

周期的圧力変動を加えたときの サブクール膜沸騰蒸気膜厚さ変動の計算

Simulation on Vapor Film Thickness in Sucooled Film Boiling under a
Cyclic Pressure Wave

高島 武雄

Takeo TAKASHIMA

1. はじめに

磁気特性や材料強度特性などにすぐれた性質を示すアモルファス(非晶質)金属を製造するためには、熔融金属を結晶化する以上の速度で急冷してやる必要がある。アモルファス粉末の作製法のひとつに、蒸気爆発の利用が提案されている^(1,2)。蒸気爆発では、膜沸騰の崩壊後、熔融金属は微粒化を伴いながら急冷される。しかしほとんどの金属では、膜沸騰が崩壊する温度 (Minimum Film Boiling Temperature 最小膜沸騰温度)は、融点より低い。従って、熔融金属を液体の状態の水と直接接触させるためには、高温液がなるべく高温の状態蒸気膜を破壊してやる必要があり、このような条件が実現されることで、より高速冷却が可能になる。

蒸気爆発ははずやビスマスなどの低融点金属では自発的に発生することが分かっている。古谷らは⁽³⁾、蒸気爆発のトリガリングにおける蒸気膜の安定性解析について、放射も考慮した基礎式から解析を行い、水温が70℃以上では、高温液滴の温度によらず、蒸気膜は安定であることなどを示した。このように自発的な蒸気爆発の発生については水温の影響が大きい。

一方、外部擾乱によって膜沸騰蒸気膜を破壊して蒸気爆発を発生させるためには、立ち上がり時間の短い衝撃的で、しかも比較的大きな圧力波が必要とされている。このような条件を満たす方法として、エクプローディングワイヤや衝撃波管によって発生した圧力パルスを加えることが行われてきた。

さらに、機械部品の熱処理においては、熱伝達率の小さい膜沸騰における熱伝達を促進するために、攪拌や超音波照射などが試みられているが、外部擾乱の性質と膜沸騰、とりわけ蒸気膜厚さの変化の関係を明らかにした研究は見あたらない。

そこで本研究では、蒸気膜の固有振動数に相当する、比較的小さい圧力波を加えて共振現象を生じさせることによる蒸気膜の挙動を計算した。この計算は、少ないエネルギーによって膜沸騰蒸気膜の破壊の可能性をめざすものである。解析は、球形または端部半球状の高温物質まわりの膜沸騰蒸気膜に、周期的圧力変動を加えたときの蒸気膜厚さの変動を計算したものである。

おもな記号

f : 周波数 (Hz)
 h : 熱伝達率 (W/m²K)
 h_{fg} : 蒸発潜熱 (J/kg)
 m : 質量 (kg)
 p : 圧力 (Pa)
 p_m : 振幅 (Pa)
 Q : 熱流量 (W)
 R : 高温物体半径 (m)
 R_v : 気体定数 (J/kgK)
 r : 蒸気泡半径 (m)
 t : 時間 (s)
 T : 温度 (℃)
 δ : 蒸気膜厚さ (m)
 λ : 熱伝導率 (W/mK)
 ρ : 密度 (kg/m³)

添字

a : 大気
 l : 水
 sat : 飽和
 v : 蒸気

2. 蒸気膜破壊解析

2.1 解析モデルと基礎方程式

図1に解析モデルを示す。

流れのない低温液体中に半径Rの球形の高温物

体がサブクール膜沸騰状態で静止している。高温球体は厚さ $\delta = r - R$ の蒸気膜に覆われている。

【仮定】

解析に当たっては次のような仮定を設ける。

- (1) 蒸気膜中の蒸気は理想気体で状態方程式に従う。
- (2) 高温物体の温度は一様かつ一定とする。
- (3) 運動方程式におよぼす表面張力や粘性力の効果は無視する。
- (4) 気液界面での乱れはなく、蒸気膜厚さは一様とする。
- (5) 蒸気膜には圧力分布がなく一様とする。
- (6) 蒸気膜界面では、蒸気は飽和温度、飽和圧力の状態とする。
- (7) 今回の解析では放射伝熱を考慮に入れない。
- (8) 蒸気膜内の流動は考慮しない。

【解析】

蒸気膜の運動方程式は気泡の運動方程式から以下のようになる。

$$\frac{d^2 r}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 = \frac{p_v - p}{\rho_l} \quad (1)$$

