ のメンブランフィルターでろ過して得られるものを母液とする体積 $v=1 \times 10^{-2} \text{cm}^3$ の水滴に、振動数20Hzと一定し、振幅 a を0, 0.22, 0.64,

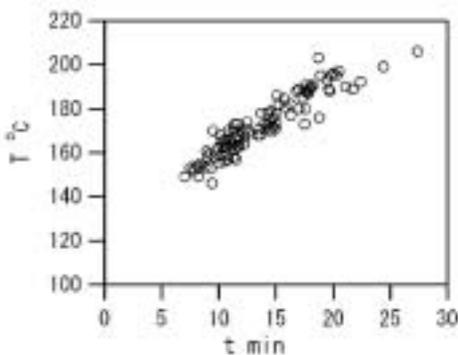


Fig.2 Relationship between ebullition temperature and elapsed time ($f=25\text{Hz}$, $a=1.22\text{mm}$)

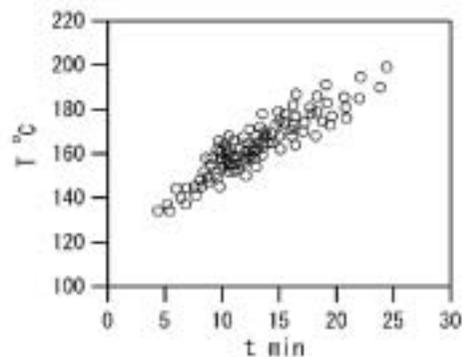


Fig.3 Relationship between ebullition temperature and elapsed time ($f=20\text{Hz}$, $a=1.00\text{mm}$)

0.80,1.00mmと変化させ、振動を受ける過熱水滴の突沸挙動を観察した。図3に振幅が1.00mmの場合の過熱水滴の突沸温度と経過時間との関係を例示する。図2～図3よりいずれの実験条件の場合においても個々の水滴の加熱速度が異なることが知られる。

3.2 無次元過熱指数 λ

図2～4から知られるように本実験においては水滴個々の加熱速度は相違する。即ち、それぞれの水滴によってある温度への水滴保持時間、つまり水滴温度が単位温度変化するのに要する時間が異なる。核生成論⁽⁸⁾から明らかなように過熱水滴の突沸挙動は、同一温度であれば水滴保持時間の影響を受け、保持時間が長い程突沸は起こり易い。したがって、水滴個々の加熱速度が相違する場合、過熱水滴の突沸挙動を評価するには突沸温度 T あるいは100℃経過後の時間 t の何れもそれ単独では不十分なものと考えられる。そこで水滴が突沸するまでの温度履歴を考慮した、新しいパラメータを導出する。

今、次のような物理量を定義する。 $J_v(T)$:核生成頻度 $1/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 、 N_0 :供試水滴数、 $N(T)$:温度 T に至るまで突沸せずに残存している水滴数、 v :水滴体積 cm^3 、 t :水滴温度が大気圧下において沸点に達してから突沸するまでの経過時間 s 。

さて、多数個の水滴がある一定の加熱速度 V_T で加熱し、水滴を過熱状態にさらした場合を考える。この場合、個々の水滴の突沸は独立に生起するものとし、水滴の突沸挙動は一次の化学反応速度式に従うものと仮定すれば次式が成立する。

$$dN(T)/N(T) = -v \cdot J_v(T) \cdot dt = -v \cdot A \cdot \exp(B \cdot T) \cdot dT/V_T \quad (1)$$

ここで、 $J_v(T) = A \cdot \exp(B \cdot T)$ であり、 A 、 B は定数であるものとする。また、 $V_T = dT/dt$ である。

大気圧下における水の沸点を基準温度 T_0 とすると、 $J_v(T_0) = A \cdot \exp(B \cdot T_0)$ の関係が成立するから次式が得られる。

$$dN(T)/N(T) = -v \cdot J_v(T_0) \cdot \left[\exp\left\{B(T - T_0)\right\} / V_T \right] \cdot dT \quad (2)$$

