

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、冷凍機油の溶解度曲線を基に、圧力・温度から溶解度を計算できるようにした。冷凍機油の溶解度曲線を Fig. 1 に示す。また、新しく作成した Void 率の計算式を以下に、R22 での計算例を Fig.2 にそれぞれ示す。

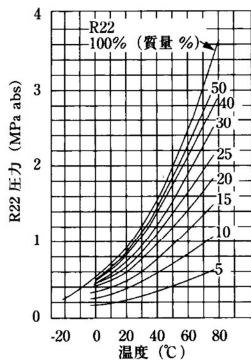


Fig. 1 Solubility curve and formulation of refrigerant in refrigerant oil

$$\alpha = \frac{U_{sg}}{C_0 \cdot U_M + U_{gm}}, \quad C_0 = 1 + 0.12 \cdot (1-x)$$

$$U_M = G \cdot \left(\frac{x}{\rho_{sg}} + \frac{1-x}{\rho_{sl}} \right), \quad U_{sg} = G \cdot \left(\frac{x}{\rho_{sg}} \right)$$

$$U_{gm} = K \cdot \frac{1.18 \cdot (1-x)}{\rho_{sl}^{0.5}} \left[g \cdot \sigma \cdot (\rho_{sl} - \rho_{sg}) \right]^{0.25}$$

$$K = 0.0178 \cdot \left\{ \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0.9} \cdot \left(\frac{\rho_{sg}}{\rho_{sl}} \right)^{0.5} \right\}^{-0.736} \cdot Re^{0.493}$$

(in grooved tube) ($K=1$ in bare tube)

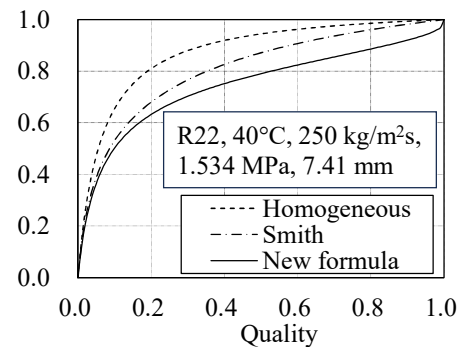


Fig. 2 Relationship between quality and void fraction

2.1.2 シミュレーションによる妥当性検証

R22 冷媒の冷房定格能力 2.2kW のルームエアコンでのシミュレーターの計算例を Table1 に示す。冷凍サイクル model による計算結果が Case 1, Fig. 1 の溶解度曲線と新 Void 率計算式を使用した計算結果が Case 2 であり、両者の冷凍サイクル全体の冷媒量がほぼ一致する結果を得た。

Table 5.2-1 Calculation results of refrigerant charge

| | | Case 1 | Case 2 | |
|------------------------------------|--------------------|--------|--------|--------|
| Refrigerant charge | | (kg) | 0.6511 | 0.6517 |
| | Condenser | (kg) | 0.5063 | 0.4322 |
| | Evaporator | (kg) | 0.0833 | 0.0609 |
| Distribution of refrigerant amount | Compressor | (kg) | 0.0 | 0.0970 |
| | Discharge gas pipe | (kg) | 0.0014 | 0.0014 |
| | Two phase pipe | (kg) | 0.0458 | 0.0459 |
| | Suction gas pipe | (kg) | 0.0143 | 0.0143 |

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の最適化結果をシステムレベルで評価した結果、運転条件に依存せず性能向上が確認された。Fig. 3に示されるように、非共沸混合冷媒において顕著な改善が見られ、R454Cの性能はR32に近い水準まで向上することが確認された。