エネルギー式は高温物体から蒸気膜に流入する熱流量 Q_{in} と、蒸気膜から熱伝達で流出する熱流量 Q_{out} を考えると以下のようになる。

$$Q_{in} = -\lambda_v \frac{dT}{dr} A = -4\pi r^2 \frac{\lambda_v}{r-R} (T_h - T_{sat}) \quad (2)$$

$$Q_{out} = 4\pi r^2 h (T_{sat} - T_c) \quad (3)$$

両式の差が相変化に費やされる熱流量となるので、蒸発(あるいは凝縮)速度は次式となる。

$$\frac{dm_v}{dt} = \frac{4\pi r^2}{h_{fg}} \left\{ \frac{\lambda_v}{r-R} (T_h - T_{sat}) - h (T_{sat} - T_c) \right\} \quad (4)$$

ここで、 h は相変化に伴う熱伝達率である。

蒸気膜内の蒸気は理想気体とすると、状態方程式は次式となる。このときの p_v は任意の圧力である。

$$p_v = \rho_v R_v T_v \quad (5)$$

ここで、蒸気膜温度は $T_v = \frac{T_h + T_{sat}}{2}$ とする。

蒸気膜の気液界面では Clausius-Clapeyron の式

が適用でき、式(5)の状態式から蒸気圧力と蒸気飽和温度の関係は次式となる。このときの p_v は飽和圧力である。

$$\frac{dp_v}{p_v} = \frac{h_{fg} dT_{sat}}{R_v T_{sat}^2} \quad (6)$$

高温液の位置の水の圧力を p_a 、振幅を p_m 、振動数を f とすると、式(1)中の蒸気膜に加えられる外部圧力変動は次式となる。

$$p = p_a + p_m \cos 2\pi f t \quad (7)$$

振動数 $f=0\text{Hz}$ は、ステップ状の圧力変化となることを意味する。

式(1)(4)(5)(6)から、ルンゲ・クッタ法によって数値的に、蒸気膜界面の位置 r 、蒸気膜圧力 p_v 、蒸気膜平均温度 T_v 、蒸気膜内蒸気質量 m_v を求める。初期条件は、 $r=r_0$ 、蒸気界面速度 $dr/dt=0$ 、 $m_v=m_{v0}$ 、 $p_v=0.1\text{MPa}$ 、 $T_{sat}=373.2\text{K}$ で計算を行った。

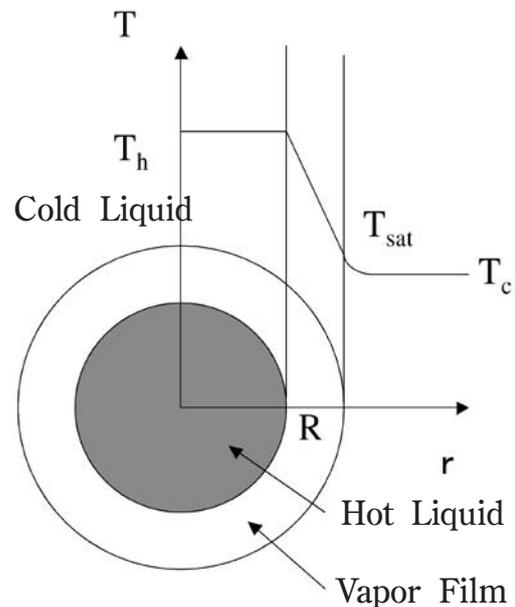


Fig.1 Schematic of the Analytical Model

2.2 実験装置(構想段階)

図2に構想段階の実験装置の1例を示す。まだ実験を行っていないが、スピーカーなどの機器の準備ができれば実験は可能な状態である。

実験はいかの手順で行う。あらかじめ加熱した半球状伝熱面を水に浸漬して膜沸騰状態とする。水中スピーカーから発振器で発信した波を、増幅器で増幅し伝熱面に当てる。伝熱面には熱電対が設置してあり、温度の時間変化を測定することができる。

