

次世代ヒートポンプ技術に関する研究

研究代表者 齋藤 潔

(基幹理工学部 機械科学・航空学科 教授)

1. 研究課題

省エネルギー性が極めて高いヒートポンプのさらなる高効率化、利用拡大を実現することは、省エネルギー社会構築のために重要である。本研究では、このヒートポンプ内で生じる気液二相流現象の解明からシステム全体の制御までを統合的に捉えることで、従来とは異なるアプローチでのシステムの高性能化、高効率化の実現を目指す。

本年度は、ヒートポンプの主要要素である空気-冷媒熱交換器の最適設計に関する検討、リキッドデシカント空調システムの主要要素である気液接触器の溶液濡れ特性の可視化や理論分析などに取り組んだ。以下に、それぞれの成果について報告する。

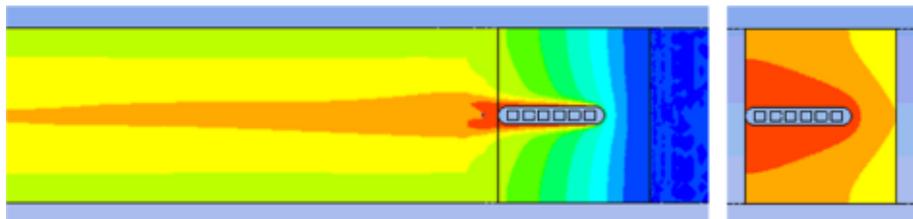
2. 主な研究成果

2.1 熱交換器の最適設計に関する検討

ヒートポンプには通常、蒸発器と凝縮器の2つの熱交換器があり、それぞれ重要な役割を果たしている。本研究では、家庭用エアコンの室外機を想定した空気-冷媒熱交換器を対象に、その形状の最適化について検討を行った。

現在広く一般的に使用されている従来の熱交換器の形状は、その多くを経験や試行錯誤などに頼って設計されているのが現状である。また近年、従来とは異なる細径管を用いたマイクロチャンネル熱交換器なども提案され、採用されつつある。本研究では、このマイクロチャンネル熱交換器を対象に、数値シミュレーションを用いて、従来のやり方にとらわれず、形状の最適化を目指した。

具体的には、まず空気側の摩擦損失および熱伝達を数値流体解析により明らかにした。結果として、フィンの高さ、フィン幅、フィンピッチ、フィン前縁部長さ、および風量の違いが、空気側摩擦係数、空気側熱伝達率に与える影響を明らかにした。Fig.1は、ある典型的な条件における、(右から左に流れる) 空気のフィン間中心部の温度分布 (図中(a))、およびフィン表面温度分布 (図中(b)) である。また、Fig.2は、上述のような様々な条件で行った解析結果を無次元数でまとめたものである。これらの成果は、これまで十分に明らかにならなかった空気側摩擦係数や熱伝達率などの定式化に貢献し、最適設計に向けて必要不可欠な知見となることが期待されるものである。



