

逆円錐台まわりの膜沸騰熱伝達の実験

豊田 香¹

要旨：底面と側面を有する有限垂直円柱からの膜沸騰熱伝達は、底面と側面の面積およびその接続される角度の影響を受ける。本研究ではこれらが有限垂直円柱からの膜沸騰熱伝達に及ぼす影響を調べるためにまず、上面直径、底面直径および長さがそれぞれ48 mm、24 mmおよび48 mmの純アルミ製逆円錐台に関し、静止した大気圧下の純水を用いて膜沸騰実験を行った。逆円錐台を電気炉でおよそ560 °Cに加熱し、一定温度に維持された純水に深さおよそ150mmまで浸漬し冷却した。逆円錐台を集中定数系であると仮定し、逆円錐台中心の温度履歴から冷却曲線および沸騰曲線を描くことで、逆円錐台からの膜沸騰熱伝達特性を明らかにした。

キーワード：膜沸騰，逆円錐台

1. はじめに

三次元物体まわりの膜沸騰熱伝達は、高温物体の冷却の初期段階で起こるため多くの分野の研究者から興味を持たれている。膜沸騰熱伝達に関しては伝熱面形状、姿勢および寸法によってその特性が変化するため、水平円筒、垂直円筒、上向き平面、下向き平面および球など単一の伝熱面を対象に実験的および解析的にこれまで研究が行われてきたが、これらの結果を用いても、境界条件や蒸気膜の形状などが不明であるため、三次元物体まわりの膜沸騰熱伝達の予測には不十分である。

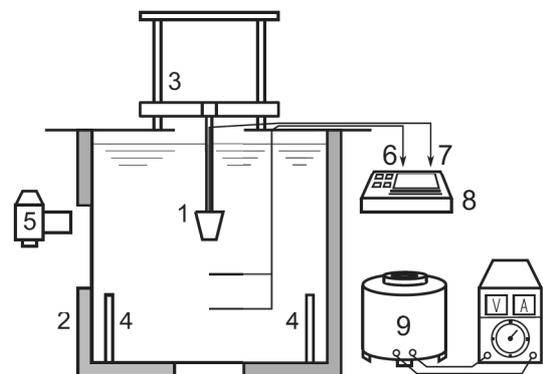
三次元物体の円柱底面と側面との接続部においては、その形状によって蒸気膜の形状、蒸気膜の厚さおよび周囲の流体の流れなどが変化し膜沸騰伝熱や下限界に大きな影響を与えることがわかっている。例えば、平滑な界面を有する膜沸騰の理論解析において、下向き水平面の中心や球の最下点部における蒸気膜厚さは有限である一方で、下向き円錐の最下点部における蒸気膜厚さはゼロとなる。さらに、伝熱面に沿う蒸気流れの駆動力は、有限下向き水平面の場合は半径方向の蒸気膜厚さの変化による蒸気膜内の圧力差である一方で、下向き半球面、傾斜面や垂直面の場合は液体と気体の密度差である。このように、円柱の底面形状と側面との組み合わせは蒸気膜内の蒸気流れを変化させるため、膜沸騰伝熱において重要な要因であることは明らかである。

三次元物体まわりの膜沸騰熱伝達のメカニズムの解明には、これらの蒸気流れの違いが膜沸騰熱伝達へ及ぼす影響を調べる必要がある。本実験では、底面と側面とがなす角度が膜沸騰熱伝達に及ぼす影響を調べるため、まず、上面直径、底面直径および長

さがそれぞれ48 mm、24 mmおよび48 mmに固定した純アルミ製逆円錐台に関し、静止した大気圧下の純水を用いて膜沸騰実験を行い膜沸騰熱伝達特性を調べる。

2. 実験装置および実験方法

Fig.1に本研究で使用した実験装置の概略図を示す。装置は主に沸騰槽、加熱装置、昇降装置、温度測定装置および沸騰現象観察装置で構成されている。沸騰槽はステンレス製で長さ400 mm、幅400 mmおよび高さ450 mmの大きさを有する容器である。沸騰槽の2つの側面および底面の中央部に沸騰現象の目視観察および動画撮影ができるように3つの観察窓が設けられている。バルク水には大気圧下の純水を用いた。沸騰槽の底面にはバルク水を昇温するため



