不均一電場内の熱伝達挙動*

(第1報, シュリーレン法による沸騰現象の観察)

根井 弘道^{*1}, 香川 達雄^{*2}

Heat Transfer Behavior in Non-Uniform Electric Field (1st Report, Observation of Boiling Phenomena by Schlieren Method)

Hiromichi NEI and Tatuo KAGAWA

Observation of the boundary layer is important to examine phenomena of boiling when a non-uniform electric field is applied. Accordingly, temperature changes near the boundary layer were observed by the Schlieren method using a nickel-chrome fine wire as the heater and a rod as the electrode to which alternate current up to 1000 volts was applied. The result shows that the temperature boundary layer is disturbed by the electric field and the stronger the turbulence, the higher the applied electric field. The bubbles generated on the heater are released through the boundary layer and expand outside of the boundary layer. The turbulence in the boundary layer was observed as stripes arranged relatively regularly. The interval of the stripes in the temperature boundary layer decreased as the applied electric field increased.

Key Words: Electric Field, Boiling, Boundary Layer, Schlieren Method, Bubble, Temperature, Turbulence, Electrode, Experiment

1. はじめに

空間的に電場の強度が不均一のところに誘電体が存在すると、その誘電体が電場により力をうけることが知られている。たとえば、水のような誘電体に電場を加えると、電場の強さの勾配の急な方に引き寄せられる力が働く。これにより、水中に温度差や気泡が存在すると、相対運動が生じることになる。

筆者らは、昭和40年頃、この電場効果により水や有機液体など各種液体の自然対流や沸騰現象がどのような影響をうけるか実験的に調べ、その概要については、すでに報告して有る⁽¹⁾。この種の研究は、その当時わが国ではほとんど行われていなかったが、最近、いろいろ活発になってきた。矢部らは、管内強制対流熱伝達に電場を加え伝熱促進効果や圧力損失の変化を見ている⁽²⁾。また、沸騰伝熱促進効果に関して気泡の形状変化などについて詳細に検討している⁽³⁾。

梶と森らは、直接接触熱伝達に及ぼす影響について各種調べている⁽⁴⁾。また、山口らは、電場によ

り水と油の攪はん混合や相分離を行う新しい液液接触装置を開発している⁽⁵⁾。凝縮に適用した例としては、山下らの「EHD凝縮器の実用化研究」などがあげられる⁽⁶⁾。

このような電場による伝熱の変化を調べるときに、伝熱面近傍の温度境界層がどのように変化するかを見ることが重要になるが、そのような研究は、今まであまりなされていないようである。そこで、沸騰伝熱において電場を加えたときに温度境界層がどのように変化するかについて、シュリーレン法により観察した結果を報告する。

FIGURE 1. TEST APPARATUS

* 原稿受付 平成5年12月9日。

^{*1} 正員, (株)東芝原子力技術研究所 (〒210 川崎市浮島町4-1)。^{*2} 正員, 元: (株)東芝。

2. 実験方法

実験は、水中で細いニクロム線を発熱体として行った。ニクロム線の径は 0.3mm である。電場は、この発熱体と 7.5mm はなして斜め上方に平行に位置させた径 1.0mm のニッケル棒を電極として、それに電位を与えて作った。発熱体と電極の長さは各々 45mm である。発熱体等を収納する試験装置は、奥行き 15cm 、幅 30cm 、高さ 20cm の矩形の水槽で、発熱体

FIGURE 2. SCHLIEREN METHOD ARRANGEMENT

に平行した両側面には、光学的にひずみの少ないガラスを張った。水温を一定に保つため、水槽下面と内部側部に予熱器を設置した。Fig. 1 に実験装置を示す。発熱体側をアースするとともに、電極から発熱体に流れる電流を mili-amperemeter で測定した。

沸騰により発生する気泡と境界層の観察には Fig. 2 に示すような、シュリーレン法を用いた。光源としては、コンデンサーに蓄電した電荷を瞬間的に放電させた時に出来るアークを使用した。光源を出来るだけ点光源とするため、アークを飛ばす電極を Fig. 3 に示すように、円錐状の窓をもったスリット (slit) とし、それを通して光を放出した。このスリットの中心を直径 20cm の凹面鏡 1 の焦点においた。これにより平行光線を作り、水槽を通してか

FIGURE 3. LIGHT SOURCE CONNECTION

ら、凹面鏡 2 により反射される。両凹面鏡の焦点距離は 2m である。この反射された光は、焦点におかれたカット (cut) により調整されてから、カメラに入る。このカットは密度変化による明暗とカメラに入る光量に影響する。このようにして、出来るだけ密度変化が鮮明に、かつ奥行きのある試験体がはっきり写るような条件を探した。また、伝熱面近傍のみを鮮明に拡大して撮影するため、 400mm の望遠レンズを使った。

