

微細押し込み加工を用いたディンプルテクスチャによる沸騰熱伝達向上に関する研究

長崎大学 大学院・工学研究科
助教 大坪 樹

(平成 29 年度 奨励研究助成 B (萌芽的研究) AF-2017043)

キーワード：塑性加工，機能表面，沸騰伝熱

1. 研究の目的と背景

電子機器の高性能化や小型化に伴う消費電力の増加により、熱交換器の性能向上が求められている。特に、優れた伝熱特性を有する沸騰伝熱は、高効率な冷却技術として注目されているが、相変化を生じるため、その現象は複雑である。現在、伝熱面の微細なキズや凹凸が、沸騰を促進し、熱伝達率を向上させることが確認されている¹⁾が、そのメカニズムは未だ解明されておらず、微細凹凸の最適形状パラメータは不明である。近年、伝熱面に様々な微細凹凸（以下ディンプルテクスチャと呼ぶ）を、エッチング加工等にて付与し、その伝熱特性を評価する試みがなされている²⁾が、実用的なディンプルテクスチャへの展開は容易ではない。そこで、ディンプルテクスチャの作製方法として、所望の形状に成形した圧子を金属表面に押し込み、圧子の先端形状を転写する塑性加工を提案する。塑性加工は、任意の形状を得やすく、転造等に应用することで高速化にも対応可能な手法であり、実用性に優れている。また、飽和沸騰において、沸騰促進に効果があるキャビティの開口径は、 $1\mu\text{m}\sim 500\mu\text{m}$ 程度であるとされているが、従来の押し込み加工では、様々な誤差の影響で、ミクロンオーダーからサブミリオーダーの均一なディンプルテクスチャを高精度に作製することは難しい。そこで、これらの誤差をキャンセルするために、板バネを用いたユニットに圧子を取り付けて加工する手法（運動誤差吸収加工）³⁾や、押し込み時の加工力をフィードバックする手法（荷重制御加工）⁴⁾を提案した。これらにより、押し込み加工においてもサブミクロンレベルでの加工が実現し、所望の形状・開口径・パターンのディンプルテクスチャを容易に作製することが可能である。さらに、作製した多様なディンプルテクスチャの伝熱特性を評価するため、飽和沸騰における伝熱特性評価装置を開発した。

本研究では、多様なディンプルテクスチャを作製し、伝熱特性を評価することで、ディンプルテクスチャの形状、開口径、パターン等のパラメータによる沸騰伝熱への影響を明らかにし、伝熱メカニズムを解明することを目的とする。本報では、高精度かつパラメータの変更が容易なディンプルテクスチャ加工装置と、それらの伝熱特性を評価する装置、および作製したディンプルテクスチャの伝熱特性評価結果について報告する。

2. ディンプルテクスチャ加工手法

2・1 運動誤差吸収ユニット

位置決め制御によって圧子を押し込む塑性加工では、加工物を保持しているステージの運動誤差や、被加工物表面の微細なうねり等で、押し込み深さにばらつきが生じる。そこで、板バネを用いて押し込み部分を低剛性化し、運動誤差を吸収するユニットを作製した。図 1 に、装置概略図を示す。リン青銅で作製した 2 枚の板バネで圧子を保持し、板バネに設置した歪ゲージによって、接触点が検知可能である。本ユニットを汎用工作機械に取り付け、ディンプルテクスチャ加工を行う。図 2 に本ユニットで加工した 2 種類のディンプルテクスチャを示す。開口径 $100\mu\text{m}$ から $250\mu\text{m}$ 程度の均一なディンプルが作製可能であった。

2・2 荷重制御加工ユニット

ミクロンオーダーの、より微細で均一なディンプルを作製するためには、ディンプルの深さをサブミクロンの精度で制御する必要がある。そこで、加工の際に被加工物に生じる荷重を検出し、フィードバックして押し込み深さを制御するシステムを考案した。