半球状伝熱面を取り除き、音波を発生しているところに、熔融金属液滴を滴下すれば、熔融金属液滴まわりの膜沸騰に関する実験が可能となる。

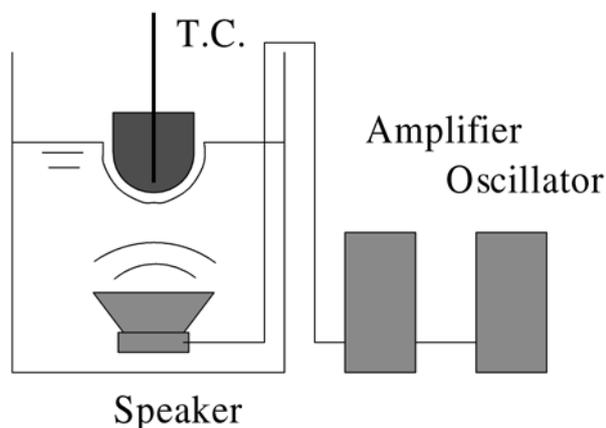


Fig.2 Planning of Experimental Apparatus

3. 解析結果

3.1 解析モデルの検証

本解析モデルの妥当性を確認するため、既に報告されている解析⁽⁴⁾と比較を行い検証する。

検証モデルは、直径7mm、温度2000Kの熔融酸化鉄液滴が水中で、初期蒸気膜厚さが70 μ mの膜沸騰状態にあるところに、0.7MPaの圧力波を与えたときの蒸気膜厚さの変化を計算したものである。

図3はCorradini⁽⁴⁾の結果(●印)と本解析結果(実線)を比較したものである。Corradini⁽⁴⁾の計算は、Nelsonら⁽⁵⁾の酸化鉄液滴による実験結果を計算したものである。

図2によると20 μ sまでは両計算結果は非常によくあっている。Corradiniの計算では、26 μ sで最小値が約20 μ mとなる。本計算では、熱伝達率を

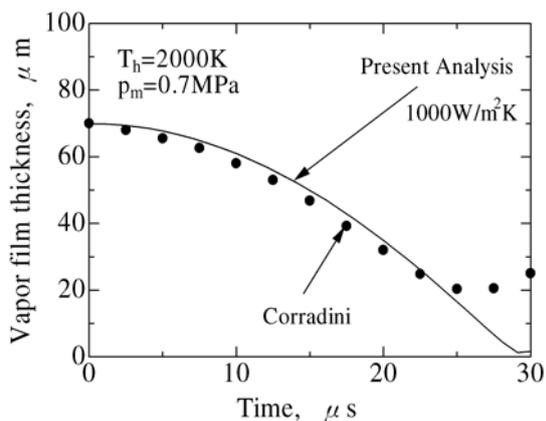


Fig.3 Comparison between Corradini's Calculation Results and Present Analysis

1000W/m²Kとして解析を行った。その結果、29 μ s付近で数 μ mの厚さの極小値となる。実際、実験では蒸気膜が破壊され蒸気爆発が発生している。

このように極小値付近の数値が異なるものの、両計算結果は比較的よく一致していると判断される。

3.2 初期蒸気膜厚さの計算

球まわりの膜沸騰時の初期蒸気膜厚さ δ は、Grigorievら⁽⁶⁾の整理式によって飽和膜沸騰熱伝達率 h_{c0} を計算して、サブクール度の影響は西尾ら⁽⁷⁾の式からサブクール膜沸騰熱伝達率 h_{ft} として求める。

蒸気膜厚さ δ は、蒸気熱伝導率を熱伝達率で割って次式で求める。

$$\delta = \frac{\lambda_v}{h_{ft}} \quad (8)$$

図4膜沸騰蒸気膜厚さの計算結果を光学的に測定した直径15mmの場合の阿部ら⁽⁸⁾、直径30mmの場合の高島ら⁽⁹⁾や菊地ら⁽¹⁰⁾の実験結果、直径25.2mmのFletcherら⁽¹¹⁾の解析結果などと比較した結果を示した。

実験値は温度によって大きく変化しているに対して、本計算値は高温物質の温度にあまり依存しない傾向を示している。低温部では厚めに評価して、高温部では薄めに評価すると言える。300~500 $^{\circ}$ Cのデータは実験値や他の解析値とほぼ一致しており、初期蒸気膜厚さを評価するのに適切と判断できる。

