気泡微細化沸騰における流れ場の PIV 計測

伊藤 大介^{*1}, 刀塚 淳^{*2}, 齊藤 泰司^{*1}

Velocity field measurement in micro-bubble emission boiling

Daisuke ITO^{*1}, Jun NATAZUKA^{*2} and Yasushi SAITO^{*1}^{*1} Research Reactor Institute, Kyoto University

2-1010 Asashiro-nishi, Kumatori-cho, Sennan-gun, Osaka 590-0494, Japan

^{*2} Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

1-1 Akunoura-machi, Nagasaki-shi, Nagasaki 850-8610, Japan

Received: 12 September 2016; Revised: 8 December 2016; Accepted: 31 January 2017

Abstract

Liquid inlet behavior to a heat surface in micro-bubble emission boiling (MEB) was investigated by flow measurement using particle image velocimetry (PIV). Subcooled pool boiling experiments under atmospheric pressure were carried out using a heat surface with a diameter of 10 mm. An upper end of a heater block made of copper was used as the heat surface. Working fluid was the deionized water and the subcooling was varied from 40 K to 70 K. Three K-type thermocouples were installed in the copper block to measure the temperature gradient, and the heat flux and wall superheat were estimated from these temperature data to make a boiling curve. The flow visualization around the heat surface was carried out using a high-speed video camera and a light sheet. The microbubbles generated in the MEB were used as tracer particles and the velocity field was obtained by PIV analysis of the acquired image sequence. As a result, the higher heat fluxes than the critical heat flux could be obtained in the MEB region. In addition, the distribution characteristics of the velocity in MEB region were studied using the PIV results and the location of the stagnation point in the velocity fields was discussed.

Key words : MEB, Subcooled boiling, Pool boiling, PIV, Velocity field

1. 緒 言

加速器駆動システム(ADS: Accelerator Driven System)は、加速器によって加速された陽子とターゲットの核破碎反応によって発生する中性子を用いて未臨界炉を駆動させる次世代核エネルギーシステムである。ADS は電源喪失時には中性子の供給も止まり核分裂反応が維持されないため現行型の原子炉よりも原理的に安全であり、長寿命放射性核種の核変換処理特性に優れるなどの利点がある。ADS の固体金属ターゲットの冷却に水を利用する場合、ビーム径を絞った際に微小な領域に熱負荷が集中し沸騰が起こる可能性がある。このように微小伝熱面を高サブクール度、高流速の水で冷却すると、限界熱流束 (CHF: Critical Heat Flux)を超えて熱流束が上昇する気泡微細化沸騰 (MEB: Micro-bubble Emission Boiling)が発生する可能性がある(稲田他, 1981a, 藤林他, 1985)。そのため、ADS 固体ターゲット冷却システムの構築のためには MEB に関する知見の蓄積が必要となる。

従来、MEB の発生機構や熱伝達特性に関して調べられてきている(稲田他, 1981b, 久保, 熊谷, 1992, Suzuki et al., 2005)。当研究グループでも ADS のような強放射線場での MEB 挙動の把握のため、伝熱面の濡れ性を制御し沸騰熱伝達特性へ及ぼす影響について調べてきた。その結果、濡れ性の改善により MEB 領域での伝熱特性の向上が示され、伝熱面での蒸気泡の成長と凝縮の周期挙動が大きく影響している可能性が示された (Saito and Ito, 2014, Ito et al., 2014)。そこで、高速度カメラによる撮影画像から気泡群の変動挙動について調べ、濡れ性が変動周期に影響を与えることを示した (刀塚他, 2015)。このような変動は、バルクから伝熱面への液供給挙動に大き

Fig. 1 Experimental setup for subcooled pool boiling experiments using deionized water.

