

「エネルギー高効率利用のための相界面科学」
平成23年度採択研究代表者

H23 年度 実績報告

高田保之

九州大学大学院工学研究院・教授

固気液相界面メタフルイディクス

§1. 研究実施体制

(1)「高田」グループ

① 研究代表者:高田 保之 (九州大学大学院工学研究院、教授)

② 研究項目

- ・濡れ性の制御技術の開発
- ・複雑構造体を用いた伝熱面の評価
- ・3相界面のマルチスケールシミュレーション

(2)「小山」グループ

① 主たる共同研究者:小山 繁 (九州大学大学院総合理工学研究院、教授)

② 研究項目

- ・高性能炭素系吸着材の開発と吸着式ヒートポンプ・冷凍サイクルへの展開

(2)「大宮司」グループ

① 主たる共同研究者:大宮司 啓文 (東京大学大学院新領域創成科学研究科、准教授)

② 研究項目

- ・ナノ細孔を有する多孔質材料の機能化
- ・ナノ細孔における吸着・移動現象の制御と高機能相界面の創成

§ 2. 研究実施内容

(1) 濡れ性の微細制御および複雑構造伝熱面内相変化現象(高田グループ)

今年度は、濡れ性を微細に制御した界面の沸騰伝熱試験を精度よく実施するための準備期間と位置づけている。そこで、マクロなスケールでの濡れ性がプール沸騰に及ぼす影響についてまず調べた。具体的には、濡れ性が大きく異なる4種類の伝熱面(図1)を製作し、それぞれについてサブクール度を変化させて発泡開始加熱度と沸騰様相を調べた。結果としては、サブクール度0Kにおいては、撥水加工を施した面では発泡開始過熱度が小さいこと、超親水加工を施した面では発泡開始過熱度が大きいものの限界熱流束も大きいことがわかった。超親水面に斑点状に撥水加工を施した面では、サブクール度 20K を除いて、サブクール度が大きくなるにつれて発泡開始過熱度が小さくなることもわかった。さらに、超親水性加工を施した伝熱面の上にハニカム多孔質体を設置して飽和プール沸騰の限界熱流束の実験も行った。超親水加工を施すと、施さない場合に比べて、限界熱流束が約 30%向上した。また、伝熱面上に設置したハニカム状多孔質体近傍での複雑な気液流動を可視化できる実験装置を製作し、十分な精度で限界熱流束の実験が可能であることを確認した。微細に濡れ性を制御する技術としては、酸化チタン薄膜を FIB によって局所的にエッチングする手法を開発した。図2に SEM 像を示すが、膜厚 200nm 程度であれば2ミクロン以下で完全に除去可能であることがわかった。ただし、基板は Ga イオンによって荒れる場合が多いことから今後はこの粗さを踏まえた沸騰実験が必要となる。このようなマイクロ領域の熱現象を探索するためのセンサの開発も行った¹⁾。一方、理論的には、分子動力学法によって単原子分子からなる液滴の動的濡れ現象を解析した。数十万分子、十ナノ秒程度の大規模計算を行い、液滴の濡れ面積や濡れ角の時系列計算し、サイズや平衡接触角への依存性からスケーリング則を同定した。その結果、粘性の比較的小さい液体の場合は、数十ナノメートルの液滴半径であっても慣性力の影響が強いことが示唆された。加えて、ナノメートルスケールで表面の濡れ性や構造が規則的に変化する単純なナノ構造表面上で同様の解析を行い、スケーリング則や慣性力の表面構造に対するロバストネスを明らかにした。

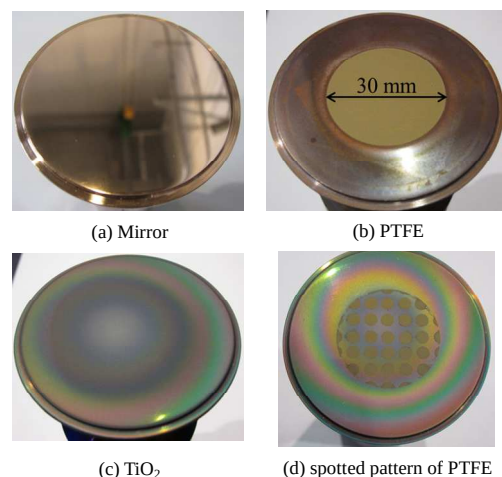


図1 濡れ性を制御した伝熱面

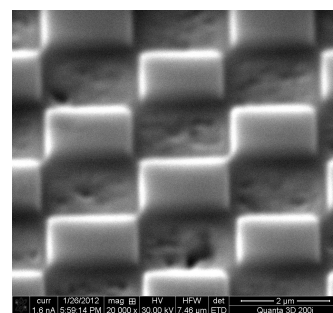


図2 酸化チタン薄膜の2 μ m ピッチでの FIB 加工例

(2) 高性能炭素系吸着材の開発と吸着式ヒートポンプ・冷凍サイクルへの展開(小山グループ)

表面官能基によるエタノール平衡吸着量への影響を検討するため、本年度はモデル試料の調製に注力した。モデル試料の原材料としては、市販活性炭の内で最も大きな比表面積を有する活