図5は高温物質の半径と蒸気膜厚さの関係の計

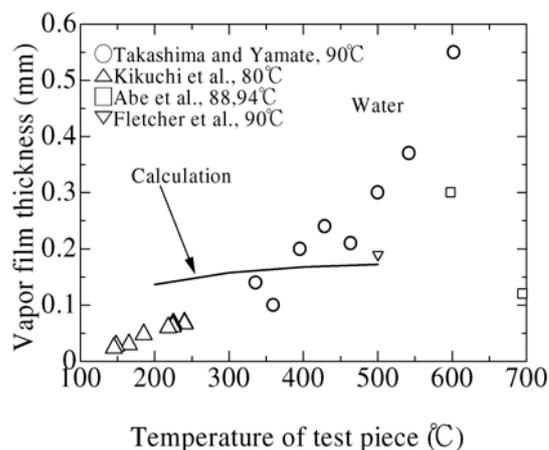


Fig.4 Comparison between Experimental Data and Present Analysis

算結果を示す。T_h=873K、T_c=293kと高サブクール度の条件で計算した。半径5mm以下で顕著に薄くなる傾向が見られる。蒸気爆発時の高温液滴は半径が5mm以下となることが多い。概ねδ=0.1mm程度とみなしてよい。

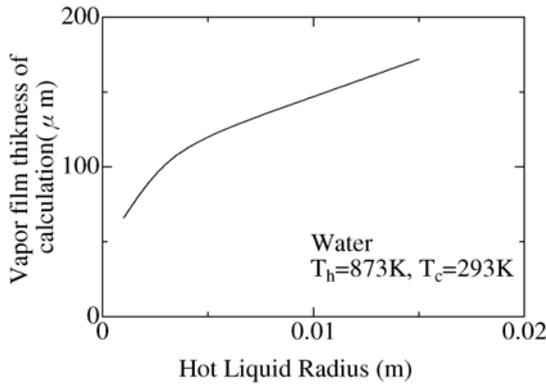


Fig.5 Vapor film thickness around Hot Sphere

3.3 蒸気膜厚さ変動時の固有振動数

膜沸騰蒸気膜周囲の圧力pがp_m=10kPaだけのステップ状に上昇したとき (f=0Hzとして計算) の蒸気膜厚さの時間変化を計算することで、蒸気膜の固有振動数を求めることができる。

図6に計算結果の例を示した。計算はT_h=873K、p_m=10kPa、δ=0.1mm、R=15mmの条件で行った。相変化を伴う熱伝達率h=500,1000,2000W/m²Kの場合について計算した。h=500,1000W/m²Kでは、蒸気膜が徐々に厚くなる。逆に2000W/m²Kでは、薄くなる。従って適正は熱伝達率は、1800W/m²K程度と推定できる。これらの計算結果から、蒸気膜の固有振動数は約1500Hzとなることが分かる。蒸気膜を破壊するために外部から同じ周波数の圧力波を加え、共振を起こすことで、比較的小さい振幅で破壊を実現できる可能性はある。

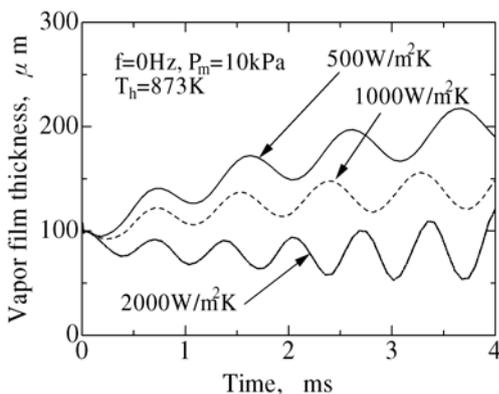


Fig.6 Natural Frequencies of Vopar Film

3.4 伝熱面直径と蒸気膜の固有振動数

蒸気膜厚さδ=0.1mmとして、伝熱面直径と蒸気膜の固有振動数の関係を計算した。結果をFig.7に示した。T_h=873K、δ=0.1mm、p_m=1kPaの条件で計算を行った。直径が小さくなるにつれて固有振動数が大きくなることが分かる。

