219101 干渉法による沸騰気泡周囲液体の温度計測 Interferometric Measurement of Temperature Field around a Boiling Bubble

○学 濱口 拓矢 (明治大院) 学 矢吹 智英 (明治大院)
学 小林 誉幸 (明治大学) 正 中別府 修 (明治大)

Takuya HAMAGUCHI, Tomohide YABUKI, Takayuki KOBAYASHI, and Osamu NAKABEPPU
Meiji University, Higashi-mita 1-1-1, Tama-ku, Kawasaki-shi, kanagawa 214-8571

Interferometric temperature measurement around an isolated boiling bubble was conducted for studying heat transfer from liquid phase to the bubble. Finite fringe interferogram was captured with Mach-Zehnder type interferometer and a high-speed camera. Brightness distribution in the interferogram was converted to series wrapped phase image and axisymmetric differential temperature image through wrapped phase image, differential phase image, unwrapped phase image, and differential refractive index image by the Hilbert transform and Abel inversion. The resulted differential temperature image shows that the superheated liquid layer on the heating surface is lifted up and stretched by the growing bubble, and that hot liquid flow is accompanied by departed bubble.

Keywords: Boiling heat transfer, Interferometry, Temperature measurement, Hilbert transform, Abel inversion

1. 結論

沸騰は半世紀以上研究されているものの、物理的なメカニズムには不明な点が多く残されている。

近年、高分解能な温度計測が可能なMEMS熱センサや高速度赤外線カメラを用いて、沸騰熱伝達メカニズムを実験的に詳細に調べる研究がおこなわれている。矢吹らはMEMSセンサによる局所温度計測を通じて、壁面熱輸送においてマイクロ液膜の蒸発が支配的な熱伝達メカニズムであることを示し、一方で、過熱度が高くなるほど液相からの熱輸送が重要になることを指摘している[1]。しかし沸騰中の液相温度場を計測して液相熱輸送を直接評価する研究は見当たらない。

本研究では沸騰時の単一気泡周囲液相温度分布を計測し、液相熱伝達特性を評価することを目的とする。液相温度場の計測には非接触で高速な計測が可能な高速度カメラとレーザ干渉法を用いる。本論文では構築した計測系を用いて単一気泡発生時の干渉像から液相温度変化場を導出した結果を報告する。

2. 実験装置・原理

2.1 実験装置

単一気泡発生時の温度場計測用に製作した小型マッハツェンダー型干渉計システムを図1に示す。波長 632.8 nm、出力 5 mW の He-Ne レーザを光源とし、光束はビームエキスパンダーで直径約 15 mm に広げられた後、ビームスプリッタにより 2 光束に分けられる。試験光は図2のテストセルを通過し、沸騰媒体の温度場に応じた光路長変化を受ける。参照光は空気のみを通過し、高速度カメラ側のビームスプリッタへ到達する。ビームスプリッタで再び試験光と参照光は重ね合わされ、テストチャンバ内の温度場に応じ

Fig. 1 Interferometer setup

た 2 光束の位相差が干渉像として高速度ビデオカメラで撮影される。レンズの焦点はテストチャンバ中央に合わせ、温度勾配による光の屈折の影響を低減した。

撮影する干渉像は有限縞とし、後述する変換法で温度場を算出する。キャリア縞は縦方向、縞間隔は約 0.16 mm (計測画像上の 6 ピクセル) とし、温度上昇に伴い右側へ変形するように光学系を調整した。有限干渉像は高速度カメラにより、サンプリング周波数 5000 Hz、1 ピクセルあたり約 27 μm の空間分解能で撮影された。

図2は沸騰実験用テストセルを示す。テストチャンバは断面 10 × 10 mm² の分光計測用ガラスセルを加熱板へ接着して制作し、加熱板はサイズ 20 × 20 mm² のシリコンウエハ裏面にクロムの薄膜ヒータが蒸着されている。テストチャンバはベークライト製の土台に固定され、空気温度制御ヒータとガラス窓を備えたアルミケースで覆っている。液温は伝熱面から高さ約 10 mm に挿入した熱電対で計測した。

2.2 縞解析

撮影された気泡周りの干渉縞画像から、軸対称な液相温度分布を算出する干渉縞解析手法を説明する。図3左は発泡直前と右は最大発泡時の干渉像である。伝熱面は干渉像最下部に位置している。発泡直前では、伝熱面近傍で縞が変形し、ここから温度境界層厚さ δ が 1.3 mm と推定された。伝熱面から 0.6 mm の範囲は撮像素子アレイと干渉縞のモアレ縞が生じ、解析は難しくなっている。更に伝熱面上約 0.2 mm の領域は、接着剤の影となり見えていない。気泡内は、レーザが気泡界面で屈折してカメラまで到達しないため、影となって現れている。

