

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，次世代ヒートポンプの冷媒の有力な候補である混合冷媒の熱物性の計測，ヒートポンプシステムの制御特性の検討，水平円管内を流れる気液二相流現象の解明に関する検討を行った．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 冷媒の物性計測と状態方程式の作成

ヒートポンプの作動媒体である冷媒の熱物性は，ヒートポンプの性能・特性を決定する本質的な要因の一つである．現在，次世代のヒートポンプに向けて，様々な冷媒が提案されているものの，それぞれ一長一短があり，また，異なる冷媒を使用した場合のヒートポンプシステムの性能の違いを公平な条件で企画する手法も確立されていないのが現状である．本研究では，これらの検討を行う上で基盤となる，冷媒の熱物性，特に PVTx 性質の測定を行い，それによって得られたデータをもとに状態方程式の作成することを目的とした．対象とした冷媒は，HC 系冷媒である R600a と HFC 系冷媒である R134a を混合したものである．

Fig. 1 に，組成比別の測定結果を示す．この結果は，温度と圧力の関係を，等密度線に沿って計測したものである．これにより，これまで理論的な混合側でしか示せなかった対象混合冷媒の PVTx 性質を計測によって明らかにすることができた．これらの基礎的なデータは，次世代ヒートポンプに関するさまざまな検討において基盤情報となるといえる．

2.2 ヒートポンプの非定常特性評の解明

これまで，ヒートポンプの性能評価は，主に定常状態で行われてきた．しかし，実際にヒートポンプが設置される状況においては，定常状態とみなせる場合は少なく，かなり多くの時間を非定常状態が占められているのが現状である．本研究では，このような現状に注目し，ヒートポンプの非定常状態の特性把握が，実負荷環境において性能を発揮する制御検討を行う上で必要不可欠であると考えた．そこで，数年をかけてヒートポンプの非定常特性評価を行うための試験装置の構築をしてきた．

具体的には，Fig. 2(1)に示すように，熱交換器から排出された室内への供給する空気の時湿度の変動をセンシングし，PC により任意の仮想的な室内負荷変動を演算し，負荷装置を制御して室内からの戻り空気を作り，再び熱交換器に戻す仕組みを構築した．これにより，PC 上に仮想的な部屋やその負荷変動を入力することで，あたかも任意の部屋がそこにあるかのように，ヒートポンプの非

定常特性を知ることができるというものである。

本年度は、ヒートポンプの圧縮機の回転数がステップ上に上昇した場合に、ヒートポンプと、一次遅れ系の温度特性を持つ部屋からなる系の時間応答を調べた。結果として、Fig. 2(3) (黒線：PCでの演算結果，赤線：負荷装置によって作られた空気状態)を見ると，室内戻り空気をよく再現できていることが分かる。その他の様々な条件での実験も行い，本装置の有効性を確認できたといえる。

