微細凹凸による低過熱度領域での沸騰促進の研究（第2報）*

—ディンプルテクスチャの形状パラメータおよび配列の違いによる沸騰熱伝達—

中 出 口 真 治** 矢 澤 孝 哲** 松 尾 寧 彦*** 桃 木 悟†
山 田 玲 子** 大 坪 樹**Consideration of Minute Unevenness (2nd report) Creation Method and Inspection of the Surface Function
- Boiling Heat Transfer by the Difference in Shape Parameter and Array Pattern of Dimple Texture -Shinji NAKADEGUCHI, Takanori YAZAWA, Yoshihiko MATSUO, Satoru MOMOKI,
Reiko YAMADA and Tatsuki OTUBO

The purpose of this study is the proposition of a high efficient processing method of a dimple texture to promote boiling with low superheat. And, we produce a system evaluating a nuclear boiling start of the dimple texture. Using these, we compare the start of nucleate boiling and the behavior of bubbles under the condition that the aspect ratio and the contact angle of the surface are changed according to the shape parameter of the dimple. At least the aspect ratio of 0.1 is necessary for the dimple to improve the heat transfer performance of the surface. In addition, by changing the arrangement of the dimples and imparting a gradient of the contact angle, heat transfer performance is improved.

Key words: pool boiling, micro unevenness, dimple texture, indenting machine, plastic forming, contact angle

1. 結 言

電子機器の機能向上に伴う消費電力の増加により、冷却や熱交換を行う伝熱面の熱伝達性能向上が求められている。プール沸騰においては極大熱流速点の向上について、伝熱表面に様々な形状・パターンの微細凹凸（以下ディンプルテクスチャと呼ぶ）を付与することにより、沸騰領域での熱伝達性能向上が試みられている^{1) 2)}。それに対し、核沸騰開始点を早めようとする報告例は少ない。熱流速が増加する沸騰熱伝達の特性に注目すると、速やかな核沸騰の開始は、水等の比熱の大きな液体を加熱するには、より小さな熱量で沸騰させることができ、省エネルギーに有効である。

固体表面の濡れ性を得て表面の機能を向上させようという試みは多くなされており、その1つに伝熱性能がある。濡れ難い狭い伝熱面では、過熱度の上昇とともに熱流速は単調に増加する³⁾。また、撥水面の沸騰曲線は、親水面よりデータのばらつきが大きい⁴⁾。さらに、表面に濡れ性勾配を付与することで凝縮の熱伝達率が向上する⁵⁾。これらを整理し、表1に示す。これらの特性を利用すべく、表面微細構造により濡れ性を変化させる試みもなされており、ディンプルテクスチャの濡れ性を変えることで、濡れ方向を変えられる可能性が有る⁶⁾。しかし、濡れ難い伝熱面の沸騰熱伝達と気泡の挙動との相関など、未だ明確となっていない部分も有り、表面構造の設計手法を確立するにはこれらを把握する必要がある。

微細凹凸の違いによって気泡の成長度合いが大きく異なると考えられるが、現状では実験で正確な伝熱性能を予測しており、効率良く種々の仕様の微細凹凸サンプルを作製することが必要である。さらに、低過熱度で速やかに核沸騰に達するための微細凹凸の仕様を検討するには、伝熱表面の伝熱性能を計測する

システムが必要である。

本研究は、設備投資額の小さい圧子の先端形状を転写する成形方法で、1 cm²レベルの小規模な面積のディンプルテクスチャの評価サンプルを効率よく作製できるシステムを構築し、設備の設計指針を提案することを目的とする。また、この評価サンプルの伝熱性能を評価する方法を構築し、提案することを目的とする。さらに、ディンプルテクスチャの大きさや、周期性を有する配列、不規則な配列が伝熱特性へ及ぼす影響を調べ、低過熱度で沸騰開始し、省エネに寄与するディンプルテクスチャの設計指針を提案することを目的とする。

