

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：17104

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18030

研究課題名(和文) 超高熱流束除熱に向けたマイクロチャネル内沸騰熱伝達の機構解明と革新技术創出

研究課題名(英文) Study on heat transfer mechanisms in flow boiling heat transfer in a microchannel for high-heat-flux cooling technology

研究代表者

矢吹 智英 (Yabuki, Tomohide)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：70734143

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：ミニ・マイクロチャネル内流動沸騰熱伝達における熱伝達メカニズムを詳細に調べるための、薄膜温度センサを集積したMEMSセンサとセンサ信号調整系、薄液膜厚さ可視化用のレーザー干渉計を開発した。また、超親水性マイクロナノ階層構造を用いることで、撥水型ドライアウトを防止し、熱伝達率、限界熱流束を促進することが出来た。マイクロナノ階層構造の利用によりシリコン平滑面の3.2倍の限界熱流束を達成することができた。

研究成果の概要(英文)：MEMS sensor having micro thin film temperature sensors, signal conditioning circuits and laser interferometer were developed for the precise measurement of local heat transfer and thin film thickness in flow boiling in mini and micro channels. Additionally it was found that dewetting-type dry-out of thin liquid film causing heat transfer deterioration in boiling in small channels was able to be prevented by using a superhydrophilic micro/nano hierarchical structure. The critical heat flux was enhanced by a factor of 3.2 compared to a flat silicon surface by preventing the dewetting-type dry-out.

研究分野：熱工学

キーワード：沸騰熱伝達 ミクロ液膜 MEMS 超親水性 ナノ構造 マイクロチャネル

1. 研究開始当初の背景

電気自動車や空調機器などの電力制御に使用されるパワー半導体は大きな発熱を伴うため、機器の性能、寿命、エネルギー効率の観点から、その熱マネジメントが重要な課題である。パワー半導体の発熱密度は現在 $100\sim 150\text{W}/\text{cm}^2$ に及び空冷、液冷では耐熱温度まで冷却することが難しくなっている。発熱密度が今後さらに増大すると予想される中、マイクロチャンネル内流動沸騰の利用がコンパクトな冷却デバイスの実現に有力とされ、多くの研究が行われてきた。気泡がチャンネル内壁から拘束を受けて流れ方向に細長く成長するマイクロチャンネル内沸騰二相流では、強制対流熱伝達や気泡と壁面との間に形成されるマイクロ液膜と呼ばれる薄液膜の形成、蒸発、ドライアウト、ドライアウト領域のリウエットングが生じることが分かっている。これら伝熱素過程は非常に小さな時空間スケールで生じるため、従来計測技術では詳細なデータが得られず、沸騰熱伝達メカニズムには未だ不明な点が残されている。沸騰熱伝達メカニズムの正しい理解は、高性能冷却デバイスの創製や数値計算による沸騰熱伝達予測技術の向上には不可欠である。

2. 研究の目的

(1) MEMS センサを用いた局所壁面伝熱計測に高速レーザー干渉法による液膜厚さ計測を加えた複合計測により、マイクロ液膜の形成、ドライアウト機構など、マイクロチャンネル内沸騰が内包する未解明な伝熱素過程の特性を明らかにすることが一つ目の目的である。

(2) 超親水性マイクロ・ナノ構造を用いることで、伝熱に重要な役割を持つ薄液膜を安定化させて撥水型ドライアウトを抑制し、除熱限界、熱伝達率を向上させる新規な沸騰伝熱促進技術を開発することが二つ目の目的である。

3. 研究の方法

(1) 気泡底部の薄液膜厚さをレーザー干渉法で計測し、それに加えて MEMS センサを用いて局所伝熱量を計測することで、支配的な伝熱メカニズムの特定、薄液膜厚さの形成及びドライアウト特性の解明を行う。本プロジェクトでは、それぞれの技術をマイクロチャンネル内流動沸騰の計測に適用するに至らなかったが、今後の研究に向けて、レーザー干渉系を構築するとともに、薄膜温度センサおよび信号調整系を製作した。

(2) これまでの研究で、薄液膜が壁面にはじかれるようにしてドライアウトする撥水型ドライアウトの存在が明らかとなっている。薄液膜の蒸発が伝熱に重要な役割を持つと考えられるため、撥水型ドライアウトは伝熱劣化の要因になると考えられ、高熱伝達率、

