

「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

H25 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イクス

## §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

・濡れ性の微細制御および複雑構造伝熱面内相変化現象

### (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

### (3) 「大宮司」グループ

① 主たる共同研究者: 大宮司 啓文 (東京大学大学院工学系研究科、教授)

② 研究項目

・ナノ細孔を有する多孔質材料の機能化

・ナノ細孔における物質の吸着・移動現象の解析と制御

・高機能湿度制御材料・システムへの応用

## §2. 研究実施の概要

### (A) 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)

沸騰熱伝達の高性能化のために本研究で提案している親水・撥水複合伝熱面をループ型ヒートパイプへ応用すべく溶存空気の影響について実験的に調べた。昨年度までの実験は開放式で行っていたことから作動流体内に空気が溶存していたが、今回新たに空気が混入しない密閉式のサブクール沸騰実験系を構築した。撥水斑点を施した伝熱面において発泡開始温度・熱伝達率・気泡形状などを調べた結果、例えば開放系で得られていた負の発泡開始過熱度が密閉系では現れなくなるなど、撥水斑点からの発泡に溶存空気が大きな影響を与えていることがわかった。この考察は窒素分子を混入させた水の伝熱面上での気泡核形成の分子動力学シミュレーションで確認することができた。発泡機構のさらなる理解のために固液界面でのナノバブルを原子間力顕微鏡を用いて発生初期から時系列的に計測した。その結果、溶存空気によって形成されるナノバブルの三相界線にかかる線張力を定量的に計測することに成功し、さらにその形成機構を明らかにすることもできた。さらに、二層構造を持つハニカム多孔質体を用いた場合の限界熱流束向上メカニズムについて検討した。限界熱流束向上には毛管力の影響が重要な役割を果たしていると考えられるので、毛管力の効果を抽出した実験を行うとともに、提案する毛管限界モデルとの比較検討を行った。

### (B) 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)

市販されている活性炭パウダーに対して化学的な処理を施し、活性炭の酸素含有量を調整した。H24年度までの研究成果によって、活性炭表面の酸素官能基がエタノール分子のヒドロキシ基(-OH)と強い相互作用を持つことを確認している。したがって、酸素官能基の量を調整することによって、平衡吸着量や動的な吸着特性に変化が現れると予測されるため、これらの特性に対する酸素官能基量の影響を調べた。酸素含有量が約4.4%の活性炭パウダーに対して、水素処理を施した活性炭(酸素含有量約1.8%)、水素処理の後に水酸化カリウム(KOH)処理を施した活性炭(酸素含有量約10%)を作成した。これら3種類の活性炭試料の比表面積はどれも約3,000m<sup>2</sup>/gである。吸着式ヒートポンプへの応用を想定し、30℃~70℃の吸着等温線の測定および吸着速度の解析を行った結果、酸素含有量を減少させた水素処理活性炭は平衡吸着量がわずかに増加するとともに平衡到達時間が長くなった。酸素含有量を増加させた水素-KOH処理活性炭は、平衡吸着量が最大で20%程度低下したが、平衡到達時間は短くなった。この結果から、水素-KOH処理活性炭では酸素官能基とエタノール分子との相互作用がより強く働き、吸着速度向上の効果が現れていると考えられる。吸着式ヒートポンプでは、数分のオーダーで吸着と脱着を繰り返すため、最大吸着量が低下しても吸着速度の向上が重要であり、水素-KOH処理によって吸着式ヒートポンプの性能を改善できる可能性が示差された。

### (C) 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)

メソポーラスシリカなどの規則性ナノ細孔に閉じ込められた水の相状態や吸着・移動特性の基礎メカニズムを解明し、得られた知見をデシカント空調システム的设计開発へ応用展開することを目的とする。(1)ナノ細孔を有する多孔質材料の機能化、および(2)ナノ細孔における物質の吸着・移動現象の解析と制御に取り組み、(3)高機能湿度制御材料・システムの創成を目指している。本年

度は(1)については、ブロックコポリマーのマイクロ相分離を利用したメソポーラスシリカについて、シリンドラー状細孔のものの構造評価を行い、従来より知られているものよりも細孔がストレートで短いものであることを明らかにし、(2)での移動現象の解析により評価した。多孔質材料の表面物性評価を行う手法として、極低相対圧からのガスおよび蒸気吸着等温線の測定法を詳細に検討し、25°Cにおいて相対圧  $10^{-5}$  からの水蒸気吸着等温線の測定が可能となった。(2)については、メソポーラスシリカへの水蒸気吸着脱着について、重量法による測定を行い、吸着等温線、吸着緩和曲線の評価した。また、ナノ細孔内部における凝縮水の移動現象を分子シミュレーションにより解析した。特に、毛管凝縮、毛管蒸発が起こる時の吸着・移動現象を考察し、条件により、表面拡散、毛細管現象など複数の移動メカニズムが現れることを明らかにした。(3)については、メソ細孔内部の移動特性を評価するチップの製作を行い、細孔内部に電解質水溶液を満たし、細孔の両端に直流電場を与えたとき、イオン流の検出に成功した。

### §3. 成果発表等

#### (3-1) 原著論文発表

##### 論文詳細情報(国内)

A-1. 丸岡成, 森昌司, 奥山邦人, ハニカム多孔質体上部に形成される合体大気泡が飽和プール沸騰限界熱流束に与える影響, 混相流の進展, *Japanese Journal of Multiphase Flow*, 混相流第 27 巻 5 号 p.631-638(2014)