本報では、第1報にて報告したディンプルテクスチャ創製・評価システム⁷⁾により、種々のディンプルテクスチャを作製し、鏡面と亜鏡面、形状パラメータとしてディンプル直径と深さ、ディンプルテクスチャの配列、表面の接触角等について、沸騰熱伝達と気泡の挙動との相関について報告する。

2. 実験方法と条件

2.1 ディンプルテクスチャ加工装置

ディンプル形状・大きさ、ピッチ等の仕様の異なるサンプルを効率的に得るにはこれらの形状パラメータ変更が容易なディンプルテクスチャ加工装置が必要である。本報では、ディンプルテクスチャの作製範囲を□9mmとした。ディンプルテクスチャのサンプルは、圧子の押込みにより圧子形状を表面に転写する方法で作製する。圧子の押込みにより塑性加工を行う際、ステージ上下運動誤差や被加工物表面の微細なうねり、ツール取

Table 1 Situation of the boiling by the wettability of the surface

Wettability	Surface state	Air bubbles state	Heat flux	
			Low degree of superheat	High degree of superheat
Water repellent	Water repellent coating	Unclear	Large	Small
	Air bubble adhesion	Not leave		
	The surface which is hard to get wet	Grown-up leaving		

* 原稿受付 平成 29 年 11 月 1 日

掲載決定 平成 30 年 1 月 31 日

** 正 会 員 長崎大学大学院（長崎県長崎市文教町 1-14）

*** 学生会員 長崎大学大学院

† 長崎大学大学院

<Symbol>

A	Heating surface area mm ²
a	Radius of contact circle mm
b	Height of water droplet mm
C_l	Coefficient under the atmospheric pressure
C_{sf}	Coefficient 0.013 (In case of water and copper)
c_p	Specific heat at constant pressure (water) J/(kg·K)
d	Dimple diameter μm
g	Gravitational acceleration 9.8m/s ²
h	Dimple depth μm
Δh	Evaporation latent heat J/kg
Pr	Prandtl number
p_x	Dimple pitch of x direction mm
p_y	Dimple pitch of y direction mm
Q	Heat quantity J
q	Heat flux W/m ²
R	Radius of indenter μm
R_A	Thermal resistance J/K
r_f	Roughness factor of Wenzel
r_w	Radius of water droplet μm
ΔT_{sat}	Superheat $^{\circ}\text{C}$
T_{sat}	Saturation temperature $^{\circ}\text{C}$
T_1	Temperature of thermo couple① $^{\circ}\text{C}$
T_2	Temperature of thermo couple② $^{\circ}\text{C}$
θ	Contact angle of unevenness surface $^{\circ}$
θ'	Contact angle of smooth surface $^{\circ}$
ν_w	Kinematic viscosity m ² /s
ρ_w	Density (Water) kg/m ³
ρ_v	Density (Steam) kg/m ³
σ	Standard deviation

付け誤差等により、工具初期位置と被加工物表面の相対距離に変化が生じる。この対策として、図1に示すように板ばねで誤差を吸収する運動誤差吸収ユニットを作製した。ディンプルテクスチャは、図2に示すように本ユニットを工作機械に取り付けて、サンプル表面に加工する。ディンプルテクスチャを作製するための基本的な加工条件を表2に示す。以後特に理由がない限り、ここに示す条件で加工を行った。圧子先端に取り付けるサファイヤ球の直径を0.4mmとした。Z軸方向の慣性力の影響を抑制するために、予めインデンタの押込み時に下死点で位置を保持する時間を0.1s与え、押込み、保持、上昇、X,Y移動といった一連の圧子の動作は自動プログラムで操作する。運動誤差吸収ユニットは、主に100 μm レベルのディンプルテクスチャの作製を目的としている。ディンプルテクスチャのサンプルは、ディンプル直径の目標値を150 μm とし、圧子の押込み指示値に対するディンプル直径を顕微鏡写真から計測して、ディンプル直径のばらつきを調べた。また、ディンプル直径 d と深さ h 、曲率半径 R は $d=2\sqrt{R^2 - (R-h)^2}$ であることから、計測したディンプル直径から深さを算出した。