(a) フィン間中心の空気温度分布 (右から左へ流れる) (b) フィン表面温度分布

Fig.1 熱交換器フィン間を流れる空気の温度分布とフィン表面温度分布

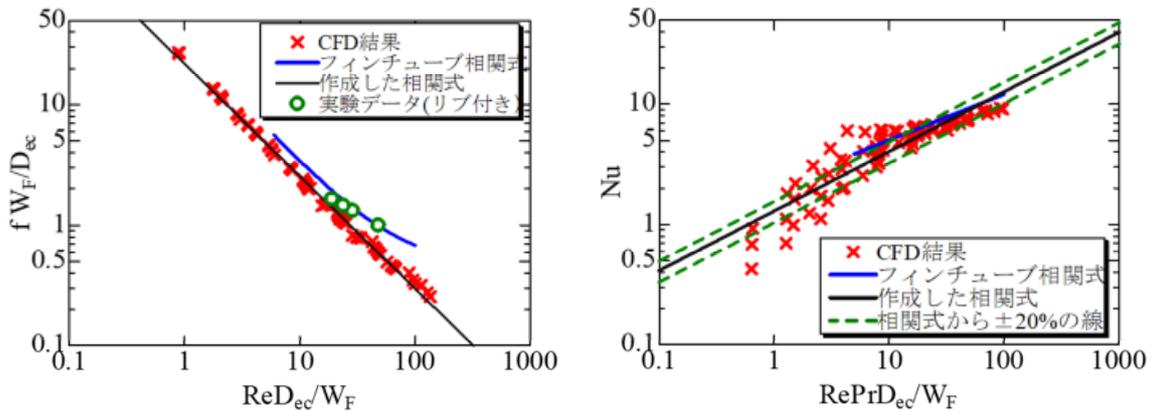
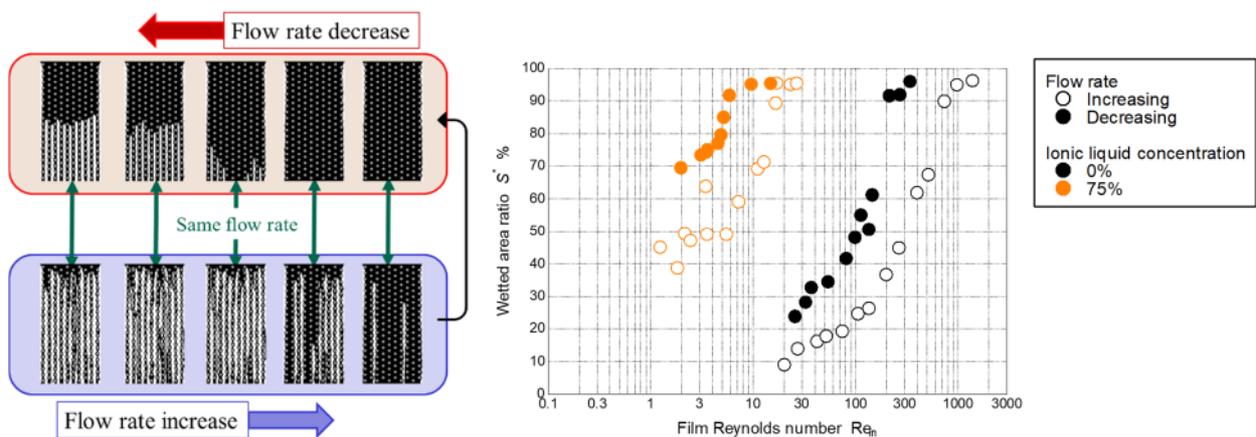


Fig. 2 数値流体解析による様々な条件における摩擦係数および熱伝達率の整理

2.2 溶液濡れ特性の可視化や理論分析

リキッドデシカント空調システムは、効率的な調湿空調を行うことが可能な、新しいヒートポンプシステムである。リキッドデシカント空調システムでは、空気と吸収溶液が気液接触器で直接接触することで除湿や加湿が行われる。したがって、気液接触器を前面にわたって濡らすことが、伝熱・伝物質面積の観点から非常に重要である。しかし、一方で、溶液の流量を削減することがポンプ消費電力などを抑えることにつながり、システム全体の高効率化にとって重要である。これら2つは互いに相対する性質であり、より少ない溶液流量でより広い濡れ面積を濡らすことが重要である。そこで本研究では、我々が新たに提案したフィンチューブ型気液接触器を対象に、そこに散布された溶液が形成する流下液膜の濡れ面積の可視化を試みた。

Fig. 3に、フィンチューブ型気液接触器における溶液濡れ状態の可視化例と、溶液流下液膜の膜レイノルズ数と濡れ面積割合の関係を示す。この結果より、溶液濡れ面積の可視化が成功し、また、濡れ面積に、溶液流量の増減に対するヒステリシス特性が存在することを定量的に示すことができた。この結果は、実際の要素・システム的设计において非常に重要な知見である。