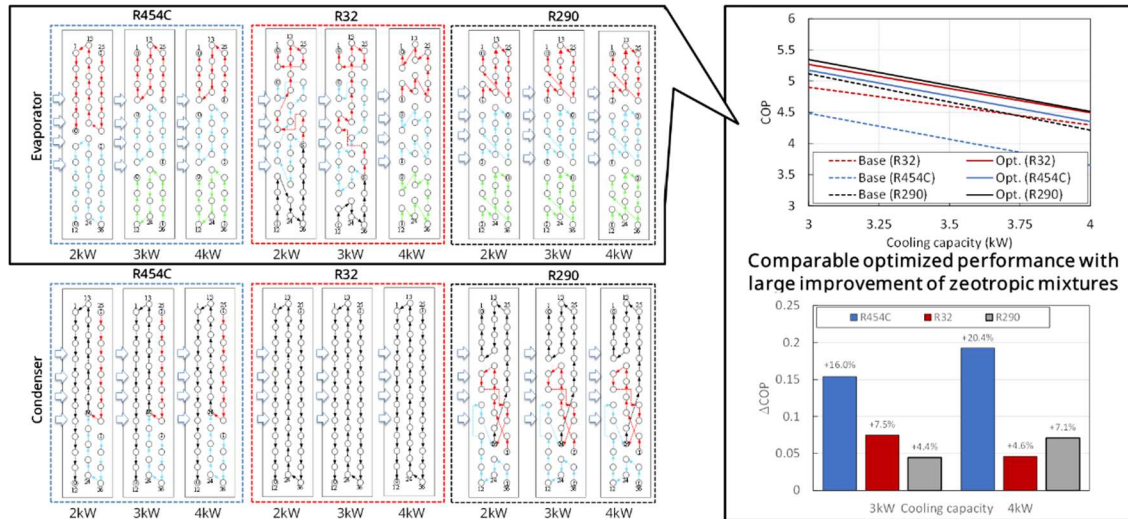


Fig. 3 Evaporator and condenser circuitry optimization results for different refrigerants

2.3 冷凍サイクルシステム評価技術研究開発

最適化結果の妥当性を確認するため、R32を対象として最適化された蒸発器回路の性能を複数の運転条件で評価した。その結果、Fig. 4に示されるように各回路はそれぞれの設計条件において最も高い性能を示すことが確認された。また、3kW条件で最適化した回路は部分負荷運転において高い性能を示し蒸発温度が高くなる一方で、冷媒側圧力損失が増加する傾向が見られた。一方、4kW条件で最適化した回路は定格運転時に最も高い性能を示し、圧力損失低減および回路配置による温度分布改善が主要な性能向上要因であることが確認された。