活性炭 Maxsorb III を用いた。これまでのところ、 H_2/Ar ガス中 $600^{\circ}C$ での 24 時間熱処理により酸素含有量を 2% 以下へ減少させた少官能基 Maxsorb III について、エタノール平衡吸着量測定に必要な量の調製ができている。含酸素表面官能基を導入(官能基量の増加)した多官能基 Maxsorb III については、比表面積を減少させずに官能基量を増加できる条件での KOH 処理により調製中であり、必要量が調製でき次第、エタノール平衡吸着量測定を行う予定である。

また、活性炭に対する各種ガスの吸着量を予測する既存のモデルを整理し、従来型の吸着冷凍サイクルにおける理論的な性能解析を行った。既存の粒状活性炭(Maxsorb III)に対する平衡吸着特性が文献で示されている冷媒(エタノール、メタノール、R1234ze(E)、アンモニア、二酸化炭素)および従来の吸着冷凍機で冷媒として使用されている水について、冷媒としての特性および吸着冷凍サイクルの性能を評価した。水は蒸発潜熱が大きいという利点があるが、蒸気圧が低く蒸気密度が小さいために、配管や熱交換器が大型になるという問題がある。エタノールやメタノールは、水と同様に標準沸点が大気温度よりも高いが、蒸気密度は水に比べて1桁大きい。ただし、蒸発潜熱は水の半分弱である。アンモニアはさらに蒸気密度が高く、蒸発潜熱はメタノールと同程度である。一方、R1234ze(E)や二酸化炭素は既存のヒートポンプでも使用される冷媒であり、蒸気密度が極めて高くシステムの小型化が望めるが、蒸発潜熱が水に比べて15～20分の1となる。

これらの冷媒を吸着冷凍サイクルに用いた場合の性能を把握するため、既存の平衡吸着式を基にサイクルの静的解析を行った。図3に成績係数(COP)、吸着材単位質量当たり冷凍効果(SCE)の比較を示す。COPの点では、エタノール-活性炭の組み合わせと従来型で用いられる水-シリカゲルの組み合わせとは同等であり、メタノール-活性炭のCOPはこれらを上回る。SCEの比較では、エタノールまたはメタノール-活性炭が水-シリカゲルを大きく上回る。一方、冷媒の高圧化によるシステムの小型化が期待されるフロン系冷媒や二酸化炭素は、吸着冷凍サイクルとしての性能があまり期待できないことが明らかとなった。サイクル性能だけを考えるとメタノールが有望であるが、経口毒性や取扱いの点を考慮すると、エタノールの方が好ましい。エタノール-活性炭の組み合わせは、

水-シリカゲルの組み合わせよりもSCEが大きく、COPは程度となる。本プロジェクトの研究成果によってエタノール吸着量を拡大できれば、SCE、COPの向上につながるため、従来型を上回る性能の吸着冷凍システムの開発が可能であることが示された。今後は、新たに調整した活性炭によるエタノール吸着特性を測定する。

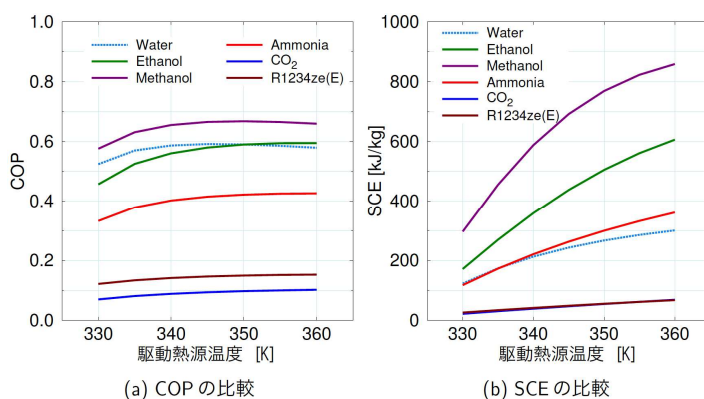


図3 各種冷媒による吸着冷凍サイクルの性能比較

(3) ナノ細孔における吸着・移動現象の制御と高機能相界面の創成(大宮司グループ)

ナノメートルオーダーで構造規則性を有するナノ多孔質材料粒子, 薄膜の合成を開始した. また, 次年度以降に対象とする材料として, ポリマーの相分離を利用した新しいメソポーラスシリカの合成法, 細孔構造の制御方法の検討を開始した. また, 階層構造を有するゼオライトの合成方法, 評価方法についての調査を開始した. さらに, 合成されたナノメートルオーダーで構造規則性を有するナノ多孔質材料粒子(メソポーラスシリカ粒子)を対象として, 細孔内部の水の吸着, および細孔内部の水の移動について実験を開始した. また, 理論解析用のプログラムコードを作成した. 吸着特性, 移動特性の評価方法, および実験計測と理論解析の比較項目について検討を行った.

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

● 論文詳細情報

1. Koji Takahashi, Jun Hirotani, Takashi Nishiyama, Tatsuya Ikuta, Hiroshi Takamatsu, APPLICATIONS OF NANO HOT-FILM SENSOR FOR MICRO/NANOSCALE THERMAL MEASUREMENT, Proc. ASME 2012 3rd Micro/Nanoscale Heat & Mass Transfer International Conference, March 3-6, 2012, Atlanta, Georgia, USA, MNHMT2012-75030

(3-2) 知財出願

① 平成 23 年度特許出願件数(国内 0 件)

② CREST 研究期間累積件数(国内 0 件)