最小自乗法により関係式を求めると次式となる。

$$f_n = 6.4 \times 10^3 d^{-0.456} \quad (9)$$

ここで、f_nは固有振動数[Hz]、dは伝熱面直径[mm]である。

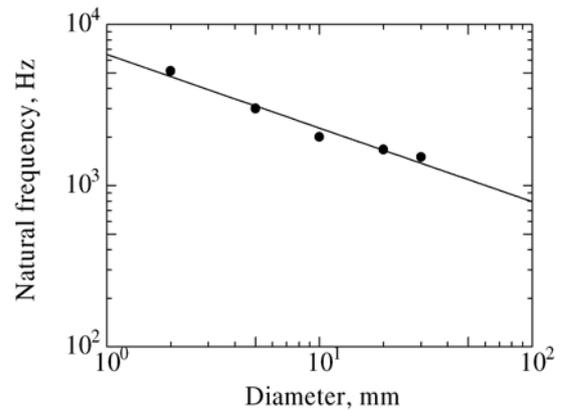


Fig.7 Natural Frequencies of Vopar Film with Hear Transfer Body Diameter

3.5 周期的変動時の計算一周波数の影響

伝達率をh=1750W/m²Kとして、蒸気膜厚さの変動におよぼす圧力波の周波数の影響を調べてみる。

計算は図6の場合と同様、T_h=873K、p_m=10kPa、δ=0.1mm、R=15mmで、f=0、200、1500、3000Hzについて行った。

図8に計算結果を示す。f=3000Hzでは、f=0、200Hzの場合より、蒸気膜厚さの変動が押さえられる。このように固有振動数と異なる周波数では

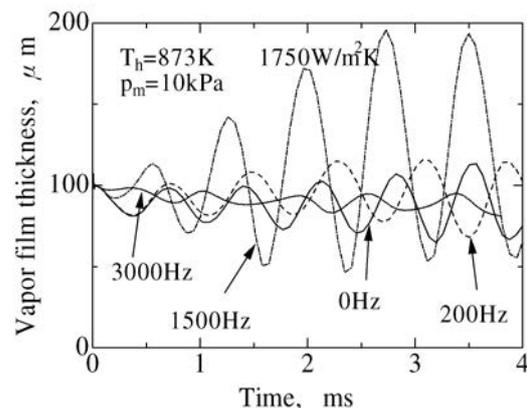


Fig.8 Effect of Oscillation Frequency of Pressure Waves of Vapor Film Thickness

蒸気膜厚さの大きな変動と、その結果起こるであろう蒸気膜の破壊は期待できない。

$f=1500\text{Hz}$ では、蒸気膜厚さが約1/2から2倍の範囲で大きく変動しているのが分かる。圧力波を付与してわずか2ms以降で大きく変動する。しかし、単純なばね系と異なり、蒸気膜厚さが無限大に発散する傾向は見られない。

3.6 周期的変動時の計算－振幅の大きさの影響－

蒸気膜厚さの変動におよぼす圧力波の振幅の大きさの影響を調べるため、図6、7の場合と同様、 $T_h=873\text{K}$ 、 $\delta=0.1\text{mm}$ 、 $R=15\text{mm}$ 、 $f=1500\text{Hz}$ の条件で、 $p_m=1\text{kPa}$ 、 10kPa 、 0.1MPa について計算を行った。

図9に計算結果を示した。1kPaでは顕著な厚さの変動は期待できそうもない。ただし、さらに時間が経過したとき、どのような挙動を示すかは、興味のあるところである。0.1MPaという振幅にすると、非常に激しい変動を示す。最初の加圧で厚さが約40 μm まで減少するが、その後すぐに反発して450 μm まで増加する。2ms付近では薄くなった状態が1周期継続するという、不規則な変動を示すことが分かった。

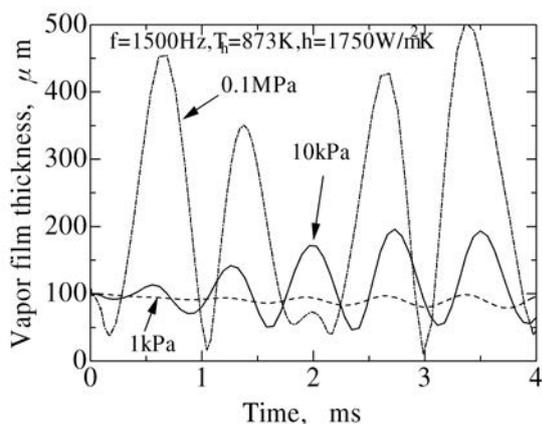


Fig.9 Effect of Oscillation Amplitude of Pressure Waves on Vapor Film Thickness

3.7 伝熱量の計算

膜沸騰蒸気膜に超音波を加えると、蒸気膜が破壊されることはないが、熱伝達率が向上し伝熱が促進されることが知られている⁽¹²⁾。ここでは、周期的な圧力変動を加えた場合の伝熱促進効果を調べてみた。蒸気膜厚さの変動による放熱量の変化を計算した。