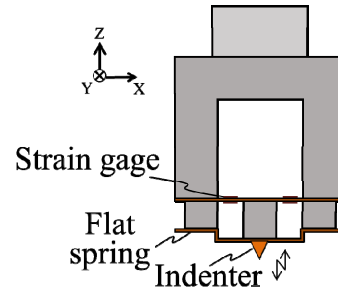


図 1 運動誤差吸収ユニット

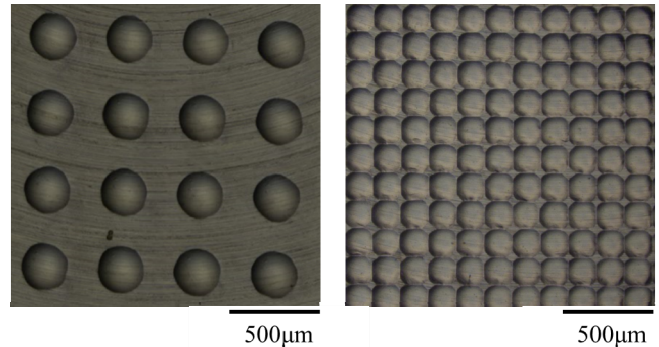


図 2 ディンプルテクスチャ

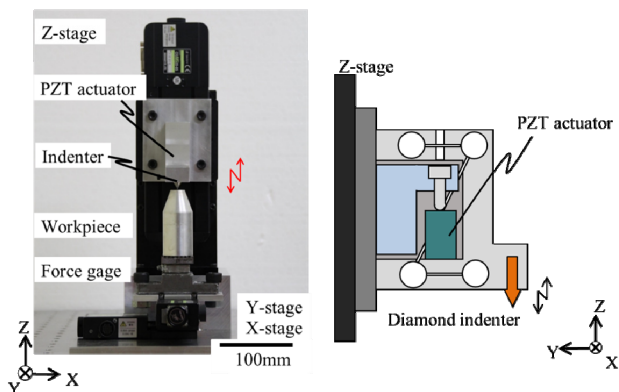


図3 荷重制御加工ユニット

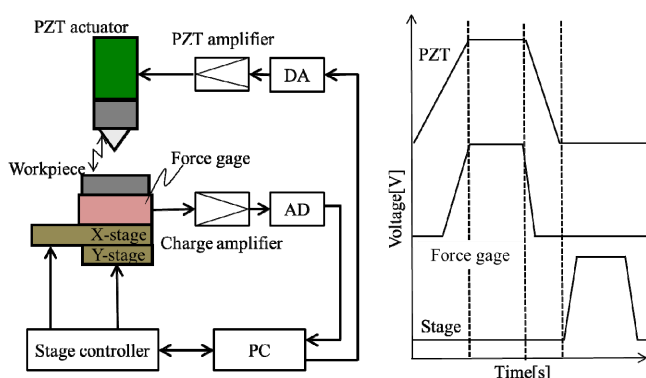


図4 システム制御系

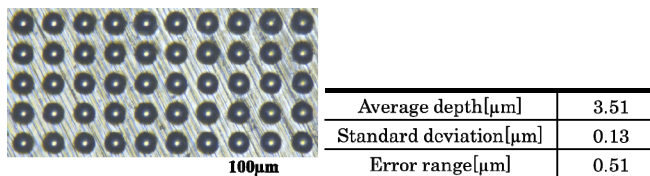


図5 加工精度検証

図3に荷重制御加工ユニットの装置写真および概要、図4にシステム制御系を示す。PZTアクチュエータによって稼働する圧子が被加工物に押し付けられる際、ワークピース下部に固定しているフォースゲージにて加工力をサンプリングする。加工力が設定された目標値に達すると、圧子は一定時間その場に保持され、圧子先端の形状が転写される。その後、PZTアクチュエータが縮み、移動ステージにて被加工物がピッチ分移動し、再度加工を行う。このサイクルを繰り返し、均一なディンプルテクスチャの加工を行う。