く影響していると考えられる。したがって、伝熱面周囲の流動特性を十分に理解することが、MEB 挙動の解明に有益である。従来、プール沸騰体系において、探針プローブを利用した蒸気泡挙動の計測が行われてきている(熊谷他, 2001, Ono and Sakashita, 2007)。しかしながら、プローブや熱電対による局所計測は沸騰現象の物理的な特性を理解するために非常に有効である一方、空間的な変動を調べるのが困難である。そこで、流れ場の時空間的な挙動の把握に優れており、可視化画像の解析によって速度場情報の取得が可能な粒子画像流速測定法 (PIV: Particle Image Velocimetry) を MEB における伝熱面周囲の速度場計測に適用することとした。

本研究ではプール体系におけるサブクール沸騰実験において、高速度カメラとシート光を用いて撮影した画像に対して PIV 解析を行い、MEB 領域における伝熱面周辺での空間的な流動変動を調べ、MEB における伝熱面への液供給効果を明らかにすることを目的とする。

2. 実験装置

2・1 実験装置

実験装置の概略図を図 1 に示す。本装置は沸騰用容器、試験部、熱交換器から構成されている。沸騰用容器は断面 $200 \times 200 \text{ mm}^2$ 、高さ 290 mm である。側面には可視化のため厚さ 5 mm のガラス窓が設置されており、また容器底面からの高さが約 40 mm のところにバルク温度測定のための K 型熱電対が 1 つ設置されている。試験部は直径 70 mm の銅円柱を加工したもので、片側を直径 10 mm の円柱状にし、伝熱面としている。伝熱面周りには板厚 1.65 mm のステンレス板を電子ビーム溶接し面一にした。実験毎に伝熱面は 400 番エメリー紙により表面粗さが一定になるように研磨した。銅ブロックにはカートリッジヒータ (200 W) が 18 本挿入されており、温調器により銅ブロック温度を制御し、実験を行った。伝熱面下の円柱部には図 1 の右側に示すようにシース型熱電対が高さ方向に 3 ヶ所設置されている。銅ブロック内温度は、 2 Hz のサンプリング速度で測定された。表面温度と熱流束は銅ブロック内の準定常状態を仮定し、計測された伝熱面下の温度分布から 1 次元熱伝導式によって算出した。作動流体はイオン交換水とし、脱気を行った後、徐々に銅ブロックを加熱した。また、水槽上部に取り付けた熱交換器によりサブクール度の制御を行った。

2・2 速度場計測方法

図 2 に可視化計測の概略図を示す。撮影には高速度カメラ (IDT 社, MotionPro Y-4 lite) を使用し、撮影と垂直方向からシート光を挿入した。シート光照射には、メタルハライド照明装置 (目白プレジジョン, LS-M350) とシリンドリカルレンズ (住田光学ガラス, AAAR013S-A) を利用した。測定部でのシート光の厚さはおよそ 8 mm であった。画像撮影は 500 Hz で 1~3 秒間行った。画像サイズは $1024 \times 512 \text{ pixel}$ であり、空間分解能は $75 \mu\text{m/pixel}$ である。

Fig. 2 Schematic diagram of visualization system which consists of a high speed camera, a metal halide lamp and a cylindrical lens.

本実験では MEB 領域のみを対象としているため、MEB によって発生する微細気泡をトレーサーとして PIV 計測を行った。本研究では MATLAB 環境で使用可能なオープンソース解析コード PIVlab (Thielicke and Stamhuis, 2014) を用いて PIV 処理を行った。本実験における撮影速度 500 Hz では MEB の蒸発凝縮サイクルの周期変化を観察することが困難であった。そのため、得られた時空間速度情報は時間平均を行い平均速度場とし、結果に関する考察を行った。

3. 実験結果

3・1 沸騰曲線

図 3 にサブクール度 $\Delta T_{\text{sub}} = 60 \text{ K}$ の条件で得られた沸騰曲線を示す。図中の実線および破線はいずれもプール沸騰における核沸騰熱伝達 (Kutateladze, 1952, Jens and Lottes, 1962) と CHF (Kutateladze, 1953, Ivey and Morris, 1962) の相関式である。加熱実験において沸騰曲線は、図に示すように CHF 予測値付近で頭打ちとなり、高過熱度側への大きな変動を経た後、MEB へと移行していることが分かる。MEB 領域では、CHF を超える高熱流束が観測され、加熱量の増加に伴いさらなる熱流束の増加がみられた。本実験では、最大 11 MW/m^2 程度の高熱流束を記録したが、実験装置、特に銅ブロックの温度制限によるためであり、MEB 領域における限界熱流束を得るためには装置の改良などが必要である。