図10は圧力場がステップ状に変化したとき(0Hz)と、周期的に変化したとき(1500Hz)の積算

伝熱量を、蒸気膜厚さが一定の場合と比較したものである。

蒸気膜厚さが変動しても伝熱量の積算値には、ほとんど変化が見られない。圧力をステップ状に増加させたときが最も大きくなるが、その促進量はわずかである。蒸気膜厚さが変動しても伝熱促進の効果は期待できないことが明らかになった。

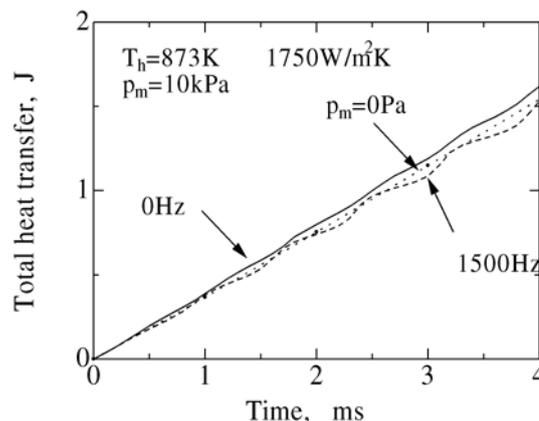


Fig.10 Effect of Oscillation Frequency of Pressure Waves on Heat Transfer

4. まとめ

膜沸騰状態の高温物体に圧力波を与えたときの蒸気膜厚さの変化を計算した。

- (1) 従来の計算結果とよく一致することから解析の健全性を確認した。
- (2) 固有振動数と等しい圧力変動を加えると短時間で蒸気膜厚さが大きく変動することが確認できた。
- (3) 音波のような比較的小さい振幅の圧力波によって蒸気膜を破壊し、高温状態で液液の直接接触により急速冷却を実現できる可能性が確認できた。

文献

- (1) 秋吉亮・西尾茂文・棚澤一郎、溶融金属と水との熱的相互作用を応用した急速凝固粒の作製に関する研究、日本機械学会論文集(B編)56-521(1990), 94-100.
- (2) Masahiro Furuya and Izumi Kinoshita, Effects of polymer, surfactant, and salt additives to a coolant on the mitigation and the severity of vapor explosions, Experimental Thermal and Fluid Science, Volume 26, Issues 2-4, June 2002, 213-219.

- (3)古谷正裕・ほか2名、蒸気爆発のトリガリングにおける蒸気膜の線形安定性解析、日本機械学会論文集(B編)、68-675(2002-11)、3176-3182.
- (4)M.L. Corradini、Phenomenological Modeling of the Triggering Phase of Small-Scale Steam Explosion Experiments, Nuclear Science And Engineering, 78, 154-170(1981).
- (5)L.S.Nelson and P.M. Duda, Steam Explosions of Molten Iron Oxide; Easier Initiation at Small Pressurizations, Nature 296 (1982),844-846.
- (6)Grigoriev, V.A.・ほか2名、Proc. Int. Heat Transfer Conf. 7th, Munchen(1982), FB36.
- (7)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)、日本機械学会論文集. B編 52-476(1986)、1811-1816.
- (8)阿部豊・栃尾大輔、高温粒子表面上の蒸気膜崩壊に関する研究(第2報、微視的崩壊挙動におよぼすサブクーリングの影響)、日本機械学会論文集(B編)、66-642(2000-2)、633-639.
- (9)高島・山手、逆溶解性高分子水溶液の最小膜沸騰温度に関する研究、日本機械学会論文集(B編)、69-682(2003-6)、1433-1438.
- (10)菊地義弘・ほか2名、サブクール膜沸騰下限界に関する研究、日本機械学会論文集(B編)、54-506(1988)、2830-2837.
- (11)D.F.Fletcher and M.Siguadson, The Effect of Coolant Viscosity on Natural Convection Film Boiling, Proceedings of the International Seminar on Vapor Explosions and Explosive Eruptions, (1997)131-137.
- (12) 飯田嘉宏、筒井健太郎、超音波による膜沸騰伝熱の促進：第1報、白金細線を用いての一般的挙動に関する実験、日本機械学会論文集(B編)、55-509(1989)、194-199.

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