図5に荷重制御加工ユニットによる加工精度検証結果を示す。押込み力0.11N、X・Y-Pitch 25μmとして総数50点実施し、加工後、顕微鏡写真より各ディンプルの押し込み深さを算出した。その結果、標準偏差0.13μm、最大誤差0.51μmと、サブミクロンの加工精度を実現した。

3. 伝熱特性評価装置

3.1 1号機の装置概要

ディンプルテクスチャの伝熱特性を評価するために、伝熱面を通過する熱流束 q と、伝熱面温度と飽和温度の差である過熱度 ΔT_{sat} を計測し、沸騰曲線を取得する必要がある。図6に、伝熱特性評価装置の概略図を示す。上面を伝熱面としてディンプルテクスチャを施したアルミブロックを水槽内に設置し、ブロック内部に埋設したカートリッジヒーターで加熱する。ブロック上端部から1.5mm、15.0mmの位置に埋め込んだK型熱電対でブロック内部温度を測定し、熱流束を算出する。また、伝熱面温度は上端部から1.5mmの位置にある熱電対から取得した温度とする。沸騰様相は装置前方の窓から観察可能で、水槽内の温度も熱電対にて取得できる。

3.2 1号機による伝熱特性評価

運動誤差吸収ユニットと荷重制御加工ユニットにて、開口径が $d=147.3\mu\text{m}$ と $d=10.0\mu\text{m}$ の2種類のディンプルテクスチャを伝熱面に付与し、伝熱特性の評価を行った。なお、ディンプル個数は同一の3136個とする。表1に各ディンプルテクスチャの加工条件と顕微鏡写真を示す。また、図7に伝熱特性評価装置で取得した、各ディンプルテクスチャの沸騰曲線を示す。沸騰曲線には、目視で確認した沸騰開始点を示している。いずれも沸騰開始点付近で傾きが変化し、熱流束が指数関数的に増加している。沸騰後の傾きは、Rohsenowの相関式とよく一致しており、一般的な伝熱特性を評価できていると考えられる。また、開口径 $d=10.0\mu\text{m}$ のディンプルテクスチャについては、伝熱特性におけるばらつきを確認するために、同条件で再び伝熱ブロックを作製し、評価を行った。図7に示す同条件の2つの沸騰曲線は、沸騰開始温度や、沸騰後の傾きが異なることから、伝熱特性の再現性は低い。その原因として、伝熱面以外の箇所での沸騰が考えられる。図7中に示した沸騰様相では、伝熱面周囲からの活発な沸騰が観察されるが、これはディンプルテクスチャを付与したブロックのエッジからの沸騰、ブロックと断熱材のテフロンすき間からの沸騰、およびテフロン表面からの沸騰が生じている可能性がある。また、これらの沸騰はブロックの取り付け誤差やテフロンの劣化等により不安定である。すなわち伝熱面の沸騰よりも、周囲の沸騰が支配的になり、再現性低下

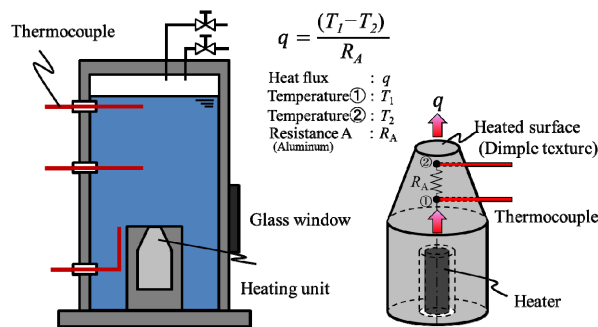
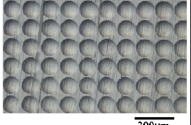
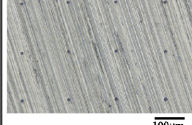


図6 伝熱特性評価装置 (1号機)

