

次世代ヒートポンプ技術に関する研究Ⅱ

研究代表者 齋藤 潔
(基幹理工学部 機械科学・航空宇宙学科 教授)

1. 研究課題

本研究プロジェクトでは次世代冷媒に対して、実機レベルでの冷凍サイクルの性能評価を可能とすることを目的に、シミュレーション技術を実機設計レベルへと高度化する。さらにこのシミュレーション技術に AI を導入し、次世代冷媒ごとに冷凍サイクルの最適化を可能とし、具体的に開発された次世代冷媒の性能を比較検討する。これにより、冷媒ごとに公平に機器性能を予測、検証可能な体制を確立し、次世代冷媒の開発や次世代冷媒を導入した機器の早期普及を支援可能な性能評価技術の確立を目指す。

2. 主な研究成果

2.1 冷凍サイクル実機シミュレーション技術研究開発

2.1.1 各種低 GWP 冷媒の熱交換性能を解析できる熱交換器シミュレーターの開発

シミュレーション技術を高度化し、実機レベルで使用可能な技術に発展させるため、熱伝達率・圧力損失の式に波形角度 β と面積拡大率 ϕ が含まれている汎用的なプレート式熱交換器モデルを構築した。プレート式熱交換器の概略図を Fig. 1 に示す。

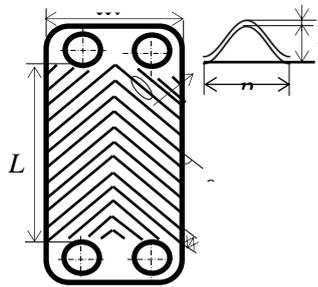


Fig. 1 Schematic structure diagram of plate heat exchanger

A	: Area of heat transfer
D_{eq}	: Equivalent diameter ($= 2 \cdot D_{eq}$)
h	: Corrugation height
L	: Length of corrugated section
n	: Number of plates
p	: Corrugation pitch
t	: Thickness of plate
W	: Width of corrugated section
β	: Corrugation angle
δ	: Plate spacing
ϕ	: Area enlargement factor

2.1.2 実験による妥当性検証

長さ 118.5mm, 幅 62mm, 波形角度 60°, 枚数 10 枚のプレート式熱交換器を用い、一次側に約 30°C, 二次側に 39°Cの水を対向流で流す実験を行って妥当性を検証した。

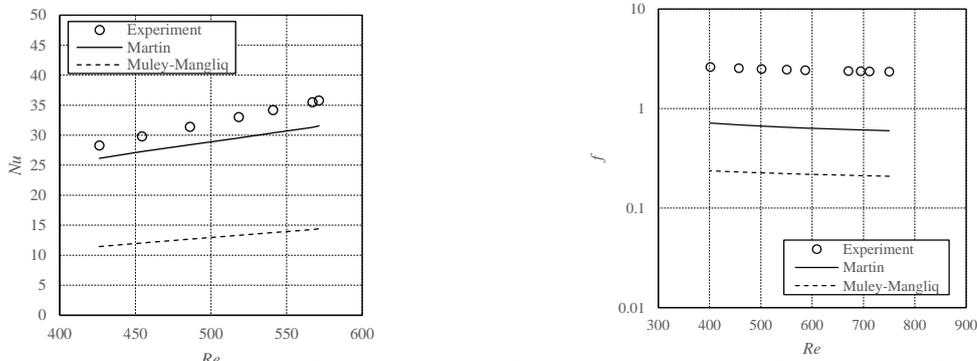


Fig. 2 Comparison of experimental results with Martin's and Muley-Manglik's formulas

2.2 AI を活用した冷凍サイクルシミュレーターの最適化技術研究開発

開発した熱交換器シミュレーターを使って、R32 と R454C の熱交換器それぞれの最適化検討を行った。R32 と R454C の結果を Fig. 3 に示す。熱交換器の実現可能性を確保しながら、各冷媒の回路の最適化によって性能向上を達成できる可能性があることが確認できた。