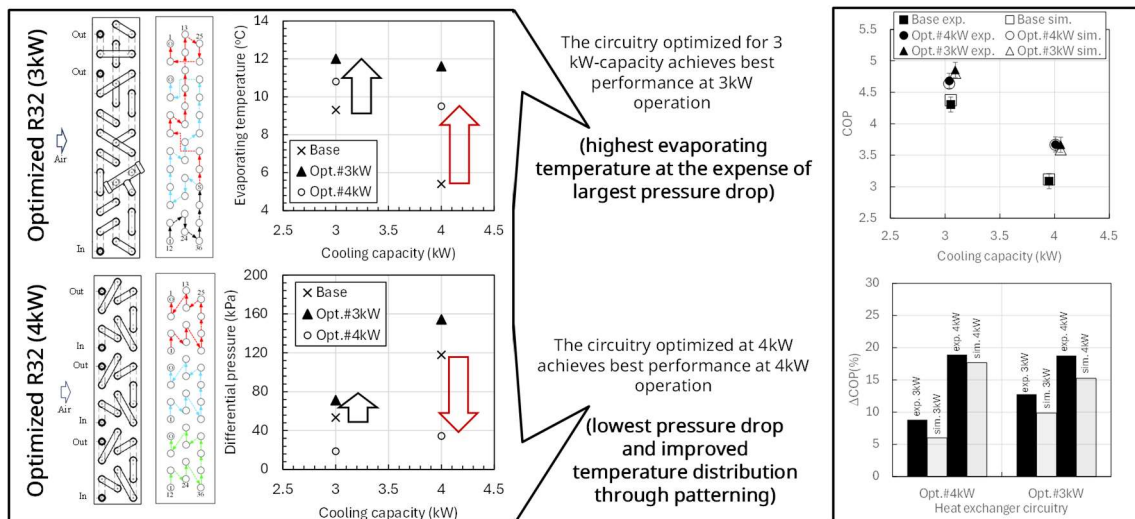


Fig. 4 Optimized evaporator features validation for R32 refrigerant

さらに、蒸発器だけでなく凝縮器およびR454C混合冷媒にも拡張して検証を実施し、これらに対しても有効であることを確認した。以上、本研究で構築したシミュレーションと最適化手法は、高効率空調機に向けた熱交換器回路設計の高度化に資する有効な技術基盤であることが確認された。

2.4 空調機器の動的性能評価方法に関する研究開発

2.4.1 ルームエアコンの動的性能評価

2020年度に開発した「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空調機の試験を行っている。2025年度は、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 Fig. 5 に示す冷房定格能力 4kW のルームエアコンを対象に、詳細な動的性能評価試験を行った。試験結果の COP を Table 6 に記述する。



Fig. 5 Appearance of the 4kW room air conditioner

Table 6 COP of dynamic cooling and heating tests with FFC

| PLR | Outdoor Temperature (°C) | | | | PLR | Outdoor Temperature (°C) | | | |
|-----|--------------------------|------|------|------|-----|--------------------------|------|------|------|
| | 26 | 29 | 32 | 35 | | 4.5 | 12 | 17 | |
| 10 | 5.40 | 4.11 | - | - | 10 | - | - | 4.44 | 4.76 |
| 25 | 5.48 | 4.92 | 4.51 | 5.29 | 25 | 4.16 | 5.03 | 5.59 | 6.28 |
| 50 | 4.30 | 3.75 | 3.55 | 3.05 | 50 | 3.72 | 3.75 | 4.48 | - |
| 75 | - | 4.05 | 3.51 | 3.18 | 75 | 3.17 | 3.15 | - | - |

2.4.2 熱交換器最適化による LCCP 評価

ヒートポンプシステムの地球温暖化への影響を把握するため、冷媒漏洩やエネルギー消費における影響を含めて統合的な評価手段である LCCP 評価を、開発した熱交換器シミュレーターによる最適化と COP 計算および実機の性能評価結果に基づき実施した。冷房定格能力 4kW のルームエアコンを対象にした LCCO の計算結果を Fig. 6 に示す。熱交換器を最適化することで、R454C の LCCP は R32 とほぼ同等にできることが明らかになった。

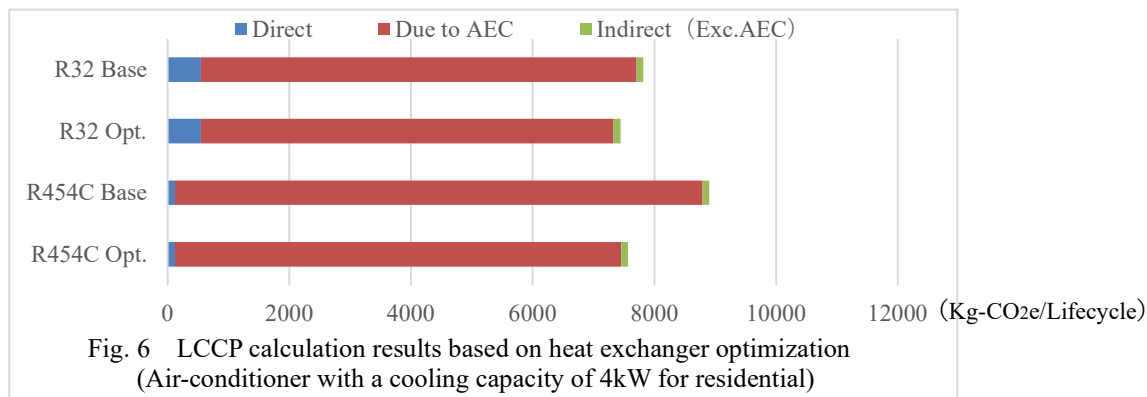


Fig. 6 LCCP calculation results based on heat exchanger optimization (Air-conditioner with a cooling capacity of 4kW for residential)