表1 ディンプルテクスチャ加工条件

Item		Movement error absorption unit	Load control processing unit
Workpiece	Material	A1070	
	Diameter	d=14.2 mm	
Indenter	Material	Sapphire	Diamond
	Radius	d=1.0 mm (ball)	d=0.026 mm (Cone)
Base Machine		MV-Junior (DMG MORI Co.,Ltd.)	Original
Dimple texture	diameter	Avg.=147.3μm SD=9.2μm	Avg.=10.0μm SD=0.3μm
	Pitch distance	X=160.0μm, Y=160.0μm	
	Number of dimples	3136	3136
	Picture		

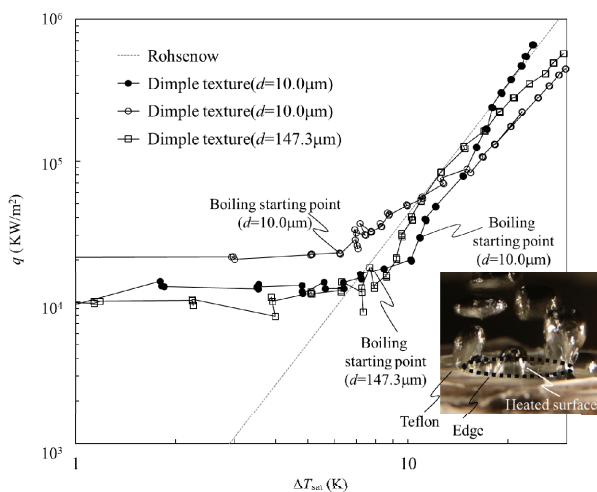


図7 1号機によるディンプルテクスチャの沸騰曲線

の要因になったと考えられる。したがって、開口径の異なる2種類のディンプルテクスチャについても、ディンプルの条件による差を評価することはできなかった。

3・3 2号機の装置概要

伝熱面周囲での活発な沸騰を抑制するために、伝熱ブロックの形状を図8に示すフィン型に変更した。フィン厚さを0.3mmとすることで、エッジ部への熱伝導を抑え、さらに伝熱面以外の周囲を断熱し、評価サンプルの下部からヒータで加熱することで、伝熱面からのみ沸騰させる。伝熱ブロックには、伝熱面から3mm, 8mm, 13mmの位置にK型熱電対が埋め込まれ、これらから伝熱面の温度、および熱流束を推測する。また、アルミは沸騰水と反応してアルミ表面に水和酸化物質層を形成する可能性があるため、伝熱ブロック材料をアルミから銅に変更した。

伝熱ブロックの形状変更に伴い、評価装置の再設計を行った。これを2号機とし、図9に模式図を示す。装置の水槽部の大きさは350mm×350mm×210mmで、この水槽内部の水をヒータで加熱し、飽和状態を維持できる構造にした。ヒータの加熱で発生する気泡の影響を抑えるため、加熱用ヒータと評価サンプルの間には仕切りを設置した。