FIGURE 4. PICTURE NUMBER 1, LOW HEAT FLUX (749 kW/m^2), 0 VOLT

FIGURE 5. PICTURE NUMBER 2, LOW HEAT FLUX (749 kW/m^2), 400 VOLT

FIGURE 6. PICTURE NUMBER 3, LOW HEAT FLUX (749 kW/m^2), 800 VOLT

3. 実験結果

写真は次のような条件で、すべて発熱体の横方向から撮影した。(1) 熱流束が比較的小さい状態、(2) ドライアウト直前の熱流束の状態、(3) ドライアウト点に到達してから熱流束をさげて安定な膜沸騰を実現した状態、(4) ドライアウト熱流束のまま膜沸騰へ移行した状態である。以上について、電場を加えない場合から電極に各々200, 400, 600, 800, 1000ボルトの電圧を加えて電場を付与した影

響を観察した。これらの中から以下、主な結果について報告する。

(1) 低熱流束の状態

この場合、ニクロム線発熱体表面の熱流束は 749 kW/m^2 とした。Fig. 4は電場なしの場合のシュリーレン写真である。水温は 98.5°C である。図の下の方の線が発熱体で、その上の棒が径 1.0 mm の電極であり、電極は発熱体よりこの写真の奥方向に位置している。伝熱面上には水平の過熱層が見られ、そこを離脱した気泡が白い縞状の伴流を伴って上昇してい

FIGURE 7. PICTURE NUMBER 4, HIGH HEAT FLUX (1330 kW/m^2), 0 VOLT

FIGURE 10. PICTURE NUMBER 7, STABLE FILM BOILING (1026 kW/m^2), 0 VOLT

FIGURE 8. PICTURE NUMBER 5, HIGH HEAT FLUX (1330 kW/m^2), 400 VOLT

FIGURE 11. PICTURE NUMBER 8, STABLE FILM BOILING (1026 kW/m^2), 400 VOLT

FIGURE 9. PICTURE NUMBER 6, HIGH HEAT FLUX (1330 kW/m^2), 800 VOLT

FIGURE 12. PICTURE NUMBER 9, STABLE FILM BOILING (1026 kW/m^2), 800 VOLT

るのが観察される。

Fig. 5は電極に400ボルトを加えた場合で、このときの発熱体表面の電場の強さは約4 kV/cmである。水温は98.0℃である。発熱体を巻き付けるような縞がみられ、表面の境界層が電場で乱されているのが見られる。

Fig. 6は電極に800ボルトを加えた場合で、このときの発熱体表面の電場の強さは約8 kV/cmである。水温は98.2℃である。発熱体に巻き付いた縞はFig. 5の場合より密度が濃く、かつ発熱体の下部にまで炎のように飛び出していて、表面の境界層が激しく乱されているのが見られる。

(2) 高熱流束の状態

この場合、発熱体表面の熱流束は1330 kW/m²である。Fig. 7は電場なしの場合である。水温は98.5℃である。発熱体は多くの気泡で覆われているが、そこを離脱してからはそれより大きな気泡となって上昇しているのが観察される。

Fig. 8は400ボルトを加えた場合で、水温は98.6℃である。発熱体を覆っている気泡の間に、先の低熱流束の場合に見られたような縞がところどころに見られる。

FIGURE 13. PICTURE NUMBER 10, HIGH FLUX FILM BOILING (1270 kW/m²), 0 VOLT

FIGURE 14. PICTURE NUMBER 11, HIGH FLUX FILM BOILING (1270 kW/m²), 400 VOLT

Fig. 9は電極に800ボルトを加えた場合で、水温は98.6℃である。この場合、発熱体の回りにはあまり気泡は存在せず、先の低熱流束の場合に見られたような縞が密度が濃い状態で存在するのが見られる。気泡はこの外側から発達しているように見られる。

(3) 膜沸騰の状態

上記の高熱流束の場合からさらに熱流束を上昇させ、発熱体の表面が赤熱するドライアウト点にいった後、直ちに少し熱流束を下げて安定な膜沸騰を実現させた状態である。発熱体表面の熱流束は1026 kW/m²である。Fig. 10は電場なしの場合で、水温は98.2℃である。発熱体は規則正しく大小の気泡で覆われ、かつ並んで離脱上昇しているのが観察される。

Fig. 11は400ボルトを加えた場合で、水温は98.4℃である。発熱体を覆っている気泡の下部が多少乱れているが、あまり目だった違いは見られない。

Fig. 12は800ボルト、水温98.7℃の場合で、発熱体の回りの気泡は完全に乱され、縄のように巻き付いた蒸気層から不規則に気泡が離脱上昇しているのが見られる。

(4) 高熱流束膜沸騰の状態

Fig. 13は上記の(2)の高熱流束の場合から熱流束を上昇させ発熱体の表面が赤熱するドライアウト点にいった時、そのまま熱流束を下げずに膜沸騰の状態とした電場なしの場合である。発熱体表面の熱流束は1270 kW/m²である。発熱体は熱膨張でたんでいるが、高温のため輝いている。

Fig. 14はこれに電圧400ボルトを与えた場合で、発熱体の輝きが少なくなっているため、温度が低下

FIGURE 15. SCHEMATIC PATTERN CHANGE IN BOUNDARY LAYER BY APPLIED VOLTAGE

していると考えられる。上昇している気泡の下にある縞の伴流の乱れは、上記の電場なしの場合より大きい為、このような膜沸騰の場合も発熱体の回りの過熱層が電場により乱されているものと考えられる。