上式を $T \sim T + \Delta T$ の区間で積分し、 $B \cdot \Delta T \ll 1$ を仮定すれば、次式が得られる。

$$\ln\{N(T + \Delta T)/N(T)\} = -\left\{ v \cdot J_v(T_0) / V_T \right\} \cdot \exp\{B(T - T_0)\} \cdot \Delta T \quad (3)$$

また、 $N(T + \Delta T) - N(T) = \Delta N$ (< 0)と置けば、式(3)の左辺は次式で表される。

$$\ln\{N(T + \Delta T)/N(T)\} = \ln[\{\Delta N/N(T)\} + 1] \quad (4)$$

ところで、 $T \sim T + \Delta T$ の区間の水滴の突沸確率 P は $P = -\Delta N/N(T)$ であるから、式(3)、(4)から次式を得る。

$$P = 1 - \exp\left\{ -v \cdot J_v(T) \cdot \Delta T / V_T \right\} \quad (5)$$

ここで、 $\Delta T = 1 \text{ K}$ とすれば、 $1/V_T$ は単位温度変化に必要な時間 Δt_u と考えられる。従って、水滴の突沸確率 P は次式で表される。

$$P = 1 - \exp\left\{-v \cdot J_v(T) \cdot \Delta t_u\right\} \quad (6)$$

式(6)において、前述のように $J_v(T)$ は $\exp(T)$ に比例するから、結局水滴の突沸確率 P は $v \cdot \exp(T) \cdot \Delta t_u$ の値に比例すると考えられる。なお水滴体積が一定であれば水滴の突沸確率 P は $\exp(T) \cdot \Delta t_u$ の値に比例することになる。

以上の考察から、過熱水滴の突沸挙動を整理するに当たり、次式で定義される無次元過熱指数 λ を採用する。

$$\lambda = [\exp(T/T_0)] \cdot [(\Delta t_u / \Delta t_{u0})] = [\exp(T/T_0)] \cdot [(V_{T0} / V_T)] \quad (7)$$

ここで、 Δt_{u0} : 単位温度変化に要する基準時間=1 min、 V_{T0} : 基準加熱速度=1 K/minである。

3.3 最多突沸無次元過熱指数 $\lambda_{m.p.}$

ある無次元過熱指数 λ における過熱水滴の突沸度 $\alpha(\lambda)$ を、単位 λ 変化あたりの突沸水滴数とその時点で突沸せずに残存している水滴数の比として定義すれば、 $\alpha(\lambda)$ は次式で表わされる。

$$\alpha(\lambda) = \left[\frac{1}{N_0} \cdot \frac{dN'(\lambda)}{d\lambda} \right] \quad (8)$$

ここで $N'(\lambda)$ は無次元過熱指数が λ に到達するまでに突沸した水滴数である。

ある λ において単位変化 λ あたりの突沸水滴数 $\alpha(\lambda) [N_0 - N'(\lambda)]$ が最大になる場合、その λ を最多突沸無次元過熱指数 $\lambda_{most\ probable}$ (以後、 $\lambda_{m.p.}$ と略記する)と定義する。即ち、次式を満足する λ を $\lambda_{m.p.}$ とする。

$$d[\alpha(\lambda) \cdot \{N_0 - N'(\lambda)\}] / d\lambda = 0 \quad (9)$$

今、ある λ に到達するまでに突沸せずに残存している水滴数 $N_0 - N'(\lambda)$ と供試水滴数 N_0 の比として定義するものを水滴の残存率 $p(\lambda)$ とすれば、単位変化 λ あたりの突沸水滴数 $\alpha(\lambda) [N_0 - N'(\lambda)]$ は次のように表わすことができる。

$$\alpha(\lambda) \cdot \{N_0 - N'(\lambda)\} = dN'(\lambda) / d\lambda = -N_0 \cdot dp(\lambda) / d\lambda \quad (10)$$

式(9)、(10)より $\lambda_{m.p.}$ は次式を満足することが知られる。

$$d[\alpha(\lambda) \cdot \{N_0 - N'(\lambda)\}] / d\lambda = d\{-N_0 \cdot dp(\lambda) / d\lambda\} / d\lambda = -N_0 \cdot d^2 p(\lambda) / d\lambda^2 = 0 \quad (11)$$

