

沸騰開始実験について

阿部 文明

愛媛大学

概要

沸騰開始のメカニズムと条件を明らかにするために実験装置を製作し、白金表面からの水およびエタノールの沸騰開始実験を行った。その結果、一般に水の沸騰開始はキャビティ（微小孔）内の残存蒸気核の成長によって始まり、エタノールでは自発核生成による。

1 はじめに

沸騰現象は、日常身近に経験する伝熱の形式である。しかし、沸騰熱伝達には影響する因子が多く、そのメカニズムを理解するのはなかなか困難である。特に沸騰開始の問題はいまだに解決されていない。

本報告は、沸騰開始実験装置とその使用について、製作上の工夫にも触れながら述べる。実験では、白金線を通電加熱し、その表面からの水およびエタノールの沸騰開始条件を測定し、予圧縮依存性を調べる。その結果^{[1],[2]} についても簡単に報告する。

2 実験装置

実験装置の外観を Photo 1、概略を Fig. 1 に示す。装置は、実験槽、実験槽内に設置された白金線試験体、加減圧槽、通電回路および計測記録計から成る。実験槽と加減圧槽はパイプとベローズバルブで接続されており、自然循環ループとすることができる。



Photo 1 実験装置外観

2.1 実験槽

実験槽は、内径 146mm、肉厚 9 mm、高さ 220mm のステンレス鋼 (304) 製円筒で、円周方向に 3 箇所の観察窓

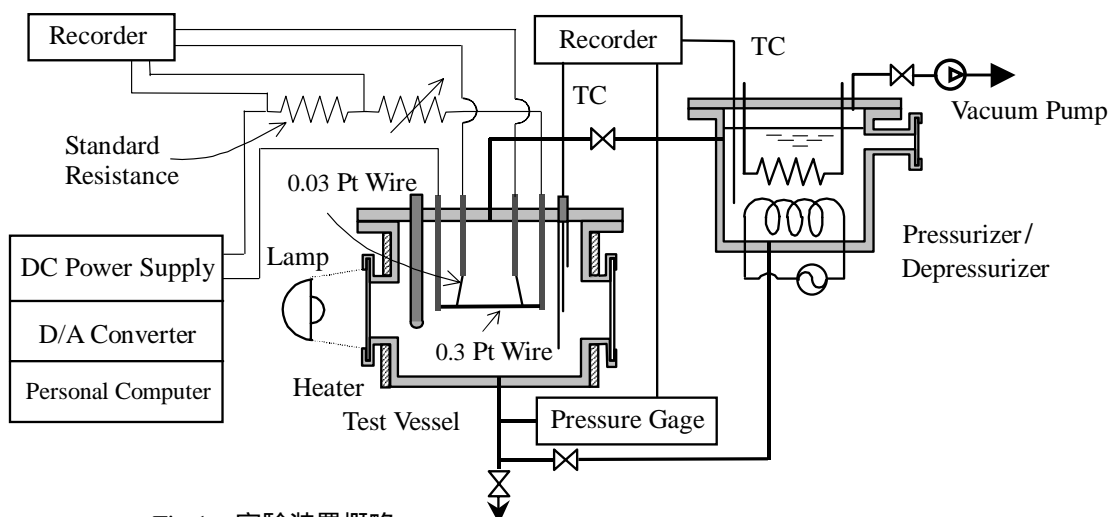


Fig.1 実験装置概略

と、1 箇所の試験体取り付け部（試験体が白金線の場合は使用しない）を設けた。上部はフランジ構造とし、フランジ部と円筒との結合は、ネジ（M164 - P1.5）と溶接を併用して耐圧と漏れ防止、溶接による歪防止を図った。上部蓋には、電極、循環用配管、冷却用熱交換器、安全弁、熱電対用の各タップが取り付けられている（Photo 2 参照）。円筒外面の上部と下部の円周方向にはプレートヒーターを設置し、ヒーターへの電圧を調節して槽内の温度と圧力を変化させることができる。

観察窓には直径70mm 厚さ10mmの耐熱ガラスを用いた。しかし、設計強度が得られないものもあり、ゴム製パッキンとOリングとを用いて金属との直接接触を避ける。負圧で密着させた状態で取り付けるなど、組み立てには慎重を要した。