(a) 濡れ状態の可視化例 (黒が濡れ) (b) 膜レイノルズ数と濡れ面積割合の関係

Fig. 3に、フィンチューブ型気液接触器における溶液濡れ状態の可視化例と溶液流下液膜の膜レイノルズ数と濡れ面積割合の関係

3. 共同研究者

山口 誠一（基幹理工学部 機械科学・航空学科 准教授（任期付））

ニコロ ジャンネッティ（基幹理工学部 講師（任期付））

井上 修行（理工学研究所 招聘研究員）

鄭 宗秀（理工学研究所 客員准教授）

粥川 洋平（理工学術院 客員准教授）

東條 健司（理工学研究所 招聘研究員）

4. 研究業績

4.1 学術論文（Journal papers）

- (1) N. Giannetti, R. Moriwaki, S. Yamaguchi, K. Saito, “Development and validation of an analytical formulation of the Nusselt and Sherwood numbers on a partially wetted absorber tube”, *Science and Technology for the Built Environment*, Vol. 24, pp. 850-860, April 2018;
- (2) K. Ohno, M.A. Redo, N. Giannetti, S. Yamaguchi, K. Saito, “Performance evaluation method of heat pump driven refrigerated display cabinets”, *Refrigeration Science and Technology*, Vol. 2018, pp. 294-301, April 2018;
- (3) R.J. Varela, S. Yamaguchi, N. Giannetti, K. Saito, M. Harada, H. Miyauchi, “General correlations for the heat and mass transfer coefficients in an air-solution contactor of a liquid desiccant system and an experimental case application”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 120, pp. 851-860, May 2018;]
- (4) A. Lubis, J. Jeong, N. Giannetti, S. Yamaguchi, K. Saito, H. Yabase, M.I. Alhamid, Nasruddin, “Operation performance enhancement of single-double-effect absorption chiller”, *Applied Energy*, Vol. 219, pp. 299-311, June 2018;
- (5) N. Giannetti, S. Yamaguchi, K. Saito, “Numerical simulation of Marangoni convection within absorptive aqueous Li-Br”, *International Journal of refrigeration*, Vol. 92, pp.176-184, August 2018;
- (6) N. Giannetti, R.J. Varela, H.M. Ariyadi, S. Yamaguchi, K. Saito, X.M. Wang, H. Nakayama, “Semi-theoretical prediction of the wetting characteristics of aqueous ionic liquid solution on an aluminum finned-tube desiccant contactor”, *ASME Journal of Fluid Engineering*, Vol. 140(12), pp.121109-121109-10, August 2018;
- (7) N. Giannetti, S. Yamaguchi, K. Saito, “Simplified expressions of the transfer coefficients on a partially wet absorber tube”, *International Journal of refrigeration*, Special Issue on Sorptive Heat Pump Cycles, Accepted on July 10th 2018, Ref. No. JIJR4037;
- (8) N. Giannetti, S. Yamaguchi, A. Rocchetti, K. Saito, “Thermodynamic analysis of irreversible desiccant systems”, *Entropy*, Vol. 20 (8), Article No. 595, August 2018;
- (9) Nasruddin, Sholahudin, M.I. Alhamid, K. Saito, “Hot water temperature prediction using a dynamic neural network for absorption chiller application in Indonesia”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 30, pp. 114-120, December 2018;

4.2 発表（国際）（International conferences）

- (1) H.M. Ariyadi, N. Giannetti, S. Yamaguchi, K. Saito, “Modelling of water vapor absorption by aqueous ionic liquid fluids in a vertical-tube falling film absorber”, Grand Renewable Energy 2018, Yokohama, Japan, June 17th-22nd 2018;
- (2) N. Giannetti, P. Trinuruk, S. Yamaguchi, K. Saito, “Film Rupture and Partial Wetting over Flat Surfaces”, 17th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, West Lafayette, U.S.A., July 9th-12th 2018;
- (3) P. Trinuruk, N. Giannetti, K. Takuya, S. Yamaguchi, K. Saito, “Influence of the Fluid Distribution Width on the Wettability of Rivulet Flow over Vertical Flat Surfaces”, 17th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, West Lafayette, U.S.A., July 9th-12th 2018
- (4) T. Sato, R.J. Varela, S. Yamaguchi, K. Saito, H. Nakayama, X. Wang, “Experimental Study on a Finned-tube Internally Cooled Contactor for Liquid Desiccant Air Conditioning Systems with Ionic Liquid”, 17th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, West Lafayette, U.S.A., July 9th-12th 2018;
- (5) Sholahudin, K. Ohno, S. Yamaguchi, K. Saito, “Dynamic modeling of air conditioning system using Bayesian regularization neural network”, JSME 第 28 回環境工学総合シンポジウム 2018, July 11th-12th 2018;
- (6) H.M. Ariyadi, S. Yamaguchi, K. Saito, “Assessment of thermal and transport properties of ionic liquids as suitable absorbent for absorption cooling applications”, ICDEMM (International Conference on Design, Energy, Materials, and Manufacture), Bali, Indonesia, October 24th -25th 2018;
- (7) Sholahudin, K. Ohno, S. Yamaguchi, K. Saito, “Multi-step ahead prediction of vapor compression air conditioning system behaviour using neural networks”, ICDEMM (International Conference on Design, Energy, Materials, and Manufacture), Bali, Indonesia, October 24th -25th 2018;

4.2 発表（国内）（Domestic conferences）

- (1) ジャンネッティ ニコロ, 山口 誠一, 齋藤 潔, 王 新明, 中山 浩, “フィンチューブ型気液接触器におけるイオン液体水溶液の濡れ性の理論的検討 “ (Theoretical prediction of the wetting characteristics of aqueous ionic liquid on a finned-tube desiccant contactor), 2018 年度日本冷凍空調学会 年次大会, 日本大学工学部, September 4th-7th 2018;
- (2) D.A. Varela, M.A. Redo, N. Giannetti, K. Ohno, S. Yamaguchi, K. Saito, “Annual performance evaluation of CO2 refrigerated display cabinets relative to geographical location “, 2018 年度日本冷凍空調学会 年次大会, 日本大学工学部, September 4th-7th 2018;

5. 研究活動の課題と展望

今後の展望として、今回得られたヒートポンプの設計に対する非常に重要な知見を、実際の要素・システムの最適設計問題に適用することで、ヒートポンプのさらなる高効率化につなげていく予定である。