図3に圧子の押込み量とディンプル直径の関係を示す。押込み指示値を変えて作製したディンプル直径をプロットし、その関係を図中に近似直線で示した。本実験の範囲内では、押込み指示値に対してディンプル直径は単純増加する。この関係によると、押込み指示値20 μm とした時に目標ディンプル直径の150 μm

に近くなる。押込み指示値20 μm でディンプル直径を26個測定し、平均値を $\bar{x}$ 、標準偏差の上限を $+\sigma$ 、下限を $-\sigma$ として図中にばらつきの幅を示した。押込み量の指示値20 μm では、ディンプル直径は128 μm から152 μm の範囲で得られ、要求のディンプル直径に対して最大20%の精度となる。

ディンプル深さは、図4に示すように押込み指示値に対し、単純増加する。この関係によると、押込み量の指示値20 μm で、ディンプル深さは約11 μm から15 μm の範囲で得られ、従来の約

Fig.1 Photograph and schematic views of indenter

Fig.2 Appearance photo of movement error absorption system on machine tool

Table 2 Experimental conditions

Workpiece	Material	A1070-O
	Dimension	$\Phi 14.2\text{ mm}$
Indenter	Material	Sapphire ball
	Diameter	$\Phi 0.4\text{ mm}$
Machine tool	MV-Junior (DMG MORI Co.,Ltd.)	
Down feed rate	250 mm/min	
Dwell time	0.1 s

Fig.3 Correlation of push-in amounts of indenter and diameter (In case of sapphire ball $\Phi 0.4$) Fig.4 Correlation of push-in amounts of indenter and depth (In case of sapphire ball $\Phi 0.4$)

5 倍の深さのディンプルを作製できる。これらの関係を用い、寸法の異なるディンプルテクスチャのサンプルを作製した。

2.2 伝熱特性評価装置

図 5 にディンプルテクスチャの伝熱特性評価システムの構成を示す。図において赤線はヒータ、青線は熱電対、黒線は温水管を示す。本システムは、熱流束・伝熱面温度の計測、脱泡水の生成、飽和（水）温度の保持、気泡の観察等の機能を備えている。ディンプルテクスチャの伝熱特性は沸騰曲線で比較するため、伝熱面を通過する熱流束と伝熱面の温度を計測する。図 6 に伝熱面を通過する熱流束の測定原理を示す。アルミニウム製円柱の端面を円錐台形状に加工したヒータブロックを伝熱面とし、反対側の端面より熱源となるヒータと複数の熱電対を埋設させている。伝熱面を通過する熱流束は、熱電対①と熱電対②の間の温度差 ($T_1 - T_2$) をヒータブロック材料 (A1070) の熱抵抗 R_A と伝熱面の表面積を除して求める。

なお、本試験装置における伝熱面（ヒータブロック上面）の直径は 14mm である。

3. ディンプルテクスチャの形状パラメータ

伝熱特性を比較評価するディンプルテクスチャの配列パターンを図 7 に示す。ヒータブロック上面中心部 $\Phi 9\text{mm}$ の範囲内に、直径が均一でピッチが $P_x = P_y$ となるよう配列した (a) と、(a) の加工後に $P_x/2$ 及び $P_y/2$ オフセットしてディンプルを作製した (b) と、直径が均一で Y 方向にディンプルを 2 列毎に配列した (c) の 3 つの配列パターンを用意した。それぞれのサンプルの形状パラメータを表 3 に示す。作製したサンプルの平均ディンプル直径は、No.3 で $147.3\mu\text{m}$ 、No.4~No.6 で $140.6\mu\text{m}$ である。また、平均ディンプル深さは No.3 で $2.7\mu\text{m}$ 、No.4~No.6 で $12.9\mu\text{m}$