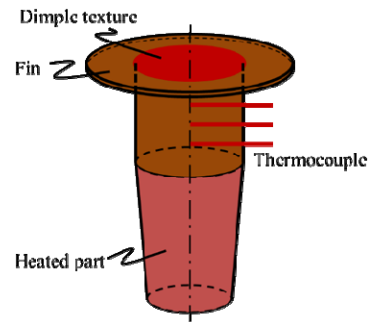


図8 フィン型伝熱ブロック

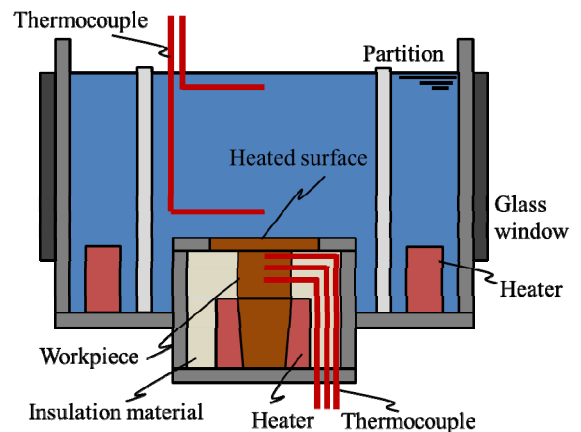


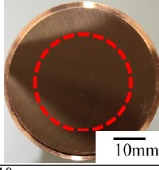
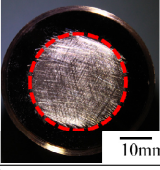
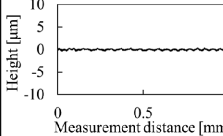
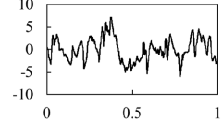
図9 伝熱特性評価装置(2号機)

また、130mm×90mmの観察窓を4か所配置し、ディンプルテクスチャから発生する気泡の観察を可能にした。

3・4 2号機による伝熱特性評価

伝熱面性状の違いによって、伝熱特性に差が生じるかを確認するために、2号機を用いて、切削面と粗面の2種類の伝熱面を評価した。表2に切削面であるサンプル1と、粗面であるサンプル2の写真、および表面粗さを示す。また、サンプル1については、再現性を確認するため、同条件で伝熱面を作製し、サンプル1-1, サンプル1-2とした。図10に各サンプルの沸騰曲線を示す。いずれも、沸騰開始付近で傾きが変化し、熱流束は指数関数的に増加していること、自然対流領域における上向水平板自然対流熱伝達の式、及び Rohsenow の相関式とよく一致していることから、沸騰前後の伝熱特性を評価できている。また、サンプル1-1, 1-2 についても、沸騰開始点および沸騰後の傾きが一致していることから再現性も確認することができた。面性状の違いに着目すると、沸騰開始点はサンプル2(粗面)の方がサンプル1(切削面)より2.7K低い。一般に表面粗さが大きいほど、沸騰の核になるキャビティが存在するため、沸騰開始は低過熱度で生じるが、本実験でも同様の結果を示した。さらに、表3にサンプル2(粗面)の最大過熱度である17.4K付近の、各サンプルの熱流束と沸騰の様子を示す。同過熱度での熱流束は、サンプル2(粗面)の方がサンプル1(切削面)より約3.1倍高く、沸騰の

表 2 面性状の異なる伝熱面

	Sample1	Sample2
Work material	Oxygen-Free Copper (C1020)	
Measuring surface		
Section curve		
Ra	0.10 μm	2.0 μm
Rz	0.57 μm	6.4 μm

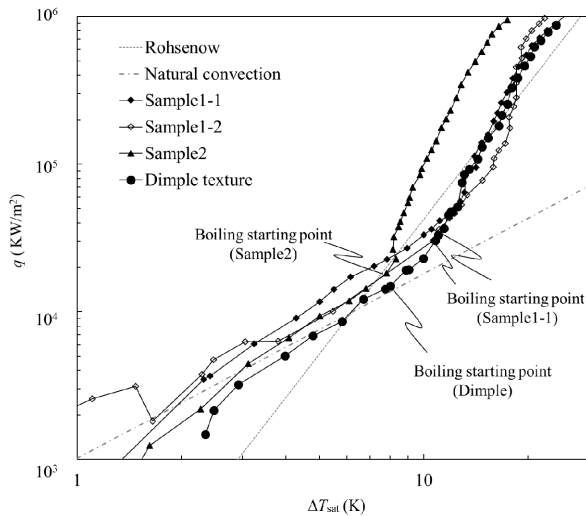
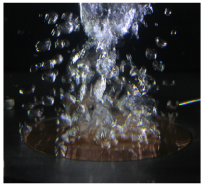
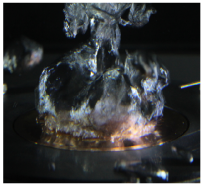