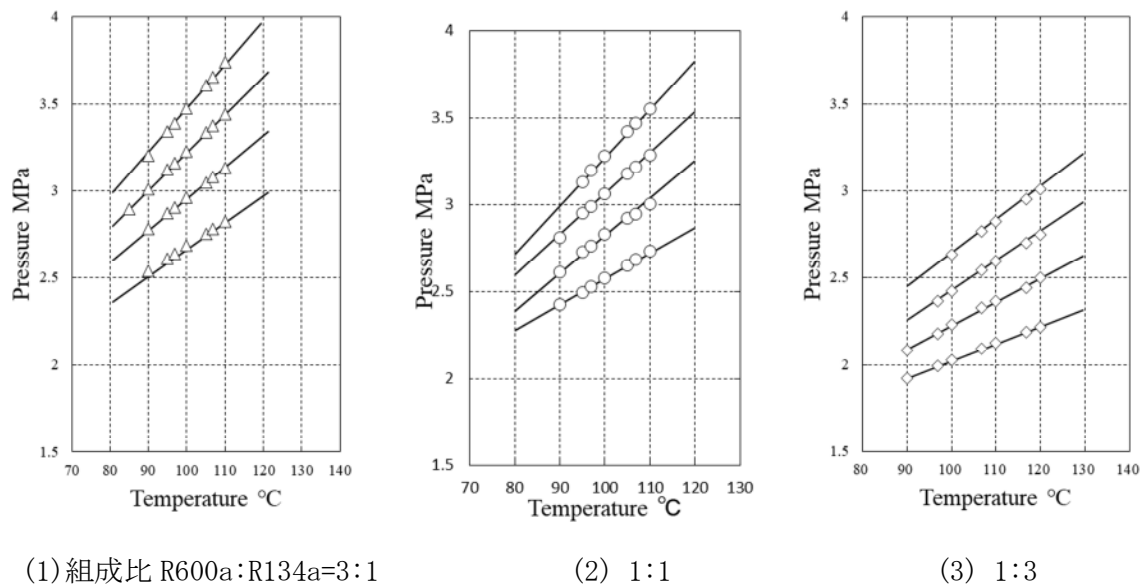


Fig. 1 R600a と R134a の混合冷媒の PVTx 性質測定結果

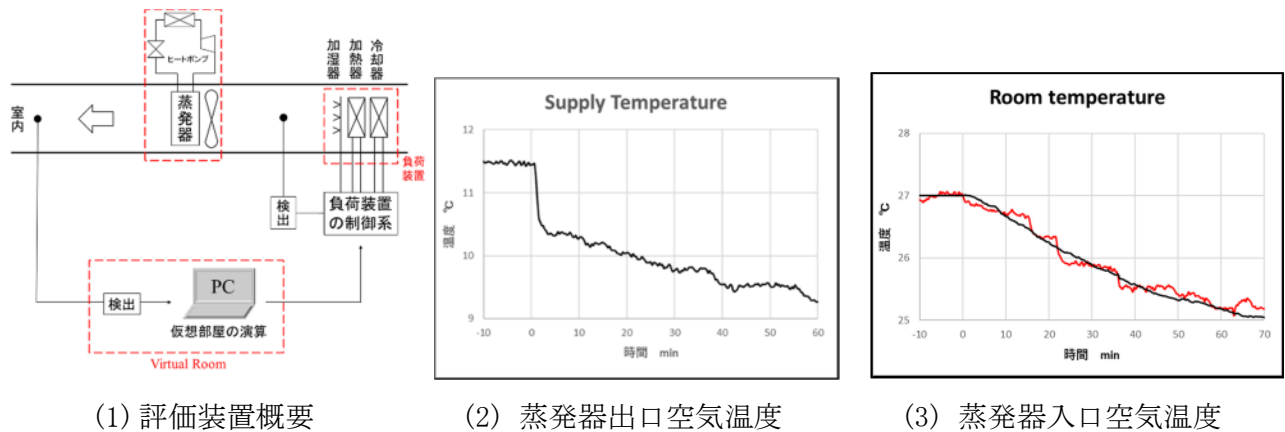


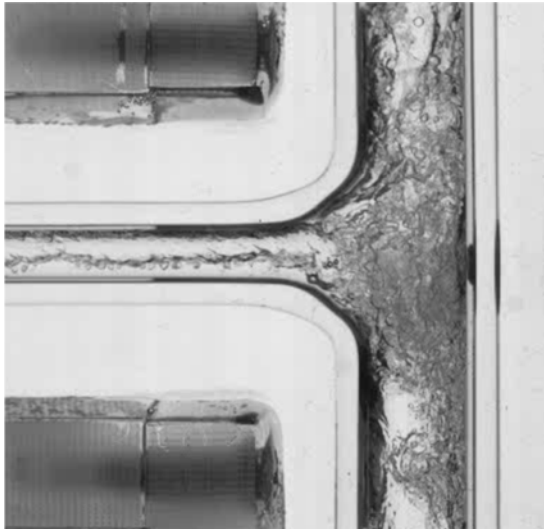
Fig. 2 試験装置概略と非定常特性評価試験の結果例

2.3 気液二相流の相分離現象の解明

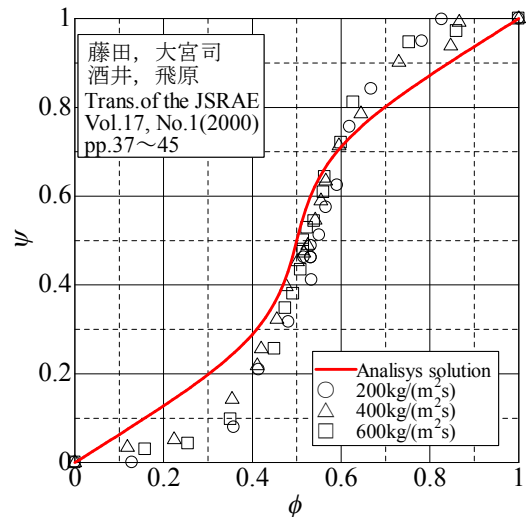
ヒートポンプの内部においては，気液二相流の相分離，分流，分配などがいたるところで見られる。また，これらの現象は，熱交換器の性能やシステム全体の性能，さらにはその制御特性に大きな影響を与えることが分かっている。本年度は，理論的検討として，一般的な分岐管路（2分岐）

を対象に、流体の管摩擦による散逸エネルギーが最小となるように分流，相分離が起こる，との仮定の下で，いくつかの仮定を設けることで，相分離特性を表す解析解を算出した。

