

ナノテクで沸騰を科学する

工学研究院機械知能工学研究系 准教授 矢吹 智英



平成29年4月に工学研究院機械知能工学研究系の准教授に昇任しました、矢吹と申します。熱や物質の輸送を取り扱う伝熱工学を専門とし、宮崎康次先生が主宰の熱デバイス研究室のメンバーとして研究を行っております。このたびは紙面をお借りして自己紹介、研究紹介の機会をいただきましたことに感謝いたします。

研究紹介

自己紹介
明治大学で学部時代から博士後期課程まで9年間を過ごし、その中の6年間、中別府修教授のご指導の下、沸騰熱伝達メカニズムの研究に取り組んできました。博士号取得後、2014年より、本学、助教に就任し、宮崎先生とともにナノ構造を用

いた伝熱制御を共通のテーマとして研究を行っております。2015年には、UCバークレーで在外研究をする機会をいただきました。北海道帯広市で高校卒業まで18年間暮らし、大学生時代の東京・神奈川での9年間を経て、北九州へ赴任いたしました。皆様からのご支援をお受けしてやりがいを感じながら楽しく研究・教育活動に取り組むことができております。

沸騰気泡の美しさに魅せられて学生時代から沸騰熱伝達をテーマに研究を行ってきました。キッチンで見かけるあの沸騰(図1)です。沸騰は液体を加熱したときに生じる現象のため想像しにくいのですが、実は、他の伝熱形態と比較して高い熱伝達率(小さな温度差でたくさんの熱を輸送することができる性質)を持っており、多量の熱を高効率で長発電プラントやボイラーの高性能、高信頼性化などを目的として活発に沸騰

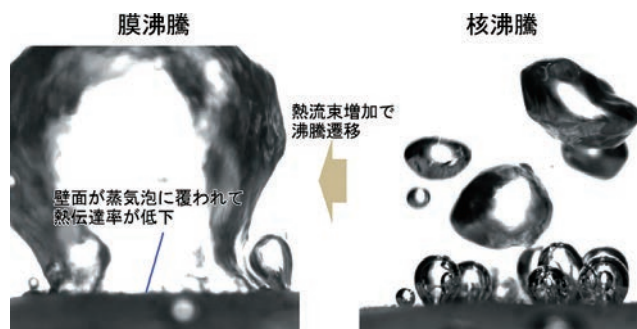


図1. 核沸騰と膜沸騰の様子

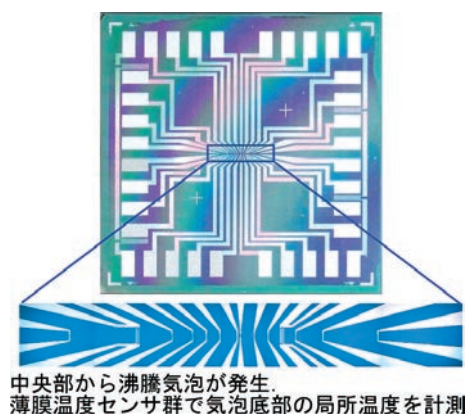


図2. 沸騰研究用MEMSセンサ

がある研究者は液体が蒸発する際に生じる潜熱輸送が重要だと主張します。沸騰のメカニズムが解明されていない一つの要因として、沸騰が内包しているマイクロスケールの伝熱過程の計測が従来の温度センサでは難しい点が挙げられます。そこで、薄膜温度センサを多数集積したMEMSセンサ(図2)を沸騰研究用に開発し、沸騰気泡底部の局所的な温度変化を高速計測することで熱伝達メカニズムを調べてきました。薄膜温度センサは自身の熱容量が小さいため、高速な温度変化に追従できる特徴を持ちます。実験結果の詳細な説明は割愛させていただきますが、気泡底部に形成される厚さ1マイクロン程度のマイクロ液膜と呼ばれる液膜が

蒸発して乾く様子、乾いた領域が気泡離脱時に再度濡らされる様子など、気泡底部の伝熱素過程を局所温度データから読み取ることができました。温度データを用いた伝熱解析により、水の低熱流束域の沸騰では潜熱輸送が重要な役割を持つことを明らかとすることができました。最近ではMEMS熱センサを用いた局所温度計測にレーザー干渉法を用いた液膜厚さ計測を組み合わせた手法で、工業的な重要性が高い高熱流束域の熱伝達メカニズムを調べる研究に取り組んでいます。