##### 論文詳細情報(国際)

A-2. Bambang Joko Suroto, Masahiro Tashiro, Sana Hirabayashi, Sumitomo Hidaka, Masamichi Kohno, Yasuyuki Takata, “Effects of Hydrophobic-Spot Periphery and Subcooling on Nucleate Pool Boiling from a Mixed-Wettability Surface”, *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol. 8, No. 1, pp.294-308, 2013 (DOI: 10.1299/jtst.8.294)

A-3. Y. Takata, B.J.Suroto, M. Tashiro, S. Hidaka, M.Kohno, “Wettability Effects in Boiling Heat Transfer”, *Proceedings of the 8th International Conference on Multiphase Flow (ICMF2013)*, Jeju, 2013 May

A-4. B. J. Suroto, M. Tashiro, S. Hirabayashi, S. Hidaka, M. Kohno, K. Takahashi, Y. Takata, “A Photographic Study on the Effects of Hydrophobic-Spot Size and Subcooling on Local Film Boiling”, *The ASME 2013 11th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, ICNMM2013-73069*, June 16-19, 2013, Sapporo, Japan (DOI:10.1115/ICNMM2013-73069)

A-5. Jun Hirotsu, Juo Amano, Tatsuya Ikuta, Takashi Nishiyama, Koji Takahashi, “Carbon nanotube thermal probe for quantitative temperature sensing”, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 199, pp. 1-8, 2013 (DOI: 10.1016/j.sna.2013.04.038)

A-6. Takashi Nishiyama, Koji Takahashi, Yasuyuki Takata, “Nanobubbles on a Very

Flat Hydrophobic Surface Prepared by Self-Assembled Monolayers”, Proceedings of the ASME 2013 4th International Conference on Micro/Nanoscale Heat and Mass Transfer, MNHMT2013, December 11-14, 2013, Hong Kong, China, MNHMT2013-22077 (DOI: 10.1115/MNHMT2013-22077)

A-7. Yoshinori Nakamura, Andreas Carlson, Gustav Amberg, Junichiro Shiomi, “Dynamic wetting at the nanoscale”, *Physical Review E*, Vol. 88, 033010, 2013 (DOI: 10.1103/PhysRevE.88.033010)

A-8. Scott N. Schifres, Sivasankaran Harish, Shigeo Maruyama, Junichiro Shiomi, Jonathan A. Malen, “Tunable electrical and thermal transport in ice-templated multi-layer graphene nanocomposites through freezing rate control”, *ACS Nano*, Vol. 7, 11183–11189, 2013 (DOI: 10.1021/nn404935m)

B-1. Ibrahim I. El-Sharkawy, Kutub Uddin, Takahiko Miyazaki, Bidyut B. Saha, Shigeru Koyama, Jin Miyawaki, Seong-Ho Yoon, “Adsorption of ethanol onto parent and surface treated activated carbon powders”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 73, pp.445-455, 2014 (DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.02.046)

B-2. Kutub Uddin, Takahiko Miyazaki, Shigeru Koyama, Bidyut B. Saha, “Performance investigation of adsorption-compression hybrid refrigeration systems”, *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, Vol.21, No.4, 1350024 (12pages), 2013 (DOI: 10.1142/S2010132513500247)

B-3. Kutub Uddin, Takahiko Miyazaki, Shigeru Koyama, Bidyut B. Saha, Hyun Sig Kil, Jin Miyawaki and Seong Ho Yoon, “Adsorption kinetics of ethanol onto functional activated carbons with controlled oxygen content”, *The Proceedings of the International Symposium on Innovative Materials for Processes in Energy Systems 2013*, pp.356-361, 2013

B-4. Hyun Sig Kil, Koichiro Hata, Keiko Ideta, Jin Miyawaki, Isao Mochida and Seong Ho Yoon, “Influence of surface functionality on ethanol adsorption behavior in activated carbons analyzed by solid-state NMR”, *The Proceedings of the International Symposium on Innovative Materials for Processes in Energy Systems 2013*, pp.525-528, 2013

B-5. I.I. El-Sharkawy, H. AbdelMeguid and B.B. Saha, “Towards an optimal performance of adsorption chillers: Reallocation of adsorption/desorption cycle times”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 63, pp. 171–182, 2013 (DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.03.076)

B-6. S.T. Oh, B.B. Saha, K. Kariya, Y. Hamamoto and H. Mori, “Fuel cell waste heat powered adsorption cooling systems”, *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, Vol. 21, No. 2, 1350010-1 to 1350010-10, 2013 (DOI: 10.1142/S2010132513500107)

C-1. Sho Kataoka, Yasutaka Takeuchi, Akiko Kawai, Mitsuhiko Yamada, Yoshihiro

Kamimura, Akira Endo, “Controlled Formation of Silica Structures Using Siloxane/Block Copolymer Complexes Prepared in Various Solvent Mixtures”, *Langmuir*, vol. 29, no. 44, pp. 13562–13567, 2013 (DOI: 10.1021/la403168v)

C-2. mesoporous silica,” *Journal of Physical Chemistry C*, vol. 117, no. 42, pp. 21795-21802, 2013 (DOI: 10.1021/jp405623p)

C-3. Kyohei Yamashita and Hirofumi Daiguji, “Molecular simulations of water adsorbed on mesoporous silica thin films,” ASME Eleventh International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels, Sapporo (Japan) Paper No. ICNMM2013-73131, pp. V001T12A008, 2013 (DOI: 10.1115/ICNMM2013-73131)

C-4. Junho Hwang and Hirofumi Daiguji, “Ion and proton transport in mesoporous silica SBA-16 thin films with three dimensional cubic structures,” ASME Eleventh International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels, Sapporo (Japan) Paper No. ICNMM2013-73112, pp. V001T06A002, 2013 (DOI: 10.1115/ICNMM2013-73112)

### (3-2) 知財出願

① CREST 研究期間累積件数(国内 2 件)