1. Test cylinder
2. Boiling bath
3. Lifting device
4. Heater
5. Digital camera
6. K-type thermocouple
7. K-type thermocouple
8. Data logger
9. Electric furnace

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

1 舞鶴工業高等専門学校 機械工学科 准教授

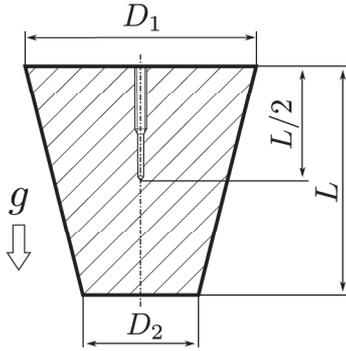


Fig. 2 Test cylinder

1 kW容量の加熱器を2個設置している。実験中のバルク水の温度は温度制御装置によって一定に保たれている。Fig.2は本実験で使用した供試円柱の断面図を示したもので、逆円錐台の上面直径 D_1 、底面直径 D_2 および長さ L はそれぞれ48mm, 24mmおよび48mmである。供試円柱には酸化防止の観点からアルミニウムA1070を使用し、実験条件を統一するため供試円柱の伝熱面表面は鏡面加工を施した。供試円柱の冷却時の温度履歴は、円柱の中心部に円柱上面より24mmの位置まで挿入されているシース径1mmのK型熱電対で測定される。円柱の温度はデータロガーにより0.2秒のサンプリング間隔で計測される。円柱中心温度と伝熱面温度には差があることは明らかである。しかし、半球状の底面を有するアルミ円柱において、円柱中心温度と伝熱面付近の温度で計算された熱流束はその差がおおよそ3%以内である¹⁾ことから、本実験では熱流束の計算に円柱中心温度を使用する。供試円柱は垂直の姿勢で電気炉によって約560℃まで加熱された後、昇降装置を介して静止した大気圧下のバルク水の水面下約150mmの深さまで浸漬され冷却される。冷却中の円柱まわりの沸騰の様相観察は目視および動画撮影により行った。

3. 伝熱面温度と熱流束の測定

供試円柱の材質にはアルミニウムを使用しているが、液体サブクール度が15Kであるとき、ビオー数はおおよそ0.05と小さいので、集中定数系の仮定は妥当であると考え、全表面平均の壁面熱流束 q は次式で与えられる。

$$q = -\rho c \frac{V}{A} \left(\frac{dT}{d\tau} \right) \quad (1)$$

ここで、 A 、 V 、 c 、 ρ 、 τ 、 T 、 $dT/d\tau$ はそれぞれ供試円柱の全伝熱面積、体積、比熱、密度、経過時間、伝熱面温度および冷却速度であり、密度は文献1を参考に温度依存性を考慮している。本研究では膜沸

騰下限界点を冷却速度の絶対値が急激に増加するまえ付近で最小となる点と定め、その時の過熱度 ΔT_{\min} と熱流束 q_{\min} をそれぞれ次式で求めた。

$$\Delta T_{\min} = (T - T_{\text{sat}}) \Big|_{\frac{dT}{d\tau} \Big|_{\min}} \quad (2)$$

$$q_{\min} = -\rho c \frac{V}{A} \frac{dT}{d\tau} \Big|_{\min} \quad (3)$$

ここで、 T_{sat} はバルク水の飽和温度である。

4. 膜沸騰の様相

供試円柱まわりに形成される蒸気膜の様相を、それぞれFig.3およびFig.4に示す。パラメータとして示す ΔT_{sat} は伝熱面過熱度(円柱温度-バルク水の飽和温度)である。なお、経過時間 τ の始点を揃えるため、 $\Delta T_{\text{sat}}=440\text{K}$ のとき $\tau=0$ とした。