4. 考 察

以上見てきたように、沸騰がそれほど激しくないときの電場なしの場合、発熱体の伝熱面上には水平の過熱層が存在し、それが気泡により乱されるが、電場があるとき、それを巻き付けるような縞がみられ、電場によりその過熱層が乱されるのがシュリーレン写真により観察された。これを(1)の低熱流束の状態の、Fig. 5、6、7について、発熱体近傍をスケッチし拡大して示したのが、Fig. 15である。この過熱層の縞は、電場なしの場合では、離脱した気泡のあとに見られるが、電場が加わった場合、この図のように、比較的規則正しく発熱体に巻き付いた状態で存在する。電場が強くなるとこの密度が濃く、かつ発熱体の上部や下部にまで飛び出して存在する。これにより表面の境界層が激しく乱されて伝熱が促進される訳であるが、この巻き付いた縞はシュリーレン写真の特性から密度差、従って温度差がある一種の波であると見なされる。この波の振動により発熱体の表面から過熱した境界層の外側に熱が伝えられているようである。

このような熱振動場の波長は、電場の強さが大きくなるほど短くなっている。この様子を調べるため、(1)の低熱流束の状態の、Fig. 5、6、7などから、発熱体の軸方向の数か所の位置について、縞

の数を読みとった。これを示したのがFig. 16である。縞の数は、1 cm当たりの数で示し、縞の密度 (Stripe Density) とした。このStripe Densityは、電場なしの時の10程度から、電圧 800ないし 1000ボルトの時の50程度まで、電場にたいして直線より若干上向いた形で増大している。このStripe Density 50のとき、縞の間かくは 0.2mmとなり、発熱体の線径は 0.3mmであるので、それと同じ程度の長さである。

もっとも、電場なしの時は、電場ありと違って、縞のあるところは不規則であるので、両者を同じものと見なすことは多少無理がある。しかし、電場なしの時は、境界層内での気泡の発達、それからの離脱により、過熱層は温度変動していることから考えると、電場により生ずる縞が振動によるものでないかと推測され、両者の類似性が存在することが考えられる。

電場が強く、この過熱層の変動場が激しくなると、Fig. 9などに見るように、気泡はこの変動場の外から発生しているように見られる。しかし、電場なしからの現象の連続性から考えて、小気泡は伝熱表面から発生し、電場の力により急速に表面から引き離されるとともに、加熱成長しているものと思われる。

このように、伝熱面近傍の温度境界層は電場により乱され、電場の強さが強くなるほど乱れは激しくなるが、この乱れの原因は電場による力によって境界層の外より低温で密度の高い液体が伝熱面に垂直に衝突し、境界層内で密度の低い液体と激しく入れ替わるためであり、当然気泡のように密度の軽いものは伝熱面から急速に引き離される。縞模様が現れるのはこの高温流体と低温流体が十分混合されないまま対向流となるためであり、電場の力が大きくなるほど対向流量が大きくなり、安定的にこの流量を保つためには流路幅が狭くなるので縞の数が大きくなるのであろう。また、沸騰時電場を加えると気泡が小さくなる理由は、サブクール水が伝熱面に接触することと、伝熱面近傍の液体圧力が電場の力で高くなるためと考えられる。

5. 結 論

不均一電場を与えたときの水の沸騰伝熱の変化を調べるため、シュリーレン法により、伝熱面近傍の温度境界層の挙動を観察した。この結果、次のようなことが明かとなった。

FIGURE 16. STRIPE DENSITY CHANGE BY APPLIED VOLTAGE

- (1) 伝熱面近傍にできる温度境界層は電場により乱され、電場の強さが強くなるほど乱れは激しくなる。
 - (2) この境界層内の乱れは比較的規則正しく、温度の縞となって観察される。
 - (3) 電場の強さが大きくなるほど温度境界層の縞の数は多くなり、温度差の現われる発熱体の軸方向の縞密度は高くなる。
 - (4) 電場を与えたときの沸騰の気泡は、電場の力により変動する温度境界層の外に飛ばされ、そこで成長する。
 - (2) 矢部, 他: EHD効果を用いた壁面近傍の流れの攪乱による管内強制対流熱伝達の促進(第2報)、第29回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1992) 359.
 - (3) 緒方, 矢部, 他: EHD効果を利用した沸騰伝熱促進に関する研究、第26回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1989) 460.
 - (4) 梶, 森: 電場による液滴への直接接触熱伝達の促進、第21回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1984) 523.
 - (5) 山口, 他: 印加電場の油水界面からの液滴分散、第12回混相流シンポジウム講演論文集, (1993) 101.
 - (6) 山下, 他: EHD凝縮器の実用化研究、第25回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1988) 448.
- 文 献
- (1) 香川, 根井: 電場内沸騰熱伝達、日本機械学会誌, 70巻、583号、(昭42) 1215.