Photo 2 実験槽外観

2.2 白金線試験体

白金線試験体（純度 99.99%）は、直径 0.3mm、長さ約 100mm で、上蓋から挿入した電極に取り付ける。試験体中央部には約 50mm の間隔で直径 0.03mm の白金線タップを溶接し、その電圧は白金線温度の測定に利用する。なお、溶接にはコンデンサ溶接機（日本アビオニクス社製溶接ヘッドと自作の電源）を用いるが、その接合には練達した技術が必要である。

電極部外観を Photo 3 に示す。電極棒は銅製で、直径が 6mm と 3mm の部分とに 2 分割し、後者（先端側）は簡単に脱着できる。白金線試験体は電極棒先端のスリットに挟み込む。なお、スリット部は、直径が 3mm の銅棒の先端約 12mm をフライス盤で半円形に切削し、さらに、削除した部分と同じ形状の部品を抱き合わせ、同質のリング（内径 3mm、肉厚 0.2mm）で根元を固定して製作した。

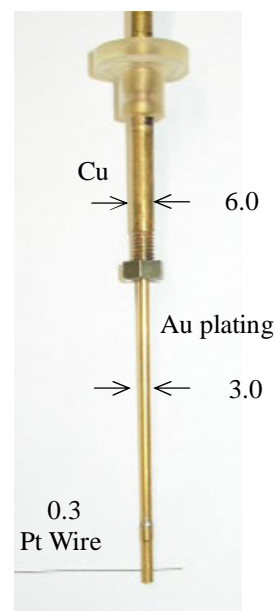


Photo 3 電極部

2.3 加減圧槽

加減圧槽は、内径 144mm、肉厚 10mm、高さ 260mm のステンレス鋼（304）製で、下部に 3kw のプラグ型ヒーターを組み込んである。また、上蓋には真空ポンプ接続用配管、冷却用熱交換器、安全弁、熱電対用プラグが配置されている。加減圧槽では系圧力の設定を行うとともに、脱気を行う。

3 実験方法

3.1 水の沸騰開始実験

水の沸騰開始実験は以下の手順で行う。

- 1) 加減圧槽内の上部に自由空間を少し残して（約 1 l）、実験槽内に蒸留水を注入する。
- 2) 実験槽を加熱し、実験槽内と加減圧槽内の温度差を利用して水を循環させ、自由空間に拡散して出てきた溶存空気を排出し、水を脱気する。
- 3) 白金試験体を通電加熱して沸騰を起こさせ、キャビティに蒸気を保存させる。
- 4) 系全体を目標圧力まで加圧し、加圧後直ちに減圧して蒸気核に瞬間的に予圧縮（予め蒸気核を圧縮し

て小さくする)を経験させる。加圧中は、白金線温度を測定するために、白金試験体に微小電流を流しておく。

5) 白金線試験体の温度を上昇させて、沸騰を起こさせる。

なお、予圧縮圧力の設定は、圧力が低い場合(0.6MPa以下)には、加減圧槽内の自由空間の蒸気圧を利用して行う。高い場合(0.6MPa以上)には、実験槽と加減圧槽を遮断して実験槽内の水を加熱し、その膨張を利用する。予圧縮圧力の最大値は3.5MPaである。

実験では、実験槽内圧力、温度、試験体電圧タップ間電圧および標準抵抗(マンガン)電圧を測定する。それらの電圧の測定値を用いて試験体の温度を求める。

3.2 エタノールの沸騰開始実験

エタノールの沸騰開始実験についても、実験手順およびデータ整理はほぼ同じである。なお、実験結果での図中のデータは液体圧力 $p_l^+=98\text{kPa}$ および液温 313K (約 38K のサブクーリングに相当)のもとで得られた。実験における温度上昇速度は 0.2K/s である。