Fig.5 Heat transfer performance evaluation system

Fig.6 Measuring method of calorie which passes through heat transfer surface

である。

作製した表面の顕微鏡写真を表 4 に示す。それぞれのサンプルの表面性状と比較項目を以下に説明する。

3.1 鏡面と亜鏡面

ディンプルテクスチャの伝熱性能向上効果を検証するために、前報にて表面に周期的な工具痕を持たない $Ra0.085\mu\text{m}$ レベルの亜鏡面との伝熱特性を調べた。しかし、亜鏡面の表面は厳密には平滑面ではなく、筋状の微細凹凸が有る。今回、亜鏡面に対してさらに平滑とした $Ra0.020\mu\text{m}$ レベルの鏡面を用意し、亜鏡面との伝熱性能を比較するとともに、評価基準としての性能を調べた。鏡面を No.1 とし、亜鏡面を No.2 とした。

3.2 ディンプルテクスチャのアスペクト比

前報にて、ディンプル直径に対するディンプル深さ（以下アスペクト比と呼ぶ）が大きいサンプルは、アスペクト比の小さいサンプルよりもディンプル数が多い時に、僅かながらも低過

Table 3 Shape condition of dimple texture

Sample No.	Dimple diameter d μm	Dimple depth h μm	Pitch P_x μm	Pitch P_y μm	Quantity of dimples	Array pattern
	Nominal	Nominal				
1	Mirror like surface $Ra0.020\mu\text{m}$					
2	Micro finishing surface $Ra0.085\mu\text{m}$					
3	150	5	150	150	3136	(a)
4	150	15	150	150	3136	(a)
5	150	15	150	150	6485	(b)
6	150	15	150	450	1888	(c)

Table 4 Microphotograph of smooth surface and dimple texture

Fig.7 Array pattern of dimple texture

熱度で核沸騰開始が早まる傾向が見られた。しかし、アスペクト比の小さいサンプルではディンプルを増やしても沸騰開始が早まったとは言えず、ディンプルとして機能しているとは言い難かった。ただし、同一直径のディンプルの比較ではなかったため、本報では同一直径でアスペクト比の異なる場合について比較評価する。アスペクト比の大きいディンプルは、2.1節で説明したディンプルテクスチャ加工装置のインデント先端のサファイヤ球の曲率半径を小さくするとともに、板ばねの剛性等を見直して作製した。それぞれの形状パラメータは表3に示したサンプルNo.3とNo.4で、深さは3倍の差とした。

3.3 ディンプルテクスチャの接触角（撥水性，親水性）

1章で触れたように、表面の伝熱特性を左右する因子として濡れ性がある。Wenzelの式(1)によれば、 r_f は平滑面に対して表面積の増加割合を示し（Wenzelのラフネスファクタ）、その割合が大きいほど θ が増加し、接触角が大きくなる。これらの知見に基づけば、緻密なディンプルテクスチャやバリの有るディンプルテクスチャの接触角は大きくなると予想される。

$$\cos\theta = r_f \cos\theta^* \quad (1)$$

仮説を確認するために、表3に示した全てのディンプルテクスチャについて接触角を測定した。接触角 θ は、鏡面や亜鏡面、ディンプルテクスチャ表面に滴下した水滴の写真から半径 r_w と高さ h を測定し、図8に示す $\theta/2$ 法（Harf angle method）により $\theta = 2\arctan(h/r_w)$ から算出した。写真撮影は2回行い、測定値を平均した。結果を表5に示す。全ての結果において 90° 以下で親水性を示した。

個々の結果を比較すると、鏡面の接触角は 72.4° で亜鏡面の接触角 73.3° よりも小さいが、その差は僅かで有意差は小さいと考えられる。ディンプルテクスチャNo.4の接触角よりも、さらにディンプルを重畳して緻密にしたディンプルテクスチャNo.5の接触角は 73° と大きくなり、Wenzelのラフネスファクタ r_f が増加したと推測した。