図 4 に高速度カメラによって撮影された連続画像の一例を示す。本画像は図 3 における A 点 ($q = 7.5 \text{ MW/m}^2$)、で得られたものがある。光の反射によって見にくい、図中の中央下部に伝熱面が存在する。伝熱面周囲において MEB によって発生した微細気泡がトレーサー粒子として撮影されていることが分かる。これら画像に対して PIV 処理を行うことで速度場の情報を得た。

3・2 PIV 計測結果

図 5 に $\Delta T_{\text{sub}} = 60 \text{ K}$ での平均速度場をベクトル線図で示す。図 5(a) は図 3 における A 点 ($q = 7.5 \text{ MW/m}^2$)、図 5(b) は B 点 ($q = 10.5 \text{ MW/m}^2$) での結果である。本結果は熱交換器による温度制御及びシート光の入射方向の影響により左右非対称な分布となっている。また、特に高熱流束での伝熱面上方では上昇流のみが観測されるが、これは合体した粗大気泡が浮力によって上昇する影響と考えられ、考察にあたっては注意が必要である。 $q = 7.5 \text{ MW/m}^2$ では、伝熱面側方への気泡の流れと伝熱面上方からの液供給が確認できる (図 5(a))。これらの流れは蒸発と凝縮のサイクルによって形成されるためであると考えられるが、駆動力の特定には気泡挙動との同時観察が必要と考えられる。また $q = 10.5 \text{ MW/m}^2$ では、伝熱面側方へ流れと斜め上方からの液供給の流れに加え、伝熱面上方への気泡の強い射出が発生し、これにより対向流が発生していることが分かる。この対向流が MEB の不安定性および伝熱限界と密接な関係があると考えられる。さらに、図中の×印は伝熱面上部で流速がほぼ 0 となる点(よどみ

Fig. 3 Boiling curve result measured at $\Delta T_{\text{sub}}=60$ K. Existing correlations for nucleate boiling and critical heat flux in subcooled pool boiling are shown by solid and dashed lines. Two points with different heat fluxes of $q=7.5$ MW/m² and $q=10$ MW/m² are marked by A and B, respectively.

Fig. 4 Typical images acquired by high-speed camera ($\Delta T_{\text{sub}}=60$ K, $q=7.5$ MW/m²). The location of the heated area is indicated by red part.

Fig. 5 Averaged velocity vector map in MEB region at $\Delta T_{\text{sub}}=60$ K. (a) and (b) are the results of point A and B in Fig. 3, respectively. Cross marks show the location of the stagnation point estimated from PIV results.

点)であり、熱流束の増加に伴い、よどみ点位置が伝熱面に近くなっていることが分かる。これは、斜め上方からの液の引き込み効果が大きくなっているためであると考えられる。しかしながら、上述の通り、伝熱面上方では 1 mm 程度の比較的大きな気泡が見られ、それらの上昇気泡により大きな速度を計測している可能性がある。そ

Fig. 6 Averaged velocity vector maps in MEB region at several subcooling conditions. The stagnation points move to closer to the heated surface as the heat flux increases.

のため、定量的な速度評価を行うためには、シート光厚さを極力薄くするか、撮影画像における粗大気泡の影響を除去する前処理を行う必要があると考えられる。

他のサブクール条件 ($\Delta T_{\text{sub}} = 40, 50, 70 \text{ K}$)における平均速度場に関する結果を図6に示す。図5と同様によどみ点に×印を示した。すべてのサブクールにおいて、熱流束の増加に伴ってよどみ点位置が伝熱面に近づいていることが分かる。これは、伝熱面斜め上方からの液供給量が増加したためであると考えられる。また、 $q = 10 \text{ MW/m}^2$ 程度でよどみ点位置が比較的伝熱面に近いことから、このような液供給機構がMEBの伝熱限界に関連していることも推測される。しかしながら、本実験においてはMEBの限界が観測されていないため、さらなる実験による検討が必要である。