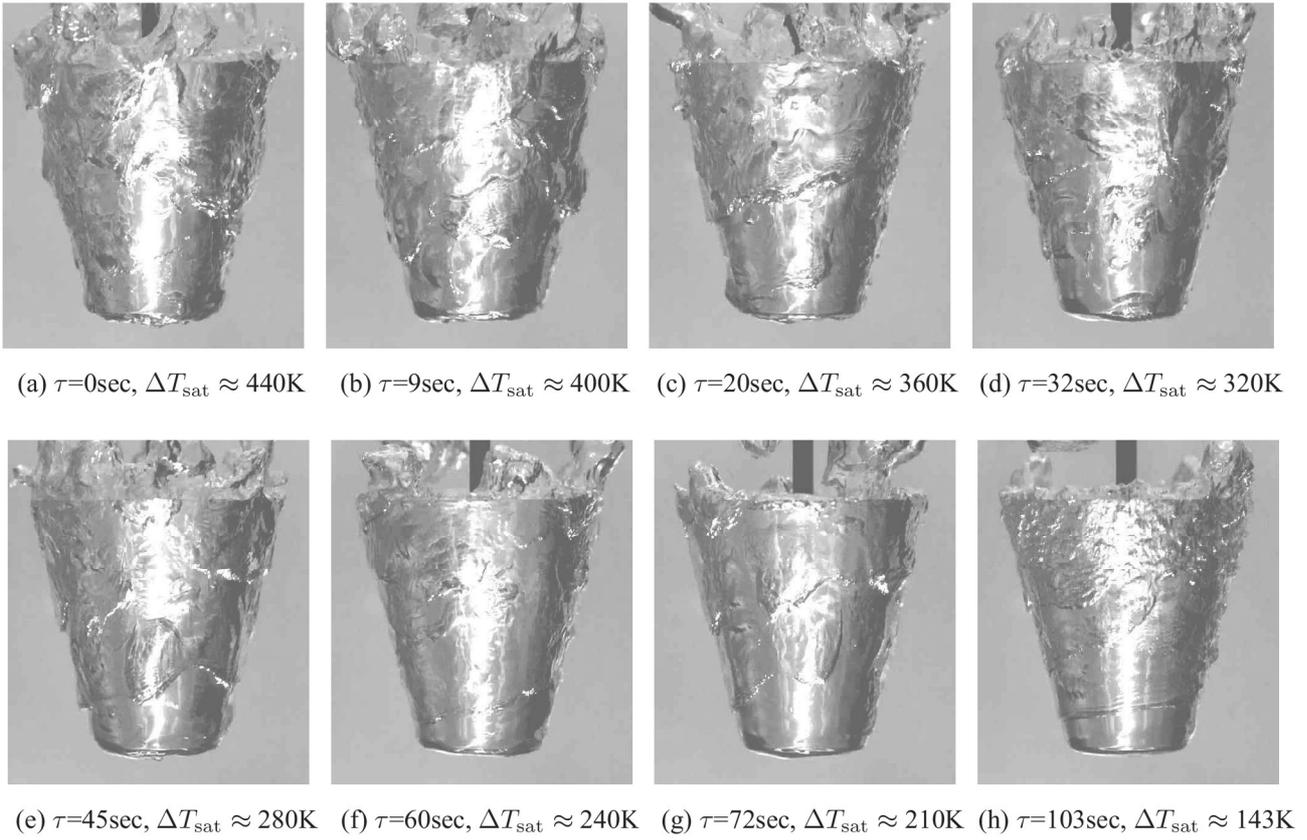
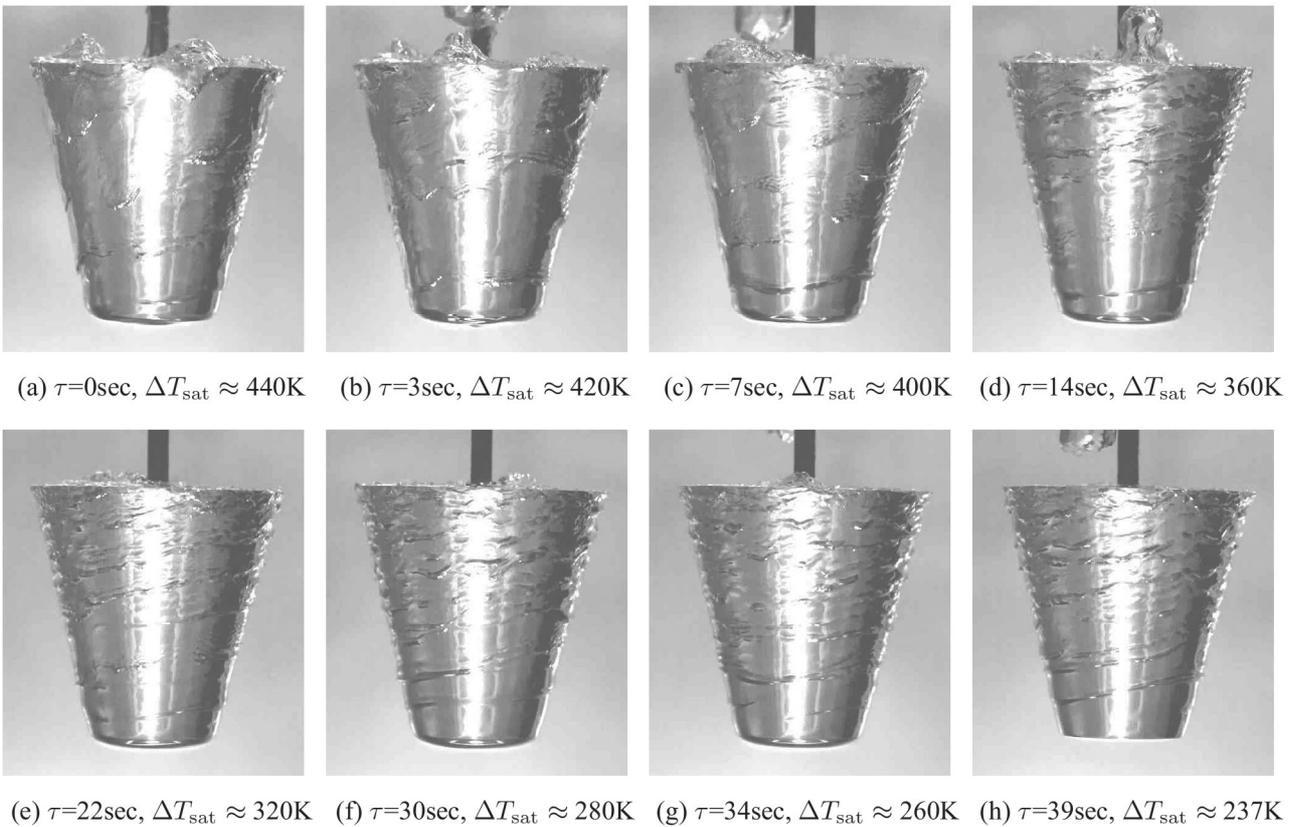
液体サブクール度 ΔT_{sub} が0Kである場合の現象写真を、Fig.3(a)からFig.3(h)に示す。浸漬直後から安定で厚い蒸気膜に覆われている。沸騰の様相は激しく、蒸気膜の気液界面は乱れている。時間が経過するに従って蒸気膜厚さは薄くなり、Fig.3(g)に示すように供試円柱側面の下端側および底面における気液界面は平滑になっていく。