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

チューブ型散布器の適用および接触器表面処理が除湿性能に及ぼす影響について、実験および数値解析に基づき評価した。チューブ型散布器の概要を Fig. 7 に示す。除湿効率は、全体として空気面速度が低く、溶液流束が大きいほど向上する傾向を示したが、低風速条件では溶液流束に対して単調には増加せず、最適値が存在することを確認した。また、表面処理による濡れ性向上の効果と比較して、垂直チューブ型散布器の適用が除湿性能の向上により大きく寄与することを確認した (Fig. 8)。さらに、部分濡れモデルと熱・物質移動モデルを組み合わせた数値解析により除湿挙動を再現し (Fig. 9)、接触器形状の最適化およびシステム統合シミュレーションに適用可能な解析基盤を構築した。

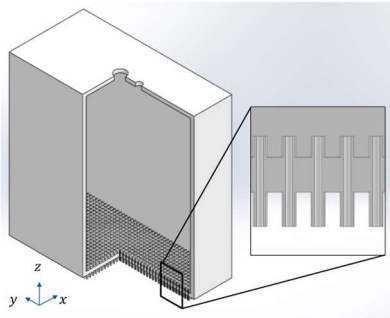


Fig. 7 Tube-extrude distributor

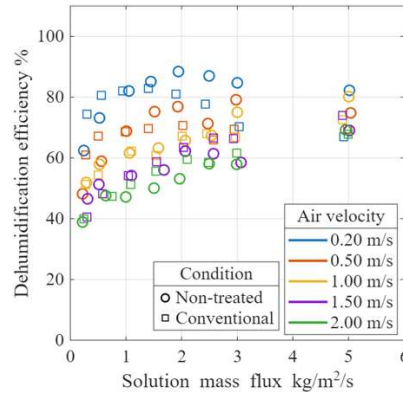


Fig. 8 Differences in dehumidification efficiency by distributor

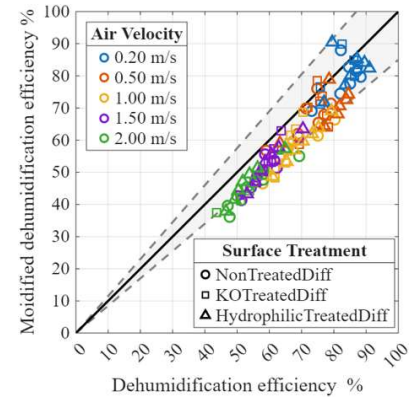


Fig. 9 Comparison of experimental and simulated dehumidification efficiency

3. 共同研究者

ニコロ ジャンネッティ (持続的環境エネルギー社会共創研究機構 環境エネルギーシステム総合研究所 研究院准教授) キムチョルフアン (持続的環境エネルギー社会共創研究機構 環境エネルギーシステム総合研究所 研究院講師) 金 武重 (近畿大学 工学部 機械工学科 講師)