接触角の大きい表面と小さい表面を組み合わせ配置した場合の伝熱特性を比較評価するために、接触角の小さいディンプルテクスチャNo.4と、接触角の大きい亜鏡面No.2を交互に組み合わせたディンプルテクスチャを用意した。配列を図7(c)に示し、形状パラメータは表3のサンプルNo.6に示す。No.6の接触角は、ディンプルの並びに直交する方向（Y）から撮影した写真をNo.6（Y）とし、ディンプルの並びに平行な方向（X）から撮影した写真をNo.6（X）に示す。水滴の直径は約1mmで、水滴下には2列のディンプルテクスチャが少なくとも2本存在する。水滴の写真は滴下後30s以内に撮影した。No.6(X)のディンプルテクスチャと水滴が接する界面では、水滴は水平方向に広がり難く、No.6(Y)の界面では、ディンプルが無い部分が存在するため、No.6(X)よりも水滴が広がり易いと予想した。No.6(X)の平均接触角は 70.1° で、No.6(Y)の平均接触角は 67.8° となった。この結果は前述の予想と一致しているが、その差は3%で小さい。

4. ディンプルテクスチャの伝熱特性評価事例

4.1 伝熱性能の実験条件

表6に伝熱特性の評価条件を示す。6Lの蒸留水を温水とし、脱気した。メインタンク内は大気圧とした。ヒータは120Wで可変抵抗器に接続し、発熱量を制御した。ヒータブロックとディンプルテクスチャ近傍の温水温度測定はKタイプのシー型熱電対を用いた。各部の温度が定常に達した後、10msの間隔で

10000点サンプリングし、これを3回続けて行って平均した。

核沸騰開始後の熱流束については、プール核沸騰熱伝達として整理されているStephan-Abdelsalamの式⁸⁾(2)とRosenowの式⁹⁾(3)に基づいて、大気圧下での計算結果を併記した。

なお、全ての実験においてヒータブロックの周縁部からの発泡が認められ、伝熱面は対流の影響を受けたと考えられる。このため、核沸騰の開始に関しては、ディンプル面から発泡している結果をもとに考察した。

$$q = C_1^{1/0.327} \cdot \Delta T_{sat}^{1/0.327} \quad (2)$$

Table 5 Result of a measurement of contact angle

Sample No.	No.1	Sample No.	No.2
Contact angle °	72.4	Contact angle °	73.3

Sample No.	No.3	Sample No.	No.4
Contact angle °	81.8	Contact angle °	63.4

Sample No.	No.5		
Contact angle °	73.0

Sample No.	No.6(X)	Sample No.	No.6(Y)
Contact angle °	63.2	Contact angle °	64.0

Fig.8 Model of half angle method

Table 6 Experimental conditions

Refrigerant	Distilled water
Amount of refrigerant	6 L
Ambient pressure	Atmospheric pressure
Heating capacity	120 W
Thermocouple	K type $\Phi 1.0$ mm
Temperature measurement points	Water tank 3points Heater block 2points
Measurement interval	10 ms
Amount of temperature measurement points	10000points

$$q = \left(\frac{c_p \cdot Pr^{1.7}}{\Delta h \cdot c_{sf}} \right)^{\frac{1}{0.33}} \cdot \left(\frac{\Delta h}{v_w} \cdot \sqrt{\frac{g}{v_w \cdot (\rho_w - \rho_v)}} \right)^{-1} \cdot \Delta T_{sat}^{\frac{1}{0.33}} \quad (3)$$

4.2 鏡面と亜鏡面の伝熱特性比較

表3に示した鏡面 (No.1) と亜鏡面 (No.2) の沸騰曲線を図9に示す。この図より、

- (1) 亜鏡面は 107.2℃で核沸騰が始まり、鏡面では 107.1℃で核沸騰が始まり、鏡面が 0.1℃低い過熱度で核沸騰を開始した。
 - (2) 過熱度が 107.1℃の核沸騰開始から 110.0℃まで鏡面の熱流束は約 30%大きいこと。
 - (3) 過熱度が 110.0℃以上に十分進んだ核沸騰領域では、同一過熱度での鏡面と亜鏡面の熱流束は同等となること。
- がわかる。鏡面と亜鏡面の核沸騰の開始の過熱度の差は小さく同等と考えられ、接触角の差が小さかった結果と一致する。