以上の結果および過去の結果より、MEBにおいては明確な蒸気泡の成長と消滅が観測されるため、蒸発と凝縮のサイクルによりポンプ効果が起こり、伝熱面周辺に流れが生じると考えられる。この伝熱面側方への流れが、MEBの流動現象を特徴づけ、MEB領域が高熱流束まで到達することと密接な関係があることが推察される。しかしながら、そのような伝熱面近傍の流れ場を明らかにするためには、速度場の時間変動特性が必要となる。そのため、今後、レーザーシート光を用いたより高速な撮影によるPIV計測を行い、より詳細な観察および考察が必要である。

4. 結 言

MEBにおける伝熱面への液供給効果を明らかにすることを目的とし、PIVによる伝熱面周辺の速度場の特性について調べた。計測結果から、MEB領域で、 $q=6 \sim 7.5 \text{ MW/m}^2$ 程度のとき微細気泡は主に伝熱面の側方へ水平に射出され、サブクール液は主に伝熱面の上方から供給されていることが分かった。熱流束が $q=10 \text{ MW/m}^2$ 以上のときは、伝熱面の側方への気泡の射出による流れと伝熱面の斜め上方からの液供給の流れに加えて、伝熱面の鉛直上方向へ微細気泡の射出が発生し、強い対向流が発生していることが分かった。また、平均速度分布からよどみ点を求めたところ、熱流束の増加に伴い、よどみ点位置が伝熱面に近くなっていることが分かった。これは、斜め上方からの液の引き込み効果が大きくなっているためであると考えられる。さらに本結果から得られたよどみ点位置はMEBの伝熱限界の予測に対して有益な情報となりうることが予想された。以上のように、MEBのPIV計測により、定性的な速度場特性の評価が可能になった。しかしながら、局所速度変動などの定量的な評価を行うためには、粗大気泡の影響を除去するような前処理の適用やより測定体積の小さなレーザーシート光の使用など課題が残されており、今後詳細に調べていく必要がある。

文 献

- 藤林晃夫, 熊谷哲, 武山斌郎, 姿勢と流動の組み合わせによる四つの強サブクール沸騰系の熱伝達, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 51, No. 463 (1985), pp.919-927.
- 稲田茂昭, 宮坂芳喜, 泉亮太郎, 小長谷芳彦, サブクールプール沸騰特性曲線の研究 (第 1 報, 局所熱伝達特性とそれにおよぼすサブクール度の影響), 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 47, No. 417 (1981a), pp.852-861.
- 稲田茂昭, 宮坂芳喜, 泉亮太郎, 小林盛一, サブクールプール沸騰特性曲線の研究 (第 4 報, 遷移沸騰的領域の伝熱機構), 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 47, No. 423(1981b), pp.2199-2208.
- Ito, D., Kato, M. and Saito, Y., Study on boiling heat transfer for ADS solid target - surface wettability and micro-bubble emission boiling, Proceedings of the 9th Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (2014), N9P0049.
- Ivey, H.J. and Morris, D.J., On the relevance of the vapor-liquid exchange mechanism for subcooled boiling heat transfer at high pressure, UKAEA, AEEW Report 137 (1962).
- Jens, W.H. and Lottes, P.A., Analysis of heat transfer, burnout, pressure drop and density data for high pressure water, USAEC Report ANL-4627 (1962).
- 久保良, 熊谷哲, 気泡微細化沸騰の発生と安定, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.58, No.546 (1992), pp.497-502.
- 熊谷哲, 兎原剛史, 中田俊彦, 泉正明, 気泡微細化沸騰におけるボイド信号に基づく固液接触の考察, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.67, No.661 (2001), pp.2304-2310.
- Kutateladze, S.S., Heat transfer in condensation and boiling, 2nd ed., AEC-trans-3770, U.S. AEC Tech. Info. Service (1952).
- Kutateladze, S.S., Heat transfer in condensation and boiling, 2nd ed., AEC-trans-3405, U.S. AEC Tech. Info. Service (1953).
- 刀塚淳, 加藤真裕, 伊藤大介, 齊藤泰司, 気泡微細化沸騰に及ぼす伝熱面濡れ性の影響, 第 52 回伝熱シンポジウム講演論文集 (2015), SP302.
- Ono, A. and Sakashita, H., Liquid-vapor structure near heating surface at high heat flux in subcooled pool boiling, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 50 (2007) pp.3481-3489.
- Saito, Y. and Ito, D., Effect of surface wettability on subcooled boiling heat transfer, Proceedings of the 15th International Heat Transfer Conference (IHTC-15) (2014), DOI: 10.1615/IHTC15.pbl.009631.
- Suzuki, K., Kokubo, T., Nakano, M., Kawamura, H., Ueno, I., Shida, H. and Ogawa, O., Enhancement of heat transfer on subcooled flow boiling with microbubble emission, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 29 (2005), pp.827-832.
- Thielicke, W. and Stamhuis, E. J., PIVlab - Towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB, Journal of Open Research Software, Vol. 2, Issue 1 (2014), pp.1-10.