昨年までに取得した分岐部の可視化画像と解析結果と実験データを Fig. 3 に示す．解析結果と実験結果の比較（2）を見ると，全体としてよく一致していることが分かる．一部若干乖離があるのは，本解析において，気液速度が同じである均質流の仮定を設けているからであり，実際には気液速度比が大きくなる点において差が表れたと推定される。



(1) 相分離現象の可視化画像



(2) 相分離特性解析解と実験関下との比較

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 機械科学・航空学科 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] Research Paper with peer review: N. Giannetti, A. Rocchetti, S. Yamaguchi, K. Saito, “Analytical solution of film mass-transfer on a partially wetted absorber tube”, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 118, pp. 176-186, August 2017

[2] Research Paper with peer review: A. Lubis, N. Giannetti, S. Yamaguchi, K. Saito, N. Inoue, “Experimental performance of a double-lift absorption heat transformer for manufacturing-process steam generation”, Energy Conversion and Management, Vol. 148, pp. 267-278, September 2017

[3] Research Paper with peer review: N. Giannetti, A. Milazzo, A. Rocchetti, K. Saito, “Cascade refrigeration system with inverse Brayton cycle on the cold side”, Applied Thermal Engineering, Vol. 127, pp. 986-995, December 2017

[4] Research Paper with peer review: N. Giannetti, S. Yamaguchi, K. Saito, “Annular flow stability within small-sized channels”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 116, pp. 1153-1162, January 2018

[5] Research Paper with peer review: J. Jeong, A. Lubis, K. Saito, S. Karng, S. Kim, K. Kim, “Start-up behaviour of a combined air-conditioning system in cooling and heating operating modes”, *Energy and Buildings*, Vol. 158, pp. 1346–1357, January 2018

4.2 発表（国際）（International conferences）

[1] International Meeting Plenary Lecture: K. Saito, “Latest R&D of Heat Pump Technologies”, ERDT / AEESEAP / ICSEE JOINT CONFERENCE 2017, Cebu, Philippines, October 18th-20th 2017

[2] International Meeting with peer review: R.J. Varela, K. Ohno, S. Yamaguchi, K. Saito, “ Numerical Simulation of a Transcritical CO₂ Heat Pump under Intermittent Operation for Energy Savings in Vending Machine”, ERDT / AEESEAP / ICSEE JOINT CONFERENCE 2017, Cebu, Philippines, October 18th-20th 2017

[3] International Meeting with peer review: N. Giannetti, A. Milazzo, A. Rocchetti, K. Saito, “Thermodynamic modelling of humid-air expansion within an R717/R729 cascade refrigeration system for cold store applications”, 5th IIR International Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigerants, Seoul, South Korea, April 23rd–26th 2017

[4] International Meeting with peer review: N. Giannetti, S. Yamaguchi, K. Saito, “Numerical simulation of Marangoni convection within absorptive aqueous Li-Br”, 2017 International Sorption Heat Pump Conference, Tokyo, Japan, August 7th–10th 2017

[5] International Meeting with peer review: N. Giannetti, S. Yamaguchi, K. Saito, “Simplified expressions of the transfer coefficients on a partially wet absorber tube”, 2017 International Sorption Heat Pump Conference, Tokyo, Japan, August 7th–10th 2017

[6] International Meeting with peer review: N. Giannetti, S. Yamaguchi, K. Saito, “Numerical simulation of Marangoni convection within horizontal tube falling film absorbers”, 28th International Symposium on Transport Phenomena, University of Peradeniya, Sri Lanka, September 22th-24th 2017

[7] International Meeting with peer review: A. Lubis, J. Jeong, K. Saito, H. Yabase, “Effect of solar energy on high operation performance of single-double-effect absorption chiller”, International Sorption Heat Pump Conference 2017, Tokyo, Japan, August 7th -10th 2017

[8] International Meeting with peer review: R.J. Varela, S. Yamaguchi, N. Giannetti, K. Saito, M. Harada, H. Miyauchi, “Correlations for the Heat and Mass Transfer Coefficients in a Structured Packed Bed Regenerator”, International Sorption Heat Pump Conference 2017, Tokyo, Japan, August 7th -10th 2017

[9] International Meeting with peer review: A. Lubis, J. Jeong, K. Saito, H. Yabase, M.I. Alhamid, Nasruddin, “Single-double-effect absorption chiller performance by adjusting the combination of the solution mass flow rates”, 5th IIR International Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigerants, Seoul, South Korea, April 23rd – 26th 2017

[10] International Meeting with peer review: M.A. Redo, N. Giannetti, J. Jeong, K. Enoki, I. Ota, K. Saito, H. Kim, “Experiment and Visualization of R410A Flow Distribution within the Vertical Header of Microchannel Heat Exchanger”, 5th IIR International Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigerants, Seoul, South Korea, April 23rd – 26th 2017