4.3 ディンプルテクスチャのアスペクト比での伝熱特性比較

表3に示したディンプルテクスチャ No.3 と No.4 の沸騰曲線を図10に示す。この図より、

- (1) アスペクト比 0.03 の No.3 の核沸騰開始は 107.3℃に対して、0.10 の No.4 は 107.1℃で早く核沸騰が始まり、核沸騰開始時の熱流束は約 2 倍の差があること。
 - (2) 過熱度が核沸騰開始の約 107℃から 109℃までの核沸騰開始直後までの区間は No.4 の熱流束が大きいこと。
 - (3) 過熱度が 110.0℃以降の十分進んだ核沸騰領域で、No.3 と No.4 の同一過熱度での熱流束が同等となること。
- がわかる。No.3 と No.4 の核沸騰開始温度の差は 0.2℃で、その差は小さいが、アスペクト比が大きいと核沸騰が早まる。

4.4 配列、接触角による伝熱特性比較

表3に示したディンプルテクスチャの No.4 と No.5 および No.6 の沸騰曲線を図11に示す。この図より、

- (1) No.4 の上からディンプルを重畳した No.5 の核沸騰開始温度は 107.3℃となり、107.1℃で核沸騰を開始した No.4 よりも 0.2℃高く核沸騰が始まったこと。
- (2) 過熱度が 115℃以上に十分進んだ核沸騰領域では、No.5 の熱流束が最も大きいこと。
- (3) No.6 は、全サンプルの中で最も低い過熱度で核沸騰を開始したこと。

がわかる。No.4 と No.5 の核沸騰開始温度の差は 0.2℃で、その差は小さいが、ラフネスファクタが大きいと核沸騰が早まる傾向にある。しかし、接触角の測定結果とは一致しない。また、No.6 の核沸騰の開始についても接触角の測定結果と一致しない。

4.5 ディンプルテクスチャの気泡発生状態

表7に全サンプルの核沸騰開始時と十分発達した核沸騰時の気泡の発生状態を示す。この表から、

- (1) 核沸騰開始時の気泡の発生状態は全サンプルで有意差は小さく、ヒータブロックの周縁からの発生が多く、ディンプルテクスチャからは僅かであること。
- (2) 十分発達した核沸騰時においても気泡の発生状態は全サンプルで有意差は小さいこと。

がわかる。

4.6 考察

亜鏡面と鏡面の核沸騰開始はほぼ同じ温度で、差が小さかった接触角の比較結果と一致する。Ra0.020μm と Ra0.085μm レベルの差では、伝熱性能には影響を与えない同等の平滑面とみなせる。

伝熱性能へ影響を与えるディンプルの深さについて、アスペクト比が 0.03 と 0.10 では、核沸騰開始は 0.10 が早く、核沸騰開始時の熱流束は約 2 倍の差があり、その後の熱流束についても大きい。一方で、No.3 と No.4 の接触角と伝熱特性は、本実験の範囲内では影響が小さく、ディンプル深さが表面の伝熱性能に有効な条件と考えられ、パラメータの検討がさらに必要である。ディンプルを密に配置した No.4 に対し、Wenzel のラフネス

Fig.9 Comparison of mirror like surface and micro finishing surface

Fig.10 Comparison of heat transfer performance by difference in dimple depth

Fig.11 Comparison of heat transfer performance by array pattern

アクタの拡大を目的として、ディンプルテクスチャの上から同一ディンプルを半ピッチずらして配置した No.5 の接触角は、No.5 が相対的には大きい。しかし、No.5 の接触角は鏡面や亜鏡面と同等であり、No.4 の接触角が小さいと考えるのが妥当である。No.4 と No.5 の接触角と核沸騰開始点等の伝熱特性に差は見られず、本実験の範囲内でのディンプルテクスチャの接触角と伝熱特性の関係は小さい。

No.6(X)では、ディンプルテクスチャと水滴が接している界面で水平方向にディンプルが有るため、水滴は水平方向に広がり難いと予想した。一方でNo.6(Y)のディンプルテクスチャと水滴が接している界面では、ディンプルが無い部分があり、No.6(X)よりも水滴が広がり易いと予想した。ディンプルの列に平行な方向 (X) から撮影した No.6(X)の平均接触角は 70.1°となり、ディンプルの列に直交する方向 (Y) から撮影した No.6(Y)の平均接触角は 67.8°となった。この結果は前述の予想と一致しているが、その差は3%で小さいと考える。No.6(X)と No.6(Y)のディンプルテクスチャの接触角への影響は小さいと考えられる。