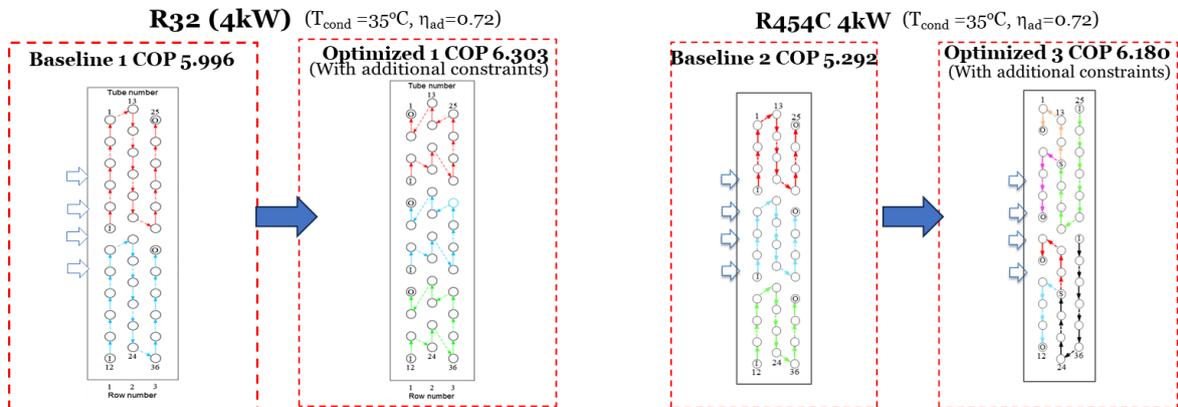


Fig. 3 Simulated heat transfer distribution and performance comparison between baseline and optimized circuitries

2.3 冷凍サイクルシステム評価技術研究開発

最適化検証装置で凝縮器に Base 1 を用い、蒸発器に Base 1, Optimized 1, Optimized2 を用いて R32 冷媒と R454C 冷媒それぞれによる妥当性検証の実験を行った。シミュレーターによる計算結果を実験結果と比較した結果、Fig. 4 と Fig. 5 に示すように両者はよく一致していることから、最適化手順の信頼性が証明された。

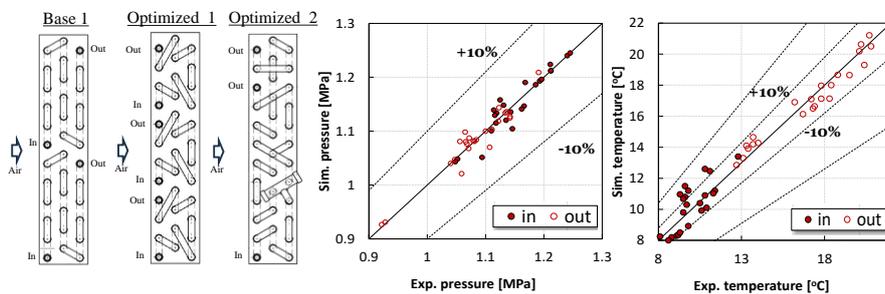


Fig. 4 Validation results for R32

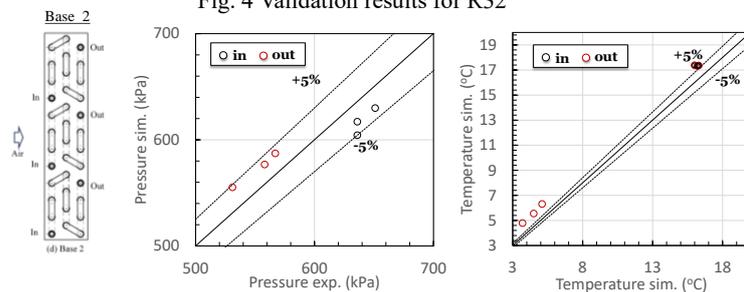


Fig. 5 Validation results for R454C

2.4 空調機器の動的性能評価方法に関する研究開発

「エミュレーター式負荷試験装置」を用いて空調機の動的性能評価を高精度で実施することを目的に、2023 年度に開発した「フィードフォワード補償 (FFC)」を追加したソフトウェアを用いて、2024 年度は本学と A 社の試験装置においてラウンドロビンテストを行った。Fig. 6 に FFC に