References

- Fujibayashi, A., Kumagai, S. and Takeyama, T., Heat transfer of four high subcooled boiling systems with combinations of orientation and flow, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol. 51, No. 463 (1985), pp.

919-927 (in Japanese).

- Inada, S., Miyasaka, Y., Izumi, R. and Owase, Y., Study on subcooled pool boiling characteristics curve (1st report, local heat transfer characteristics and effect of subcooling), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol. 47, No. 417 (1981a), pp.852-861 (in Japanese).
- Inada, S., Miyasaka, Y., Izumi, R. and Kobayashi, M., Study on subcooled pool boiling characteristics curve (4th report, heat transfer mechanism in transient boiling region), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol. 47, No. 423 (1981b), pp. 2199-2208 (in Japanese).
- Ito, D., Kato, M. and Saito, Y., Study on boiling heat transfer for ADS solid target – surface wettability and micro-bubble emission boiling, Proceedings of the 9th Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (2014), N9P0049.
- Ivey, H.J. and Morris, D.J., On the relevance of the vapor-liquid exchange mechanism for subcooled boiling heat transfer at high pressure, UKAEA, AEEW Report 137 (1962).
- Jens, W.H. and Lottes, P.A., Analysis of heat transfer, burnout, pressure drop and density data for high pressure water, USAEC Report ANL-4627 (1962).
- Kubo, R. and Kumagai, S., Occurrence and stability of microbubble emission boiling, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.58, No.546 (1992), pp.497-502 (in Japanese).
- Kumagai, S., Uhara, T., Nakata, T. and Izumi, M., Liquid-solid contact in microbubble emission boiling through void signals, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.67, No.661 (2001), pp.2304-2310 (in Japanese).
- Kutateladze, S.S., Heat transfer in condensation and boiling, 2nd ed., AEC-trans-3770, U.S. AEC Tech. Info. Service (1952).
- Kutateladze, S.S., Heat transfer in condensation and boiling, 2nd ed., AEC-trans-3405, U.S. AEC Tech. Info. Service (1953).
- Natazuka, J., Kato, M., Ito, D. and Saito, Y., Effect of surface wettability on microbubble emission boiling, Proceedings of the 52nd national heat transfer symposium (2015), SP302 (in Japanese).
- Ono, A. and Sakashita, H., Liquid-vapor structure near heating surface at high heat flux in subcooled pool boiling, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 50 (2007) pp.3481-3489.
- Saito, Y. and Ito, D., Effect of surface wettability on subcooled boiling heat transfer, Proceedings of the 15th International Heat Transfer Conference (IHTC-15) (2014), DOI: 10.1615/IHTC15.pbl.009631.
- Suzuki, K., Kokubo, T., Nakano, M., Kawamura, H., Ueno, I., Shida, H. and Ogawa, O., Enhancement of heat transfer on subcooled flow boiling with microbubble emission, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 29 (2005), pp.827-832.
- Thiellicke, W. and Stamhuis, E. J., PIVlab - Towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB, Journal of Open Research Software, Vol. 2, Issue 1 (2014), pp.1-10.