故に、式(11)を満足する $\lambda_{m.p.}$ は図4(振動数15Hz、振幅1.22mmの場合)から知られるように、 $p(\lambda)$ 曲線の変曲点である $p(\lambda) \approx 0.5$ にほぼ対応する λ であることから、 $p(\lambda) = 0.5$ のときの λ の値を $\lambda_{m.p.}$ と定めることにする。

3.4 最多突沸無次元過熱指数 $\lambda_{m.p.}$ に及ぼす振動強度 af の影響

過熱下に置かれた水滴の突沸確率は振動の影響を受ける。本実験のように供試水滴に付加する振動数、振幅が比較的少ない場合、過熱下に置かれた水滴の突沸挙動に及ぼす振動の効果は、供試水滴中に存在する核生成に有効に働く不純物と核萌芽との遭遇確率を増大させる効果、すなわち攪拌効果と考えられる。その結果核生成頻度が増大し水滴の突沸が起りやすくなるものと思われる。攪拌効果の大きさを表す1つの指標と考えられる振幅 a と振動数 f の積 af をパラメータにとり、 $\lambda_{m.p.}$ と af の関係

について考察する。今後、 af を今後振動強度と呼ぶことにする。

水道水をポアサイズ $\sigma = 1.2 \mu\text{m}$ のメンブランフィルターでろ過して得られるものを母液とする体積 $v = 1 \times 10^{-2} \text{cm}^3$ の水滴に振動を付加する際に、振幅 a を 1.2mm と一定に取り、振動数を $0, 10, 15, 20, 25 \text{Hz}$ と変化させたときの残存率を図5に、水道水をポアサイズ $\sigma = 1.2 \mu\text{m}$ のメンブランフィルターでろ過して得られるものを母液とする体積 $v = 1 \times 10^{-2} \text{cm}^3$ の水滴に、振動数 20Hz と一定し、振幅 a を $0, 0.22, 0.64, 0.80, 1.00 \text{mm}$ と変化させたときの残存率を図6に示す。図5、6より、先に定義した最多突沸無次元過熱指数 $\lambda_{m.p.}$ を求め、図7に示す。

図7より $\lambda_{m.p.}$ は振動強度の増加とともに指数関数的に減少することが知られる。このことは次のように考えられる。水滴の突沸挙動に及ぼす振動の効果は攪拌効果、つまり供試水滴中に存在する不純物と突沸を引き起こす引き金となる突沸核萌芽との合体確率を増大させる効果と考えられる。すなわち、振動数が増大すると水滴中に存在する不純物と突沸核萌芽との合体確率の突沸が起こりやすくなるものと思われる。

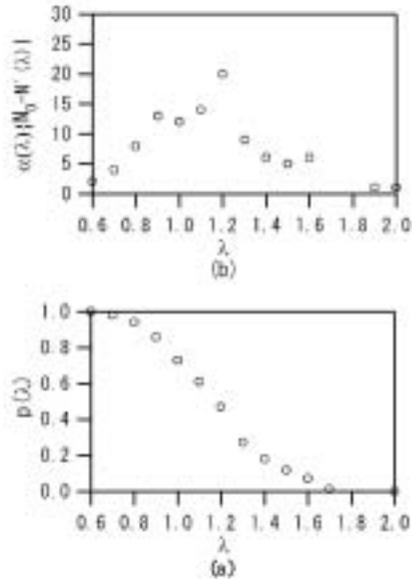


Fig.4 Definition of $\lambda_{m.p.}$ ($f=15\text{Hz}$, $a=1.22\text{mm}$)

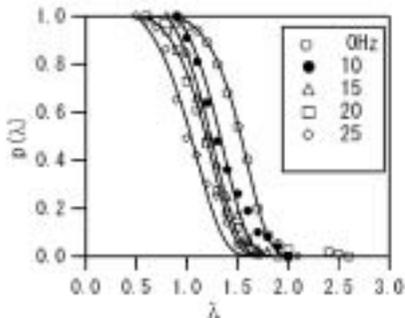


Fig.5 Effect of frequency number on fraction of superheated water droplets remained without ebullition ($a=1.22\text{mm}$)