よる試験室内の温調遅れの改善効果を示す。また、Table1 にラウンドロビテストの結果を示す。FFC を使用しなかった場合、両者の差異は6~9%であるが、FFC を使用することで2%以下になる。これにより、空調機の動的性能評価が従来よりも高精度で実施できることが示された。

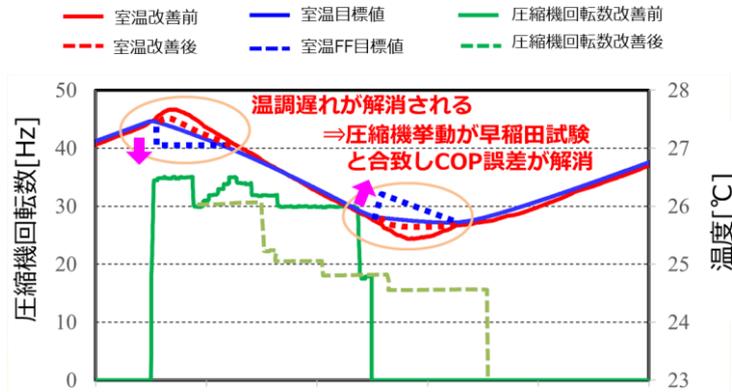


Fig. 6 Validation results for R454C

Table 1 Test results without FFC and with FFC

Operation	Outdoor temp. (°C)	PLR (%)	COP (-) without FFC			COP (-) with FFC		
			Waseda	Company A	Max deviation (%)	Waseda	Company A	Max deviation (%)
Cooling	29	25.0	5.408	4.920	9.02	5.882	5.800	1.41
		50.0	5.994	5.615	6.32	6.173	6.183	0.16
Heating	7	25.0	3.683	3.726	1.17	3.469	3.510	1.16
		50.0	4.212	4.295	1.97	4.349	4.417	1.53

2.5 リキッドデシカント空調システムにおける気液接触器の最適設計に関する研究開発

数理モデルを基にした中間冷却/加熱型 (Fig. 7) および断熱型気液接触器 (Fig. 8) のシミュレーターを作成し、濡れ性の変化が気液接触器の性能に与える影響について、中間冷却/加熱型と断熱型気液接触器の比較を行った。シミュレーターによる解析結果の例を Fig. 9 に示す。

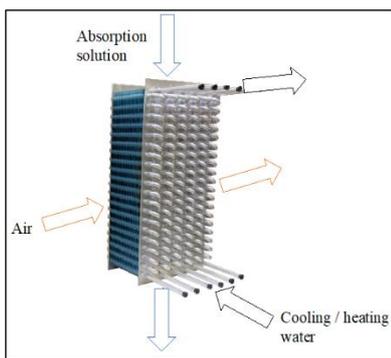


Fig. 7 Fin-tube contactor

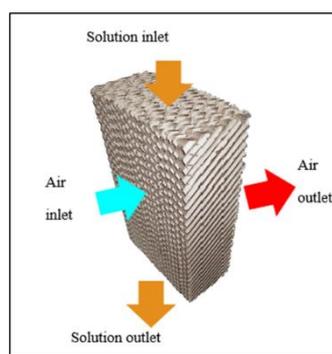


Fig. 8 Packed-bed contactor

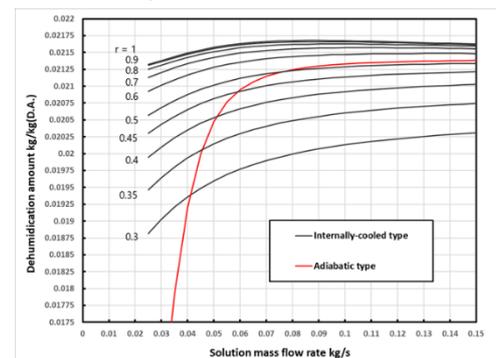


Fig. 9 Dehumidification Performance Analysis

3. 共同研究者

キムチョルフアン (理工学術院 次席研究員) 金 武重 (理工学術院 次席研究員)