4. 研究業績

4.1 学術論文

- [1] Moojoong Kim, Kento Maeda, Kiyoshi Saito, Void fraction of R32 in microfin tube under condensation conditions using capacitance-based sensor, *Applied Thermal Engineering*, Volume 281, Part 2, 2025, 128693.
- [2] Supakit Kumkam, Piyatida Trinuruk, Pipat Chaiwiwatworakul, Kiyoshi Saito, A comparative analysis of reinforcement learning and model predictive control for HVAC system optimization, *Journal of Building Engineering*, Volume 112, 2025, no. 113776.
- [3] Jeong, Jongsoo, Bhowmik, Mrinal, Saito, Kiyoshi, Kwon, Ohkyung, Chang, Jinyoung. Metal-organic framework-based desiccant-coated heat and mass exchanger to engineer effective bus air conditioning systems utilising latent and sensible heat recovery. *Applied thermal engineering*. 2025, 卷 278.
- [4] Watanabe, H., Onodera, T., Kadokura, Y., Saito, K. and Nagashima, K. (2025), Reduced dietary intake induces body fluid hypotonicity via alterations in water and energy metabolism. *J Physiol*, 603: 7345-7364.
- [5] Z. Xu, M. Anthony Redo, L. Wang, Y. Llave, H. Agui, N. Giannetti, K. Saito, M. Watanabe, Frost formation mechanisms in packaged frozen fruits considering porous structure under temperature fluctuations: Experimental and CFD analysis, *Journal of Food Engineering*, vol. 414, no. 113040, 2026.
- [6] C.H. Kim, N. Giannetti, Y. Sei, K. Enoki, K. Saito, Simplification of Evolutionarily Optimized Evaporator Circuitry via Key Topological Features, *Science and Technology for the Built Environment*, 2026 (Accepted).
- [7] Y. Miyaoka, N. Giannetti, C. Tanaka, D. Dondini, K. Saito, Round-robin tests of commercial air-conditioning units using emulator-type load-based testing methodology – Part 2: feedforward control, *Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers*, in press, 2026. (in Japanese)
- [8] N.I. Ibrahim, C. Vering, N. Giannetti, M. Kim, Sholahudin, T. Storek, D. Müller, K. Saito, State of the art of the digital twin concept in HVAC+R systems for building thermal management, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 229, art. no. 116601, 2026.
- [9] N. Giannetti, C.H. Kim, F. Della Santa, Y. Sei, K. Enoki, K. Saito, Experimental validation of

genetic programming for heat exchanger circuitry optimization, *Applied Thermal Engineering*, vol. 288, art. no. 129517, 2026.

- [10] Sholahudin, N. Giannetti, K. Saito, K. Tanaka, W. Kowa, Nasruddin, N. Putra, M. Suryanegara, Refrigerant leakage detection during field operation of air conditioners using neighborhood component analysis and artificial neural networks, *Journal of Building Engineering*, vol. 119, art. no. 115293, 2026.
- [11] N. Giannetti, Y. Miyaoka, L. Talluri, A. Milazzo, K. Tanaka, W. Kowa, K. Saito, Non-intrusive performance monitoring method for air conditioners, *International Journal of Refrigeration*, vol. 181, pp. 74–83, 2026.

4.2 総説・著書

該当なし

4.3 招待講演

基調講演：2件，招待講演：1件

- [1] Saito, K., 「ヒートポンプビジョン 2030s」, 2025 China Heat Pump Forum (CHPF), Jian, China, July 2025. (基調講演)
- [2] 齋藤潔, 「次世代ヒートポンプ技術」, 2025年度日本冷凍空調学会年次大会, 東京, 2025年9月. (基調講演)
- [3] Giannetti, N., “Heat Pump Technology: A Critical Enabler or Obstacle to Decarbonization?”, The 19th International Conference on Quality in Research, Yogyakarta, Indonesia, October 2025. (招待講演)

4.4 受賞・表彰

1件：国際会議 The 35th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP35) (韓国釜山：2025年9月21日～24日開催)において，発表題目「Evaporator Circuitry Optimization in a Three-dimensional Case」が Best Presentation Award を受賞.

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

「低 GWP 混合冷媒のシステム評価手法開発」として、2025 年度までは R32 や R454C など従来冷媒を対象に検討や実験を行ってきた。2026 年度は、新たに開発されてきた低 GWP 冷媒である R474 系や R479 系などを対象にして、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、熱交換器の最適化計算が可能となるシミュレーターの改良とこれを使った解析を進める。また、最適化検証装置を使って R474 系や R479 系の冷媒いずれかひとつを用いて、実験を実施して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継続して進める。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。