高限界熱流束を得るためには撥水型ドライアウトを防止する方法を構築する必要がある。非加熱条件でのチャンネル内への空気注入実験を行い、薄液膜挙動の観察を行った。結果として、厚さ 4 ミクロン程度の銅薄膜をアルカリ性水溶液に浸漬する方法で作製した超親水性酸化銅ナノ構造を用いることで撥水型ドライアウトを防止できることを明らかとした。次に、沸騰実験を行い、撥水型ドライアウトの防止が伝熱促進につながることを確認した。撥水型ドライアウトの防止に加え、実効的な薄膜厚さを増加させて蒸発に起因するドライアウトを遅延することを目的としてシリコンのウェットエッチングによりマイクロ構造を作製し、その表面に酸化銅ナノ構造を成長させたマイクロ・ナノ階層構造(図1)を作製し、沸騰実験に用いた。伝熱壁であるシリコン基板の裏面には、流れ方向の温度分布の計測と加熱を同時に行えるアルミ薄膜製の測温抵抗体兼ヒーター(図2)を加工している。

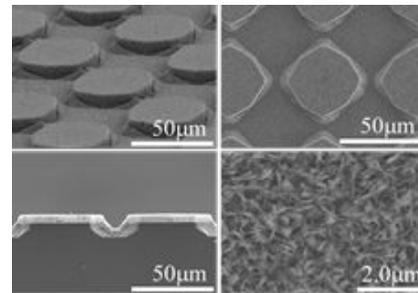


図1 超親水性マイクロナノ階層構造

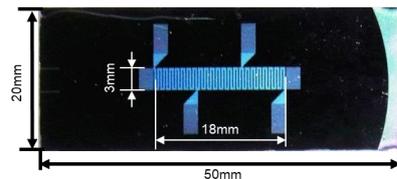


図2 薄膜測温抵抗体兼ヒーター

4. 研究成果

(1) 前述の通り、レーザー干渉系および MEMS センサを用いた流動沸騰実験を行うことが出来なかった。しかし、予備実験として行ったプール沸騰時のマイクロ液膜の干渉計測の結果、マイクロ液膜の蒸発・形成特性に関する興味深い結果が得られた。

水やエタノールの沸騰の場合、気泡底部にマイクロ液膜の形成を表す干渉縞が観察された。一方、フロン系冷媒 HFE-7100 の沸騰の場合、マイクロ液膜が観察されなかった。SU-8 を断熱層として 15 ミクロン伝熱面上に塗布して伝熱速度を低下させた条件においても、マイクロ液膜が観察されなかったことから、マイクロ液膜が形成されて瞬時に蒸発しているのではなく、マイクロ液膜が形成されていないと現時点では考えている。液膜形成の有無の条件については今後、数値計算や他の冷媒を

用いた実験で検証していく。

また、干渉像から得られるマイクロ液膜体積、気泡発生周期、発泡点密度からマイクロ液膜の蒸発の全熱輸送への寄与を見積もった。その結果、データにばらつきはあるものの、マイクロ液膜蒸発は全熱輸送に対して数十パーセントの寄与を持つことがわかり、マイクロ液膜の蒸発が重要な役割を持つことがわかった。

また、限界熱流束の原因となる乾きの拡大はマイクロ液膜のドライアウトとその後のドライパッチの合体が要因であるという結果も得られた。

局所伝熱量計測用 MEMS センサについては、スパッタリングとフォトリソグラフィにより測温抵抗体を集積したセンサが完成し、信号増幅用アンプも自作して沸騰計測に十分な低ノイズ信号が得られるところまで確認した。今後、開発したセンサを用いてマイクロ液膜が蒸発する過程やドライパッチがリウエットする過程の局所伝熱量を計測してマイクロチャンネル内流動沸騰における重要な伝熱素過程を明らかにしていく。

(2) シリコン平滑面、ウェットエッチング加工したマイクロ構造、銅薄膜の化学酸化で加工した酸化銅ナノ構造、マイクロ構造表面に酸化銅ナノ構造を加工したマイクロ・ナノ階層構造の四種の伝熱面を用いて沸騰実験を行い、撥水型ドライアウト防止や薄液膜の実効的厚さ増加の伝熱促進効果を沸騰実験で検証した。