私たちが日常、鍋底で見かける沸騰は専門的には「核」沸騰と分類されます。核沸騰の状態から熱流束を増やし、限界熱流束に達すると膜沸騰とよばれる形態に遷移します。ちなみに（通常の使い方ならば）コンロの火炎では限界熱流束を超える熱流束を与えられないため、水の膜沸騰は観察できません。膜沸騰では壁面が熱伝導率の小さな蒸気（断熱材）でおおわれるため、核沸騰と比較して熱伝達率が大きく低下してしまいます。熱流束が大きい状態で熱伝達率が急激に低下すると何が起ころうか。壁面の温度が急激に数百度、あるいは千度以上まで上昇して

しまいます。電子機器冷却でこのようなことが起これば電子機器は破損するため、限界熱流束を大きくすることは沸騰冷却システムの小型化、信頼性向上につながり、工業的に重要な意味を持っています。壁面が蒸気に覆われることを防ぐ、つまり壁面を液体がよく濡らすようにすれば限界熱流束が向上することはよく知られています。濡れ性の制御には表面への微細構造の付与が有効で、超親水、超撥水といった極端な濡れの特性を持つ表面を実現可能です（図3）。私たちは、溶射皮膜や微粒子焼結体の表面に化学酸化でナノ構造を成長させて超親水表面を作製し、限界熱流束を向上させる研究を行ってきました。本手法では簡便に大面積の超親水表面を作製することができ、結果として銅粗面の2倍を超える限界熱流束を得られました。しかし、核沸騰の維持に不可欠な壁面への液体供給が、それと逆行する上昇気泡からなる蒸気流によって阻害されるため、壁面の濡れ性を改善する手法の延長線上には、限界熱流束の飛躍的向上は望めません。現在は、三次元的構造を持つ焼結体で液体供給方向と蒸気排出方向を分離して、なおかつナノ構造を導入して液体供給力

を増強する、ナノ構造付与三次元焼結体を用いた限界熱流束促進の研究を行っています。

研究紹介の最後に、最近取り組んでいる熱スイッチ、ダイオードの研究を紹介させていただきます。電気の世界にはダイオードやスイッチ、バリスタ等、熱の世界にはない多様な非線形素子が存在しています。非線形熱デバイスが実現され、熱を一方向のみに通したり、熱輸送をオン・オフしたりできれば、これまでは不可能だった新しい熱制御が可能になり、熱マネジメント技術や、エネルギー回収技術の発達に寄与します。非線形熱素子の実現には様々な現象が作動原理として利用可能と考えています。現在、相変化や濡れ制御、ポリマー複合材料などを利用して熱スイッチ・ダイオードを開発する研究に取り組んでいます。

おわりに

社会から学生に要求される経験や能力が多様化あるいは変化する中、学生を輩出する側にいる教員にも柔軟さが求められていると感じています。学生たちによい環境、教育を与えられるよう、私自身、成長を志す姿勢を持ち続ける所存です。

それまではお世辞にも学業への取り組みが真面目とは言えなかった私にとって、学部4年生の研究室配属が大きな人生の転換点であり、研究の面白さを味わわせてくださった学生時代の指導教員の先生には大変感謝しています。私も、教育研究を通して学生たちに少しでも良い刺激を与えられたらと思っています。

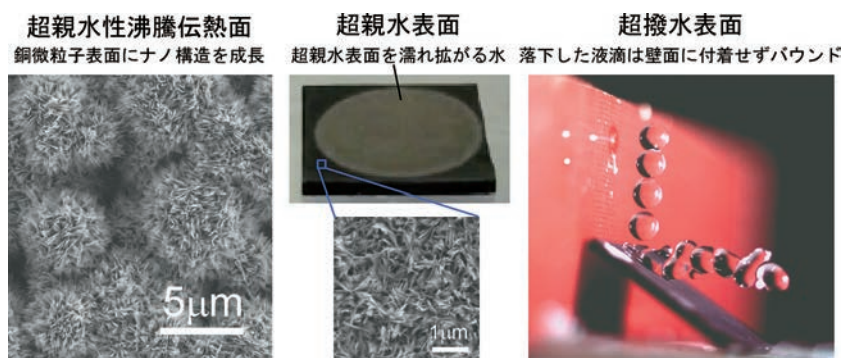


図3. ナノ構造を用いた濡れ制御