図 10 伝熱特性の評価

表 3 熱流束と沸騰様相

	Sample1	Sample2
ΔT_{sat}	17.4 K	
q	$3.1 \times 10^5 \text{ W/m}^2$	$9.6 \times 10^5 \text{ W/m}^2$
State of bubble		

様子も活発であることが確認できる。これらより、本装置は、面性状の違いによる伝熱特性を評価できる装置として信頼性が高いと考えられる。

さらに、ディンプルテクスチャの伝熱特性を評価するため、サンプル 1 と同様に作製した、切削面 ($Ra=0.082\mu\text{m}$) に荷重制御加工ユニットにて、 $X \cdot Y\text{-Pitch } 200\mu\text{m}$ で、開口径 $d=55.2\mu\text{m}$ のディンプルを 5041 点加工した。図 11 にディンプルテクスチャの写真を示す。図 10 に示したディンプルテクスチャの沸騰曲線より、沸騰開始点に着目すると、過熱度は 8.0 K であり、サンプル 2(粗面)の沸騰

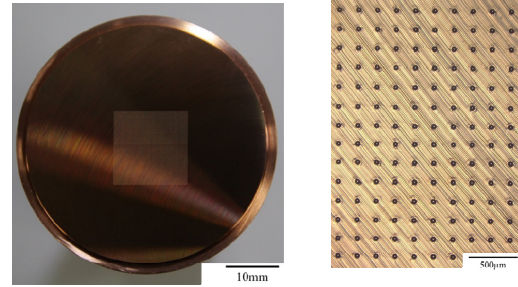


図 11 ディンプルテクスチャ

開始過熱度 7.8 K と非常に近い値になっている。また、沸騰開始後においては、ディンプルテクスチャの傾きは、表面粗さが同等であるサンプル 1 (切削面) の傾きとほぼ一致している。これらのことから、ディンプルは粗面と同様に、気泡発生のキャビティになり得たが、沸騰促進には至らず、沸騰開始後における伝熱特性は、ディンプルの有無にかかわらず、表面粗さの影響が大きいとされる。すなわち、今回加工したディンプルテクスチャにおいては、沸騰開始後の熱伝達率の向上といった伝熱特性に影響せず、伝熱促進に有効なキャビティとしては作用しないが、沸騰開始における気泡発生には寄与することが確認できた。

4. 結言

本研究では、沸騰伝熱メカニズムの解明を目的として、多様なディンプルテクスチャを作製する装置の開発、および伝熱特性を評価するシステムを構築した。その結果、高精度、かつ広範囲の開口径を有するディンプルテクスチャの作製が可能であることを確認した。また、それらの伝熱特性を評価した結果、信頼性のある沸騰曲線が取得でき、ディンプルテクスチャと粗面との伝熱特性の違いを評価することができた。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団の奨励研究助成 B(萌芽的研究)のご支援を受けて実施いたしました。深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 藤田恭伸: 沸騰熱伝達の促進と機構, Jour. HTSJ, Vol. 36, No. 141 (1997), 27-39.
- 2) 高松 洋・久保秀雄・本田博司: リエントラント型人工くぼみを有する模擬チップの浸潤沸騰冷却, 日本機械学会論文集(B編), 64巻, 621号 (1998-5).
- 3) 倉成健司・中出口真治・矢澤孝哲・桃木悟・松尾寧彦・山田玲子: 微細凹凸による機能表面創製の研究, 精密工学会全国大会講演論文集, Vol. 2016S, (2016), 275-276.
- 4) Matsuo yoshihiko, Shinji Nakadeguchi, Satoru Momoki, Takanori Yazawa, Kenji Kuranari, Reiko Yamada, Hideshiro Moritaka: Study on Functional Surface Creation by Micro Unevenness, Proc. of the 4th IFHT2016, Sendai, Japan, (2016), 1926.