Fig. 2 Test cell for boiling research

Fig. 3 Interferogram with boiling

Fig. 4 Extracted differential phase

縞画像の輝度分布 $I(x, z)$ は水平方向のヒルベルト変換[2]を通じて $-\pi \sim \pi$ に折りたたまれた (ラップされた) 位相分布 $\theta_w(x, z)$ に変換される。位相場は光学系の歪みの情報を含むため、図4に示すように、沸騰時の位相場(a)から参照場として発泡直前の位相場(b)を引き、再び $-\pi \sim \pi$ に折りたたむことで沸騰による位相変化場(c)を抽出する。位相変化場(c)は切断部で 2π のシフトを加えて接続 (アンラップ) し、(d)の位相変化場 $\Delta\theta(x, z)$ を得る。位相接続は画像の左右端で上から下方向に行った後に、画像外側から気泡軸に向かって両側から行う。気泡影内のノイズは干渉縞がないために生じたものである。

テストチャンパ内の温度変化により媒体の屈折率変化 Δn が生じ、光路に沿った平均屈折率 $\bar{n}$ と位相変化場 $\Delta\theta$ は光源の波長 λ とチャンパ奥行き L により次式で関係づけられる。

$$\Delta\bar{n}(x, z) = \frac{\lambda \Delta\theta(x, z)}{2\pi L} \quad (2.1)$$

この式により位相変化場 $\Delta\theta$ は屈折率変化場 $\Delta\bar{n}$ へ変換される。また、気泡周りの温度場の軸対称性から、アーベル逆変換[3]により、 x - z 座標の屈折率変化場 $\Delta n(x, z)$ から気泡軸を中心とした r - z 座標の屈折率変化場 $\Delta n(r, z)$ を算出する。

水の屈折率の温度依存性[4]は、 $90 \sim 100^\circ\text{C}$ の範囲で式(2.2)と近似した。この式の2次のテーラー展開を用いて、式(2.3)より、屈折率変化場 $\Delta n(r, z)$ から温度変化場 $\Delta T(r, z)$ を算出した。なお、参照像の温度分布 $T_0(r, z)$ から求めた基準屈折率 $n_0(r, z)$ を正確には使用するが、今回は伝熱面近傍の温度分布が求められなかったため、 $n_0(r, z)$ はバルク液温 91.7°C に対する屈折率で同様とした。

$$T = 100 - C_1(n - n_{100^\circ\text{C}}) - C_2(n - n_{100^\circ\text{C}})^2, \quad (90 \leq T \leq 100) \quad (2.2)$$

$$C_1 = 51.1 \times 10^3 (n - n_{100^\circ\text{C}})^2, \quad C_2 = -3.89 \times 10^3$$

$$\Delta T(r, z) = \{-C_1 - 2C_2(n_0 - n_{100})\} \Delta n(r, z) - C_2 \Delta n(r, z)^2 \quad (2.3)$$

3. 沸騰時の温度変化場

報告する結果の実験条件は、沸騰媒体は加熱脱気した蒸

Fig. 5 Differential temperature around an isolated boiling bubble

留水、サブクール度 $\Delta T_{sub} = 8.3 \text{ K}$ 、背面ヒータ加熱量 4 W (平均熱流束 40 kW/m^2) である。背面ヒータの加熱により伝熱面上に温度境界層が発達し、温度境界層厚さ約 1.3 mm において伝熱面中央から 0.8 mm の位置で自発的に発泡した孤立気泡に対し干渉計測を行った。2.2 節で述べた縞解析法により、図5に示す発泡前(-1 ms)を基準とした気泡周りの温度変化を求めた。

気泡は発泡開始から 5 ms で最大(最大気泡径は 2.7 mm) となり、気泡成長過程では気泡上部に温度上昇を示す領域がみられる。これは発泡前に形成された伝熱面近傍の温度境界層が気泡により持ち上げられている様子を示す。また、持ち上げられた温度境界層は気泡界面の接線方向に引き延ばされ、気泡成長に伴い薄くなっている。その後気泡は上方へ移動し、 10.4 ms において伝熱面から離脱した。離脱後の 11 ms では、気泡下部において高温媒体の気泡への随伴とバルク液体が流入したためと考えられる温度低下が見られた。 20 ms では軸対称性が崩れているために正しい温度分布は求められないが、サブクール液中での気泡の凝縮による液相の温度上昇が見られた。

気泡周りの温度変化場から、気泡成長時において液相から気泡への熱輸送を示す気泡界面液相側の温度勾配は観察されなかったため、より低いサブクール条件下での実験や、計測システムの改良が必要であると考えられる。

4. 結論

構築した干渉計と縞解析法により、孤立気泡の成長に伴う温度変化場が計測され、加熱面上の温度境界層が気泡により変形する様子が観察された。

参考文献

- [1] 矢吹, 中別府, 機論 (B 編), 76-771 (2010), P252-261
- [2] 谷田貝豊彦, 「応用光学—光計測入門—第二版」, 丸善 (2005) P143-144
- [3] Himeno, S, et al., *Journal of the Physical Society of Japan* 54-5 (1985), P1737-1742
- [4] レーザ計測ハンドブック, 丸善, P210