4. 研究業績

4.1 学術論文

- [15] M. Kim, K. Maeda, T. Sato, K. Saito, Void fraction of R32 in microfin tube under evaporation conditions using capacitance-based sensor *Applied Thermal Engineering*, Vol. 265, no. 125569, 2025. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.125569
- [14] B. Cao, K. Masuno, K. Maeda, M. Kim, X. Wang, Y. Yin, K. Saito, An aluminum finned-tube type internally-cooled deep dehumidifier using ionic liquid desiccant for low-humidity industries: Modelling and case study, *Energy Conversion and Management*, Vol. 327, no. 119598, 2025. DOI: 10.1016/j.enconman.2025.119598
- [13] N. Giannetti, Sholahudin, A. Mizuno, Y. Miyaoka, Y. Sei, K. Enoki, K. Saito, 空調機用エミュレーター式負荷試験法の計測精度向上策 - 装置の遅れ時間を改善するフィードフォワード制御の開発 - (Development of Feedforward Control to Improve Reproducibility of Emulator-type Testing Facilities), *Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers*, Accepted, (in press).
- [12] C.H. Kim, M. Kim, Sholahudin, N. Giannetti, K. Saito, Systematic development of multilayer-perceptron-based void fraction model, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 162, no. 108563, 2025. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108563
- [11] B. Cao, Yin Y., N. Giannetti, K. Saito, 基于离子液体的深度除湿技术及应用探索 (Ionic Liquid Desiccant Deep Dehumidification Technology and Its Application Exploration), *Kung Cheng Je Wu Li Hsueh Pao/Journal of Engineering Thermophysics*, Vol. 45(10), pp. 2958–2964, 2024.
- [10] B. Cao, Y. Yin, M. Kim, K. Saito, C.N. Markides, X. Wang, Characteristics of heat and mass transfer in moist air-ionic liquid desiccant bubbly systems: Parametric assessment of regeneration performance, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 257, 124487, 2024. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.124487
- [9] A. Hosoi, A. Hernandez Neto, A. Afshari, A. Wachau, B. Wang, B. Harley, C. Vering, D. Müller, J. Hogeling, J. Sager, K. Saito, K. Kurotori, L. Socal, L. Aye, N. Enteria, N. Giannetti, S. Kametani, S. Göbel, T. Sawachi, T. Kan, Evaluation and Demonstration of Actual Energy Efficiency of Heat Pump Systems in Buildings (Annex 88) - State of the Art (Subtask A Report), *Building Research Institute - National Research and Development Agency, Japan*, 2024. ISSN: 0453-4972
- [8] N. Giannetti, Sholahudin, A. Mizuno, Y. Miyaoka, Y. Sei, K. Enoki, K. Saito, Feed-forward compensation for emulator-type testing facilities, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 167, pp. 257-268, 2024. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2024.07.023
- [7] N. Giannetti, A. Milazzo, J.C. Garcia, CH. Kim, Y. Sei, K. Enoki, K. Saito, Thermodynamic optimization of heat exchanger circuitry via genetic programming, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 2521, no. 123623, 2024. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123623
- [6] T. Kinjo, Y. Sei, N. Giannetti, K. Saito, K. Enoki, Prediction of Boiling Heat Transfer Coefficient for Micro-Fin Using Mini-Channel, *Applied Sciences*, Vol. 14(15), no. 6777, 2024. DOI: 10.3390/app14156777
- [5] B. Cao, Y. Yin, K. Saito, A Bubble Column Dehumidifier using Ionic Liquid Desiccant for Low-Humidity Industries: Insights into Transfer Processes Integrating Experiment and CFD Modelling, *Journal of Thermal Science*, Vol. 33(6), pp. 2348–2371, 2024. DOI: 10.1007/s11630-024-2041-x
- [4] C.H. Kim, N. Giannetti, N.H. Kim, K. Saito, Experimental and theoretical characterization of two-phase flow distribution in unbalanced networks, *Journal of Enhanced Heat Transfer*,