[11] International Meeting with peer review: M.A. Redo, M. Berana, K. Saito, “Ejector Refrigeration System Driven by Renewable Energy and Waste Heat”, 12th Int. Energy Agency Heat Pump Conference 2017, Rotterdam, Netherlands, May 15th -18th 2017

4.2 発表（国内）(Domestic conferences)

[1] National Meeting: 齋藤 潔, “基調講演：シミュレーションによるエネルギー利用システムの技術開発革新”, 第 51 回空気調和・冷凍連合講演会, 東京海洋大学 海洋工学部 85 周年記念会館, April 19th-21st 2017

[2] National Meeting: 奥村健太、大野慶祐、山口誠一、齋藤潔、宇田川陽介、二渡直樹、木幡悠士, “ガスインジェクション圧縮式ヒートポンプの制御特性に関する研究”, 第 51 回空気調和・冷凍連合講演会, 東京海洋大学 海洋工学部 85 周年記念会館, April 19th-21st 2017

[3] National Meeting: 八橋元、山口誠一、齋藤潔、蓮池宏、坂本隼人、松本悟、原田政利, “液式デシカントと水冷媒ヒートポンプの組み合わせによる高効率空調システムの開発(第 1 報)”, 第 51 回空気調和・冷凍連合講演会, 東京海洋大学 海洋工学部 85 周年記念会館, April 19th-21st 2017

[4] National Meeting: レド マーク, ジャンネッティ ニコロ, 鄭 宗秀, 榎木 光治, 太田 育秀, 齋藤 潔, 金 鉉永, “マイ クロチャンネル垂直ヘッダーにおける R410A の二相流分配特性”(Two-phase flow distribution of R410A within the vertical header of a microchannel heat exchanger), 第 27 回 環境工学総合シンポジウム, 静岡県浜松市, Japan, July 10th -12th 2017

[5] National Meeting: Arnas , J. Jeong , H. Yabase , K. Saito, “一重二重吸収式冷凍機の溶液流量と溶液分配比制御による高効率化”(Performance improvement of single-double-effect absorption chiller by solution mass flow rate and distribution ratio controls), 第 27 回 環境工学総合シンポジウム, 静岡県浜松市, Japan, July 10th -12th 2017

[6] National Meeting: ジャンネッティ ニコロ, 山口 誠一, 齋藤 潔, “流下液膜式吸収器の熱・物物質移動係 数に関する解析的検討”(Simple expressions of the heat and mass transfer coefficients for horizontal-tube falling film absorbers), 2017 年度日本冷凍空調学会 年次大会, 玉川大学, September 26th -29th 2017

[7] National Meeting: 乾 はなこ, ジャンネッティ ニコロ, 山口 誠一, 齋藤 潔, “フィンチューブ接触器に おける流下液膜の濡れ性の解明”(Wetting Characteristics of falling films on a fin-tube contactor), 2017 年度日本冷凍空調学会 年次大会, 玉川大学, September 26th -29th 2017

[8] National Meeting: M.A. Redo, N. Giannetti, K. Ohno, S. Yamaguchi, K. Saito, “Annual Performance Evaluation of Refrigerated Display Cabinets”, 2017 年度日本冷凍空調学会 年次大会, 玉川大学, September 26th -29th 2017

[9] National Meeting: 岩崎 伸亮, 大野 慶祐, 山口 誠一, 齋藤 潔, 中山 浩, “着霜を伴うヒートポンプシステムの 部分負荷特性に関する研究”, 2017 年度日本冷凍空調学会 年次大会, 玉川大学, September 26th -29th 2017

[10] National Meeting: 野村 貴大, 太田 育秀, 山口 誠一, 齋藤 潔, “開放型冷凍冷蔵ショーケース におけるエアカーテンの 熱侵入特性の把握”, 2017 年度日本冷凍空調学会 年次大会, 玉川大学, September 26th -29th 2017

[11] National Meeting: M.A. Redo, N. Giannetti, J. Jeong, K. Enoki, I. Ota , S. Yamaguchi, K. Saito, H. Kim, “マイクロチャンネル熱交換器の垂直ヘッダーに おける広範囲流量分配特性”(Two-phase Flow Distribution at Wider Flow Range within the Vertical Header of Microchannel Heat Exchanger), 2017 年度

5. 研究活動の課題と展望

今後の展望としては、これまでに得られている、気液二相流現象、デバイスの特性、システムの非定常特性などの知見を融合し、これまでの評価基準ではなく、より実負荷環境に即したシステムの評価・設計・制御を行っていく予定である。特に、システム制御においては、これまで経験的・試行錯誤的に決定されていた部分の一般理論化を試みる。また同時に、現代制御、さらには AI のシステム制御への適用も行っていく。