図3が脱気・加熱用液体容器、ポンプ、流量計、テストセクション、ハイスピード撮影用光学系からなる実験装置である。沸騰媒体は水で流速0.22m/sec、チャンネル入口温度86°Cで実験を行った。

図4は四種の表面の沸騰曲線で縦軸が熱流束、横軸が壁面温度である。沸騰時の熱伝達率は熱流束1MW/m²付近において、シリコン平滑面では29kW/(m²・K)程度であったのに対し、マイクロ構造表面と酸化銅ナノ構造表面、マイクロ・ナノ構造表面では55kW/(m²・K)前後の値であった。微細構造付表面では、撥水型ドライアウトを抑制でき、薄液膜の蒸発を有効利用できたことが高熱伝達率につながっていると考察される。

限界熱流束については、シリコン平滑面と比較してマイクロ構造表面では1.5倍、酸化銅ナノ構造表面では2.3倍、マイクロ・ナノ構造表面では3.2倍であった。可視化結果と限界熱流束を照らし合わせると、マイクロ構造表面では微細溝の液膜保持効果が限界熱流束を促進し、ナノ構造化による壁面の超親水化は撥水型ドライアウトを抑制して限界熱流束を向上させることが分かった。マイクロ・ナノ階層構造は双方の特性を両立できており、結果として最大の限界熱流束を示している。供給した水をチャンネル内で全て蒸発させるのに必要な熱量を除熱限界として、得られた四種の表面の結果と比較すると、シリコ

ン平滑面で8.0%、マイクロ構造表面で12.4%、ナノ構造表面で19.0%、マイクロ・ナノ構造表面で25.5%であった。マイクロ構造の寸法を最適化することで、限界熱流束を除熱限界により近づけていくことが今後の課題である。

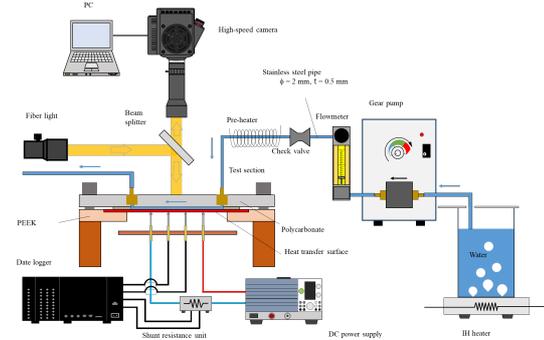


図3 流動沸騰実験装置概略図

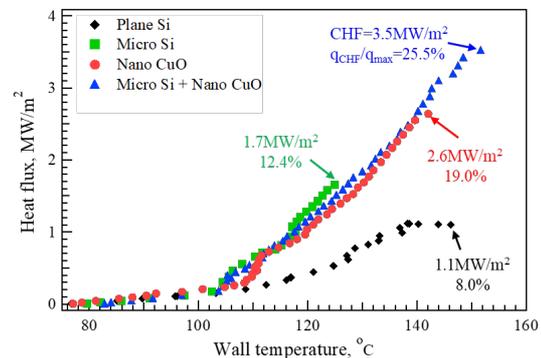


図4 沸騰曲線

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計4件)

1. 藤井翔大, 矢吹智英, 宮崎康次, 超親水伝熱面を用いたミニチャンネル内流動沸騰の熱伝達促進, 第55回日本伝熱シンポジウム, 2018
2. Tomohide Yabuki, Sota Kuroki, Shodai Fujii, Koji Miyazaki, Enhancement of flow boiling heat transfer in minichannel by preventing dewetting of thin liquid film using superhydrophilic surface, The 9th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC9), 2017
3. Tomohide Yabuki, Measurement and control of nucleate boiling heat transfer with micro/nano technologies, The 6th International Symposium on Micro and Nano Technology (招待講演), 2017
4. Masako Nakano, Yuta Kondo, Tomohide Yabuki, Koji Miyazaki, Interferometric

measurement of microlayer thickness
beneath nucleate boiling bubble at high heat
flux, The 6th International Symposium on
Micro and Nano Technology, 2017

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

6. 研究組織

(1)研究代表者

矢吹 智英 (YABUKI, Tomohide)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：70734143