4 予圧縮と沸騰開始条件の表し方

試験体表面が等温であれば、気液界面半径はどのキャビティのなかでも等しく、予圧縮時には

$$r^* = 2 \sigma / (p_l^* - p_v^*) \quad (1)$$

で表される値をとる。ただし、 σ は液体の表面張力、 p_l は試験体周囲の液体の圧力、 p_v は蒸気圧で、上付き添え字 $*$ は予圧縮時の値を示す。

また、沸騰開始条件は沸騰開始時の気液界面半径 r^+ で表すことができる。力学的平衡の式からそれは液体圧力、蒸気圧および液体の表面張力と次のように関連づけられる。

$$r^+ = 2 \sigma / (p_v^+ - p_l^+) \quad (2)$$

ただし、上付き添え字 $+$ は沸騰開始時の値を示す。気液界面曲率の蒸気圧への影響は Kelvin の式を用いて補正する。

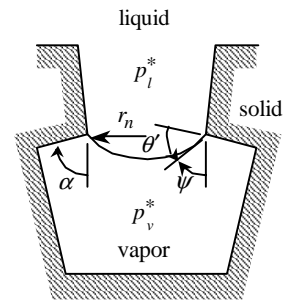


Fig.2 リエントラントキャビティのど部での気液界面

5 実験結果

水の沸騰開始実験の結果を Fig.3 に示す。またエタノールの結果を Fig.4 に示す。水の沸騰開始条件は予圧縮に依存する。一方、エタノールの場合、広い予圧縮領域で予圧縮の影響が現れず、沸騰開始時蒸気核半径 r^+ の値が極めて小さい。この事実は、白金線表面上のキャビティが蒸気核を保持できず、エタノールの沸騰開始が自発生成蒸気核の成長による可能性が高いことを示す。なお、図中の $r^* < 0$ は、沸騰終息から次の沸騰開始に至る間に試験体が過熱していることを意味する。特に、図中で最左に位置する $r^* < 0$ のデータは、沸騰を終息させた直後

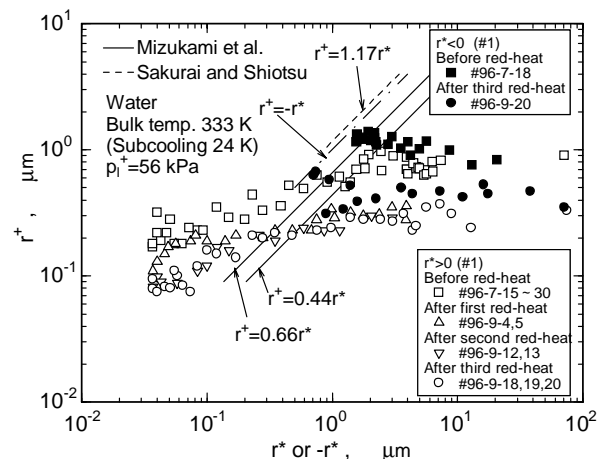


Fig.3 沸騰開始における予圧縮の影響(水)

に再び白金線温度を上昇させて得たものである。この実験結果から、少なくとも極微の蒸気核を除けば、すべての蒸気核が沸騰終息とほぼ同時に消滅してしまうという結論が導かれる。

6 まとめ

4 MPa の圧力まで予圧縮可能な沸騰開始実験装置を製作した。また、実験により、一般に白金表面からの水およびエタノールの沸騰開始メカニズムは異なることが分った。

参考文献

- [1] K.Mizukami, H.Furutani, F.Abe and S.Mukasa, " Boiling Inception on Platinum Surface in Water and in Ethanol", *Proceedings of The 11th International Heat Transfer Conference*, Vol.2, pp.461-466, 1998.
- [2] K.Mizukami, " The Importance of Wetting in Boiling Inception", *Thermal Science and Engineering*, Vol.10, No.6, pp.15-22, 2002.
- [3] 沸騰熱伝達と冷却, 日本機械学会編, (1989), 日本工業出版。

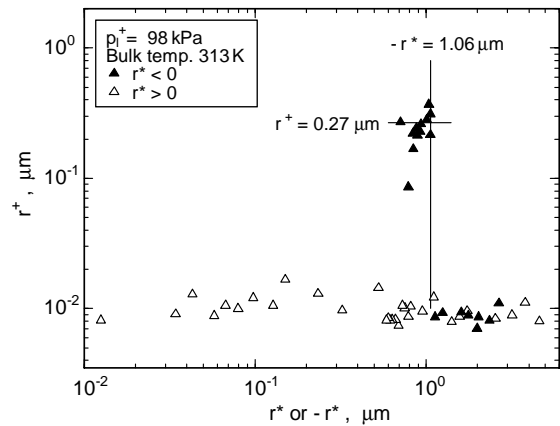


Fig.4 沸騰開始における予圧縮の影響
(エタノール)