Vol. 31(5), pp. 1-15, 2024. DOI: 10.1615/JENHHEATTRANSF.2024051524

- [3] M. Kim, T. Sato, K. Saito, Measurement of void fraction of zeotropic refrigerant R454C using capacitance-based sensor in horizontal flow configuration, Applied Thermal Engineering, Vol. 252, no. 123625, 2024. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123625
- [2] D. Dondini, N. Giannetti, A. Mizuno, Y. Miyaoka, K. Saito, Reproducibility assessment of an emulator-type load-based testing methodology, International Journal of Refrigeration, Vol. 159, pp. 39-49, 2024. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2023.12.032
- [1] M. Kim, Y. Uemura, T. Sato, K. Saito, Experimental investigation of the void fractions of refrigerants R32 and R1234yf in a 1 mm diameter horizontal channel using a capacitance-based method, Applied Thermal Engineering, Vol. 238, no. 122113, 2024. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.122113

4.2 総説・著書

齋藤潔, 図解でわかる次世代ヒートポンプ技術 ～カーボンニュートラルを実現する冷温熱利用技術～

4.3 招待講演

- [1] Plenary lecture, Kiyoshi Saito, Digital transformation of heat pump technology, The 11th Asian Conference on Refrigeration and Air-conditioning, Korea, 2024. 4
- [2] 基調講演, 齋藤潔, 次世代ヒートポンプ技術, 日本冷凍空調学会年次大会, 福岡 2024年9月
- [3] Plenary lecture, Kiyoshi Saito, NEW REFRIGENERATION & AIR-CONDITIONING TECHNOLOGY CHANGES THE WORLD, 24th ASEAN Energy Business Forum (AEBF-24), Lao P. D. R. , 2024. 9
- [4] Plenary lecture, Kiyoshi Saito, HEAT PUMP VISION 2030s, 12th International Conference on Energy Efficiency in Domestic Appliances and Lighting (EFDAL'24), Kyusyu, 2024. 10
- [5] Plenary lecture, Kiyoshi Saito, Carbon emission and how to mitigate them, The 1st A4 International Seminar on Thermal Energy Conversion, Korea, 2024. 11

4.4 受賞・表彰

4.5 学会および社会的活動

- ・経産省 産業構造審議会 保安・消費生活用製品安全分科会 化学物質政策小委員会 フロン類対策ワーキンググループ委員長
- ・資源エネルギー庁 総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会 省エネルギー小委員会 ガス・石油機器判断基準ワーキンググループ 委員長
- ・経産省 産業構造審議会保安・消費生活用製品安全分科会 化学物質政策小委員会 委員
- ・環境省 中環審カーボンニュートラル行動計画フォローアップ専門委員会 委員
- ・新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 技術委員
- ・日本学術振興会 特別研究員等審査会審査委員及び国際事業委員会書面審査員・書面評価員
- ・日本冷凍空調学会 会長
- ・ヒートポンプ蓄熱センター デマンドサイドマネジメント表彰審査委員会 委員長
- ・ヒートポンプ蓄熱センター IEA ヒートポンプ委員会 委員
- ・日本空調冷凍研究所 理事長

- ・ IEA EBC Annex88 日本委員会 副委員長
- ・ 日本環境協会エコマーク「温水器」基準策定委員会委員長
- ・ JISB8627(ガスヒートポンプ冷暖房機) 原案作成委員会 委員長

5. 研究活動の課題と展望

2025年度は、「低 GWP 混合冷媒のシステム評価手法開発」として、シミュレーション技術を実機設計レベルへとさらに高度化するために、2024年度に開発した熱交換器の最適化計算が可能となるシミュレーターを使ってデバイスの形状を変更してさらなる解析を進める。また、最適化検証装置を使って R32 と R454C それぞれを用いて、2024年度とは異なる形状のデバイスを用いて実験を実施し、妥当性検証を進める。さらに、リキッドデシカント空調システムにおける気液接触器の最適設計に関して実験とシミュレーションを進める。これらにより、次世代冷媒の開発や次世代冷媒を導入した機器の早期上市と新たなリキッドデシカント空調システム開発を支援可能な性能評価技術の確立を目指すこととしたい。