23 高速度VTRによる水平細線からのサブクール核沸騰 における気泡挙動の可視化

茨城大学工学部 神永文人[○] 岡本芳三 刑部真弘 村山憲吾

Visualization of vapor bubbles using high speed VTR on
subcooled nucleate boiling from a horizontal wire

by F. Kaminaga*, Y. Okamoto*, M. Osakabe* and K. Murayama*

The effect of subcooling on nucleate pool boiling heat transfer was studied on a horizontal platinum wire, 0.1mm in diameter and 50mm in length, using Freon R113 at atmospheric pressure. Rate of subcooling was changed from 1.7 to 37K. A high speed VTR (400 frames/s) was used to visualize boiling characteristics. On higher degrees of subcooling a higher heating surface temperature was measured in a developed nucleate boiling region where data were correlated by $q=C\Delta T_s^7$. The images of the VTR were processed to examine frequency of bubble departure and bubble size.

1. まえがき

液体が飽和温度より低い状態に於ける核沸騰, いわゆるサブクール核沸騰についてはこれまで強制対流条件下では多くの研究成果がある。しかし, プール状態では Fandra⁽¹⁾, 藤田ら⁽²⁾⁽³⁾の研究など, その数は少ない。これは核沸騰が伝熱面のごく近傍の状態のみに依存し, 伝熱面から少し離れた流場などに影響を受けないと考えられているためである。しかしその知見がどのくらいの液サブクール度まで確かなものかは明らかでない。

本研究は大気圧下でプール状態のフロンR113内に水平に張られた直径0.1mm, 長さ50mmの白金線伝熱面の核沸騰現象に関して, サブクール度を変化させ, その沸騰様相と熱伝達特性を調べたものである。沸騰様相の観察には毎秒400コマの高速度ビデオカメラを用いた。得られた映像の画像処理を行なって, 気泡の発生頻度と離脱径を求めた。

2. 実験装置と実験方法

実験装置の概略をFig. 1に示す。黄銅製の容器①は内側で184X184X50mmの大きさで, その空間を2枚のバイレックスガラス板ではさみ密閉した。この空間には沸騰液としてフロンR113を封入し, 沸騰伝熱面として直径0.1mm, 長さ50mmの白金線②を液面から70mmの所に黄銅製の電極に支持し張った。液温は水平に取り付けた24本の外形4.5mm, 肉厚0.5mmのステンレスパイプ③の中に一定温度の温水を流すことによって一定に保った。容器内の底部には温度調整とフロンR113内に含有する非凝縮ガスの脱気のため電気ヒータ④が付いている。また, 容器内の液はポンプ⑤によって循環する構造となっている。容器の上部はガラス製の冷却器⑥を介して大気に解放されている。

*Faculty of Engineering, Ibaraki University, 4-12-1 Nakanarusawa, Hitachi 316

実験は次の手順で行なった。設定したサブクール度になるように冷却水の温度とヒータ④を調整する。白金線に直流安定化電源⑦から一定の電流を流し、白金線を発熱させる。発熱量と温度は白金線に印加した電圧と抵抗から求める。白金線の抵抗は、それと直列につないだマンガン基準抵抗(0.01Ω)⑧の電位差を精密デジタル電圧計⑨で測定し、回路に流れる電流値を求め、白金線の電位差とから計算する。沸騰が始まると測定値が変動するので、毎秒17回の割合でサンプリングしたデータの100個の算術平均値を計測値とした。白金線の温度と抵抗の関係は前もって検定してあり、抵抗値から温度を求めることができる。熱量と温度の一組のデータが得られたらステップ状に電流値を上げ、定常に達した後、次のデータを求める。この様な操作を未沸騰状態からバーンアウト付近まで行なった後、逆にステップ状に下げながら同様な計測を行う。白金伝熱面から気泡が出始まったら、毎秒400コマで高速度ビデオカメラ(ナック製、HSV-400)により沸騰様相の撮影を行なう。光源はカメラに同期したストロボの透過光を用いた。

3. 実験結果と考察

沸騰様相の観察 Fig. 2は高低2通りの熱流束($q = 11.5\text{--}12.2\text{ W/cm}^2$ と $q = 32.2\text{--}34.7\text{ W/cm}^2$)におけるビデオ映像を示している。低熱流束においてはサブクール度 ΔT_{sub} が小さいほど気泡径は大きくなるが、伝熱面から離脱する気泡はすべてにわたって球形に近い形をしている。 $\Delta T_{\text{sub}} = 26$ と 37 K の場合は伝熱面から離脱する前、気泡は白金線上を左右に気泡径の5倍以上大きく移動しながら他の気泡と合体・成長し、白金線から離脱する。そのときの気泡径は $\Delta T_{\text{sub}} = 1.7\text{ K}$ の場合とほぼ同程度となる。高熱流束になるとサブクール度が小さい場合、気泡は大きく、球形から歪んだ形となって離脱する。 $\Delta T_{\text{sub}} = 26\text{ K}$ の場合、他と比べ離脱する気泡の径が小さく、数が多い。この傾向はこれより低い熱流束でも見られ、気泡が大きく成長する前にどんどん伝熱面から離脱する特徴が観察された。