液体サブクール度 ΔT_{sub} が10Kである場合の現象写真を、Fig.4(a)からFig.4(h)に示す。浸漬直後から安定で液体サブクール度 ΔT_{sub} が0Kである場合と比べて薄い蒸気膜に覆われている。時間が経過するに従って蒸気膜厚さは薄くなる。供試円柱側面の気液界面に関して、浸漬直後はFig.4(a)に示すように乱れているが、時間が経過するに従ってFig.4(e)に示すようにリング状の輪が形成される。供試円柱底面の気液界面に関して、浸漬直後は乱れているが、概ね平滑となる。供試円柱底面の蒸気膜厚さに関して、水平の底面と上面を有する垂直円柱の場合は薄くなる厚くなるを繰り返し蒸気膜崩壊することが報告されている²⁾が、逆円錐台の場合はFig.4(g)に示すように薄くなり蒸気膜崩壊に至る。

5. 結果と考察

5.1 冷却曲線および冷却速度曲線

Fig.5は供試円柱を0Kおよび10Kでサブクールされた純水中へ浸漬し冷却した場合の円柱中心部の温度と経過時間の関係を示した冷却曲線および冷却速度曲線の一例である。横軸に示した τ および縦軸に示した T はそれぞれ経過時間および円柱中心部の温度を示している。図中の各曲線上に示した●記号は膜沸騰の下限界を示している。液体サブクール度が増加した場合、冷却曲線の勾配は大きくなり、膜沸騰の下限界は高い温度に移行することがわかる。

Fig. 3 Photographs of film boiling around a reversed circular truncated cone for $\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$ Fig. 4 Photographs of film boiling around a reversed circular truncated cone for $\Delta T_{\text{sub}}=10\text{K}$

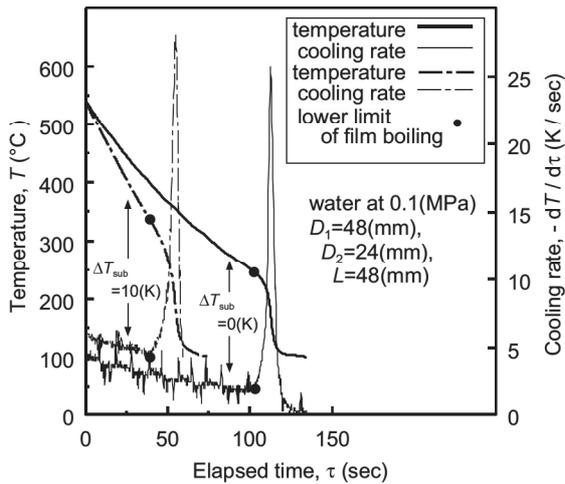


Fig. 5 Cooling curve and cooling rate

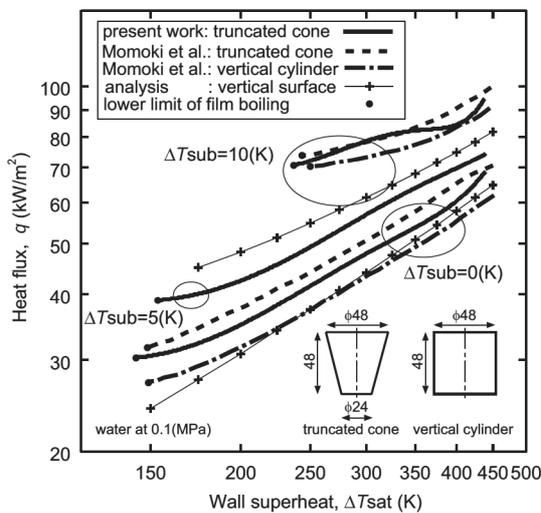


Fig. 6 Boiling curves

5.2 膜沸騰領域の沸騰曲線

Fig.6は式(1)より求めた膜沸騰領域の沸騰曲線を、液体サブクール度をパラメータとして示したものである。この図にはイオン交換水をバルク液体として純アルミ製円柱によって得られた桃木ら実験結果³⁾および二相境界層を適用した高さ48mmの垂直平面からの膜沸騰熱伝達の解析結果も合わせて示した。

逆円錐台からの熱流束 q は液体サブクール度 ΔT_{sub} が大きくなるに従って高くなるとともに、●印で記した膜沸騰の下限界での熱流束が高い伝熱面過熱度へ移動していることがわかる。サブクール膜沸騰を評価する上で基準となる飽和膜沸騰熱伝達による熱流束は伝熱面過熱度が440Kから144Kにおいて70kW/m²から30kW/m²の値をとる。サブクールされた膜沸騰領域の熱流束は飽和膜沸騰のときと比べて伝熱面過熱度 $\Delta T_{sat}=300K$ に対して、 $\Delta T_{sub}=5K$ のとき19%、 $\Delta T_{sub}=10K$ のとき64%増大し、液体サブクール度が膜沸騰熱伝達に大きく影響していることがわかる。