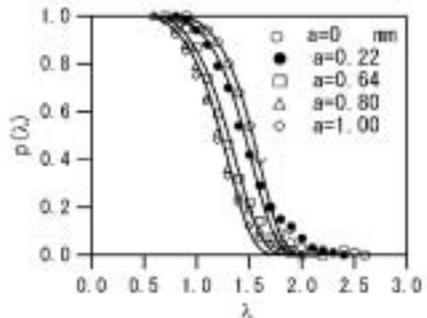


Fig.6 Effect of frequency number on fraction of superheated water droplets remained without ebullition ($f=20\text{Hz}$)

4. おわりに

水道水をポアサイズ $\sigma=1.2\mu\text{m}$ のメンブランフィルターでろ過して得られるものを母液とする体積 $v=1\times 10^{-2}\text{cm}^3$ の水滴に、振幅 $a=1.22\text{mm}$ と一定に取り、振動数を0,10,15,20,25Hzと変化させた場合及び水道水をポアサイズ $\sigma=1.2\mu\text{m}$ のメンブランフィルターでろ過して得られるものを母液とする体積 $v=1\times 10^{-2}\text{cm}^3$ の水滴に、振動数20Hzと一定し、振幅 a を0, 0.22, 0.64, 0.80, 1.00mmと変化させ場合について、振動を受ける過熱水滴の突沸挙動を観察した。

その結果、本論文において定義した最多突沸無次元過熱指数 $\lambda_{m.p.}$ は過熱水滴の突沸の起こりやすさを表わす指標として適切なものであり、 $\lambda_{m.p.}$ は振動強度の増加とともに指数関数的に減少することを明らかにした。

参考文献

- (1) Fisher, J.C., The Fracture of Liquids, J.Applied Physics, 19 (1948), pp.1062~1068.
- (2) Bander, M. and Hengstenberg, D., Bubble Nucleation in n-Pentane, n-Hexane, n-Pentane + Hexadecane Mixtures, and Water, J. Physical Chemistry, 75:23 (1971), pp.3613~3619.
- (3) Apfel, R.E., Vapor Nucleation at a Liquid-Liquid Interface, J. Chemical Physics, 54-1 (1971), pp.62~63.
- (4) 鈴木、西脇、過熱水滴の突沸温度を支配する因子、日本機械学会論文集、47-416 (1981)、pp.676~683。
- (5) 鈴木、針谷、銅板上に置かれた過熱水滴の突沸挙動に及ぼす供試面洗浄法の影響、宇都宮大学教育学部紀要、第50号、第2部 (2000-3) ,pp.43~49.
- (6) 鈴木、針谷、過熱水滴の突沸挙動に及ぼす供試母液活性炭洗浄条件の影響、日本産業技術教育学会誌、42-3 (2000-8)、pp.115~121.
- (7) 鈴木、針谷、戸田、固体面上に置かれた過熱水滴の核生成に及ぼす供試面表面粗さの影響、日本産業技術教育学会誌、44-1 (2002-2)、pp.21~27。
- (8) 鈴木、西脇、小林、秋山、過熱液滴の核生成に関する解析と実験、日本機械学会講演論文集、No.740-17 (昭和49)、pp.153~156。
- (9) 鈴木、針谷、戸田、振動を受ける過熱水滴の突沸挙動—振動数の影響—、宇都宮大学教育学部紀要、第57号、第2部 (2007-3) ,pp.37~43.

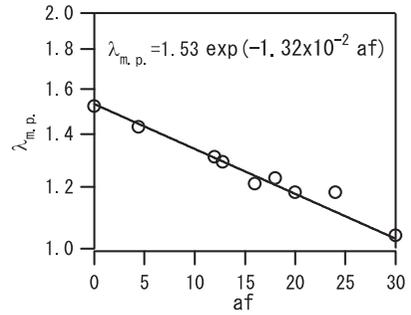


Fig.7 Relationship between $\lambda_{m.p.}$ and number of a.f