Table 7 Photos of bubbles during nucleate boiling

No.	Nucleate boiling start	Nucleate boiling
1
2
3
4
5
6

5. 結 言

開発したディンプルテクスチャ創製・評価システムにより、種々のディンプルテクスチャを作製し、ディンプルの形状パラメータによって、アスペクト比や表面の接触角を変化させた条件下において、伝熱性能や気泡の挙動との相関を調べた。

- (1) 鏡面と亜鏡面では接触角の差は小さく、沸騰開始温度などの伝熱特性についても接触角の比較結果と一致する。
- (2) アスペクト比の異なるディンプルテクスチャの伝熱特性比較ではアスペクト比の大きい方が低過熱度で核沸騰を開始し、熱流束は約2倍の差が見られた。このことから、伝熱性能向上に寄与するディンプルとして機能するには、少なくともアスペクト比は0.1以上に採る必要がある。
- (3) ディンプルテクスチャ (No.4) の接触角 63.4° に比べ、ディンプルを重畳したディンプルテクスチャ (No.5) の接触角は 73.0° となり、差が現れた。しかし、鏡面や亜鏡面の接触角と同等で、No.4 の接触角が小さくなっている。核沸騰の開始時の過熱度には差が殆ど見られず、ディンプル表面の接触角が伝熱性能に反映された結果は得られなかった。この相違についてはさらなる検証が必要である。
- (4) ディンプルテクスチャと、亜鏡面を交互に配置して組み合わせたディンプルテクスチャ (No.6) は、最も少ないディンプル数にも関わらず、全サンプルの中で最も低い過熱度で核沸騰が始まった。しかし、接触角の測定結果からその影響は小さく、本実験の範囲内では大きな影響は認められない。
- (5) 開発試作した運動誤差吸収ユニットでは、100μm レベルの要求ディンプル直径に対して最大20%の精度であり、ディンプル深さ 15μm となり、従来の約5倍で作製可能である。

謝 辞

本研究にご協力頂いた新潟大学樹田正美名誉教授、長崎大学・森高秀四郎技術職員に感謝の意を表します。

参 考 文 献

1) 藤田 恭伸, 西川 兼康, 大田 治彦, 日高 澄具: 核沸騰熱伝達に及ぼす表面粗さの影響に関する研究, 日本機械学会論文集 B 編, **48**, 432 (1982-8) 1528.

2) 藤田 恭伸: 沸騰熱伝達の促進と機構, 日本伝熱学会誌, **36**, 141 (1997) 27.

3) 中出口 真治, 松尾 寧彦, 矢澤 孝哲, 桃木 悟, 山田 玲子, 倉成 健司, 大坪 樹: 微細凹凸による低過熱度領域での沸騰促進の研究 (第1報), 精密工学会誌, **84**, 2(2018)161.

4) 鳥飼 欣一, 鈴木 康一, 金子 隆: プール沸騰における伝熱面の状態の影響, 日本機械学会論文集 B 編, **55**, 511 (1989-3) 764.

5) 鳥飼 欣一, 山崎 利: むれ難い面の沸騰伝熱, 日本機械学会論文集, **32**, 242(1966)1557.

6) 徳永 敦士, 平野 貴憲, 長山 暁子, 鶴田 隆治: 濡れ性勾配を有するマイクロ複合伝熱面における凝縮熱伝達率の測定, 第52回伝熱シンポジウム講演論文集, (2015) D234.

7) 諸貫 信行, 高山 明典, 金子 新: 濡れ性制御のためのテクスチャ設計, 日本機械学会論文集 B 編, **70**, 93(2004)126.

8) K.Stephan, M.Abdlsalam: Heat-transfer correlations for natural convection boiling Heat Mass Transfer, **23**, 1(1980)73.

9) M.Rohsenow: A method of correlating heat transfer data for surface boiling of liquids, Tech. report M.I.T, **5** (1951)1.