沸騰熱伝達 Fig. 3は熱伝達率 $h (= q / \Delta T_{\text{sub}})$ と熱流束 q の関係を示す。図中には熱流束の下降時に得られたデータのみ示し、発泡が観察されなかったデータを矢印で示した。熱流束が大きくなると発達した核沸騰となり、サブクール度に関係なく、6/7乗の1本の線にデータが収斂することが分る。一方、サブクール度が大きいと、発泡していてもその直線関係からかなりずれることが示されている。この直線は沸騰曲線になおすと $q = 1.05 \times 10^{-4} \Delta T_{\text{sub}}^{6/7}$ に相当する。

Fig. 4は熱流束と伝熱面温度と液温との差の関係を示している。図中には後に示す自然

Fig.1 Schematics of experimental apparatus

対流の相関式(1)⁽⁴⁾を用いて大小2つのサブクール度に対して計算された値を示している。サブクール度が小さい $\Delta T_{sub}=1.7\text{K}$ の場合は、比較的实验値と合っているが、サブクール度が高くなるに従って、相違が大きくなる。沸騰域ではサブクール度が大きくなると、発達した核沸騰になる前は、対流の効果に加え、沸騰様相の所で示したように局所的に発生した気泡の移動によるかく乱効果のため熱伝達が良好になるものと考えられる。

Fig.5は発泡が観察された最小の伝熱面温度 T_{wi} と飽和温度 T_s との差 ΔT_{ib} とサブク

Fig.2 Boiling patterns for different subcoolings

Fig.3 Relation between heat transfer coefficient and heat flux

Fig.4 Relation between heat flux and temperature difference

$$\frac{2}{Nu_d} = \ln \left\{ 1 + \frac{2.475}{C_1 Ra_d^{0.175}} \right\}; n = \frac{1}{4} + \frac{1}{10 + 5 Ra_d^{0.175}}, C_1 = \frac{3}{4} \left(\frac{Pr}{2.4 + 4.9 \sqrt{Pr} + 5 Pr} \right)^{1/4} \quad (1)$$

ール度 ΔT_{sub} の関係を示す。□印は熱流束上昇時、○印は下降時のデータである。 ΔT_{ib} と ΔT_{sub} とはほぼ直線的関係があることが分る。ただし、 $\Delta T_{sub} = 16\text{K}$ の場合、熱流束の減少巾を大きく取りすぎたため相違が大きくなった。また、 ΔT_{sub} が 37K の場合飽和温度以下でも発泡が持続していたが、これが、溶存ガスの脱気が不十分であったためかは現在のところ明らかでない。

気泡離脱頻度と気泡径 画像処理装置（岩崎技研製 VSP-512, 横 512x 縦 473 画素）を用いて撮影したビデオ画像から発泡の頻度と気泡径を求めた。頻度は一定時間内に発生する気泡の数から、気泡径は二値化した像において気泡の占める面積から円に換算して求めた。Fig. 6 は $q = 11.5 \sim 12.0 \text{ W/cm}^2$ で得られた頻度 f と気泡径 D_b の関係を示している。 ΔT_{sub} が 1.7K の場合、図に示す気泡径より大きなものもあるが離脱時に合体し計測不能であるためここに含まれていない。図より気泡離脱頻度は気泡径のおおよそ 2 乗に反比例することが分る。

4. 結論

大気圧でプール状態のフロン R113 内に水平に張られた白金線でのサブクール沸騰を高速度VIRで可視化した結果、以下の結論を得た。

- (1) 熱流束と壁面過熱度とは $q = C \cdot \Delta T_{sub}^n$ の関係にある。
- (2) サブクール度が大きい場合、気泡の移動による攪乱効果のため熱伝達が良好になる。
- (3) 低熱流束での気泡離脱頻度は気泡径のおおよそ 2 乗に反比例する。

参考文献

- (1) R.M.Fand, K.K.Keswani, 5th Int. Heat Transf. Conf. (1974) Vol.4, B1.3, 11
- (2) 藤田, 他 3 名, 第 23 回日本伝熱シンポジウム (昭 61) B112, 160
- (3) 藤田, 他 3 名, 第 24 回日本伝熱シンポジウム (昭 62) C132, 344
- (4) 伝熱工学資料 (改訂第 4 版), 日本機械学会 (昭 61) 71

Fig.5 Minimum wall superheat in boiling

Fig.6 Relation between frequency of bubble departure and bubble diameter