また二相境界層を適用した垂直平面に関する解析結果と比べて高い値を示す。さらに桃木らの実験値と比較して伝熱面過熱度が300Kのとき液体サブクール度が0Kのとき6%低い、10Kの場合はおよそ一致する。

蒸気膜の崩壊点は、液体サブクール度 ΔT_{sub} が0Kおよび5Kのときは側面上端側の角付近であったが液体サブクール度 ΔT_{sub} が10Kのときは側面下端側の角付近であった。有限円柱を包む蒸気膜の厚さは液体サブクール度が高くなるほど薄くなり、側面下端側の角付近を流れるバルク液体の流動は複雑になる。これらの影響を受けるため、蒸気膜の崩壊点が液体サブクール度により異なると考えられる。

6. おわりに

アルミ製逆円錐台を大気圧下の静止した純水に浸漬して冷却する方法で膜沸騰熱伝達の伝熱特性を調べ以下ことが明らかになった。

- (i) 液体サブクール度 ΔT_{sub} が0Kである場合、沸騰の様相は激しく、蒸気膜の気液界面は乱れているが、時間が経過するに従って蒸気膜厚さは薄くなり供試円柱側面の下端側および底面における気液界面は平滑になっていく。
- (ii) 供試円柱側面の気液界面に関して、浸漬直後は乱れているが、時間が経過するに従ってリング状の輪が形成される。
- (iii) 液体サブクール度が増加した場合、冷却曲線の勾配は大きくなり、膜沸騰の下限界は高い温度に移行する。
- (iv) サブクールされた膜沸騰領域の熱流束は飽和膜沸騰のときと比べて伝熱面過熱度 $\Delta T_{sat}=300K$ に対して、 $\Delta T_{sub}=5K$ のとき19%、 $\Delta T_{sub}=10K$ のとき64%増大し、液体サブクール度が膜沸騰熱伝達に大きく影響する。

謝辞：本研究は舞鶴工業高等専門学校機械工学科奨励研究費の補助を受けて行われた。関係各位に謝意を表す。

参考文献：

- 1) 山田ほか5名：半球状の凸底面を有するアルミニウム有限垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達の実験，長崎大学工学部研究報告，Vol.40(75)，pp. 8-16，2010。
- 2) K. Toyoda：The Study of The Vapor Film Formed Under The Bottom Surface of The Vertical Finite-Length Cylinder，The 24th International Symposium on Transport Phenomena，pp. 134-138，1-5 November，2013，Yamaguchi，Japan。
- 3) 桃木ほか4名：有限垂直円柱まわりの膜沸騰伝熱に及ぼす端面と側面構成されるエッジの影響，第50回日本伝熱シンポジウム講演論文集，E132，2013。

(2015.11.30受付)

EXPERIMENTS ON FILM BOILING HEAT TRANSFER AROUND A REVERSED CIRCULAR TRUNCATED CONE

Kaoru TOYODA

ABSTRACT: Film boiling heat transfer from a vertical finite-length cylinder is affected by the area of bottom and lateral surface and the angle between these surfaces. In this study, we first carried out quenching experiments to clarify the effects of the area and angle on the film boiling heat transfer with a pure aluminum reversed circular truncated cone of which top surface diameter, bottom surface diameter and length are 48mm, 24mm and 48mm respectively. The bulk liquid was pure water. The test cylinder was heated to about 560 degrees C in an electric furnace and then cooled in saturated and subcooled water with a submersion depth of 150mm. The characteristics of the film boiling heat transfer from the reversed circular truncated cone are discussed with cooling curves and boiling curves.

Key Words : *Film boiling, Reversed circular truncated cone*