

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

地球温暖化防止の取組みとして、空調分野における温室効果ガス抑制や省エネルギー化が強く求められている。現在ルームエアコンや業務用エアコンに使用されている主な冷媒である R410A は地球温暖化係数(GWP)が高く、モントリオール議定書キガリ改正やフロン排出抑制法の規制を受け、低 GWP 冷媒への転換が必須である。次世代冷媒には低 GWP かつ燃焼性・毒性等の安全性基準を満たすことに加えて、実機性能が高いものを選定すべきである。しかし、空調分野における次世代冷媒選定に目を向けると、実機性能について十分な評価が行われないまま選定が進められているのが現状である。

また、低 GWP 化の為、優れた性能を持つ冷媒を組み合わせた混合冷媒が次世代冷媒の候補として数多く提案されている。冷媒の各組成比の組み合わせ数は膨大に存在する為、組成比ごとの性能評価を実験により行う手法は膨大な時間とコストを要する。その為、次世代冷媒の選定を迅速に行うためには、各種低 GWP 冷媒を採用した機器の実機性能を高精度に解析できる性能解析技術を開発し、シミュレーションにより検討を行うことが大変有効である。

最適な次世代冷媒を選定するシミュレーションモデルは、特に以下の2つの特徴を備えることが望ましい。一つ目は圧縮機の発停を伴う過渡的な運転時の性能を再現できることである。特に業務用エアコンは年間を通して低負荷領域で使われる頻度が高く、低負荷付近では損失を伴う起動と停止(発停)を繰り返して能力調整を行う。年間を通じて省エネルギーを達成するためには、低負荷領域における効率向上と最低能力付近での発停ロスの低減が課題である。その為、次世代冷媒の評価と選定は発停を伴う動特性下においても行われるべきである。

二つ目は、非共沸混合冷媒の過渡的・局所的な組成変化を再現できる事である。低 GWP かつ不燃・微燃性を両立する為、沸点の大きく異なる冷媒を混合し、温度グライドの大きい冷媒が数多く登場している。温度グライドが大きい非共沸混合冷媒を用いたシステムの性能を高精度に予測する為には、組成変化を考慮することが必要である。

冷凍サイクルの起動・停止解析に関する研究は 1990 年代以降数多く報告され、移動境界法を用いる手法と、有限体積法を用いる手法の2種類が存在する。非共沸混合冷媒の組成変化を考慮したシミュレーションに関しては、空調機に R407C が多く用いられた 2000 年代以降に報告されている。しかし、非共沸混合冷媒の組成変化を考慮した起動・停止解析に関する報告や、それらの解析を可能にするための数理モデル・シミュレーション手法についての検討はほとんどされていない。

本研究では上記の観点から、起動・停止解析を含めた、非共沸混合冷媒の性能評価が可能な数理モデルとシミュレーション手法を提示する。また、構築したモデルを用いて、非共沸混合冷媒である R454C(R32/R1234yf=21.5/78.5 mass%)を用いたシステムを対象に、サイクルが起動・停止した際のシステム性能と組成変化のメカニズムを明らかにする。

2. 主な研究成果

2.1 対象とするエアコン

本研究で対象とするルームエアコンの機器構成を Fig.1 に示す．一般的な単段蒸気圧縮式ヒートポンプを対象としており，定格冷房能力は 2.5kW である．圧縮機，室内外熱交換器，膨張弁，四方弁，アキュムレーター，配管から構成されている．冷房運転時における冷媒の流れを青矢印で示す．冷房運転時の制御に関しては，圧縮機回転数と膨張弁開度により，冷房能力と蒸発器出口過熱度(5℃)を制御するものとし，室内・室外のファン回転数は定格回転数で一定とする．解析手法は，モジュール解析理論をベースとしたものである．

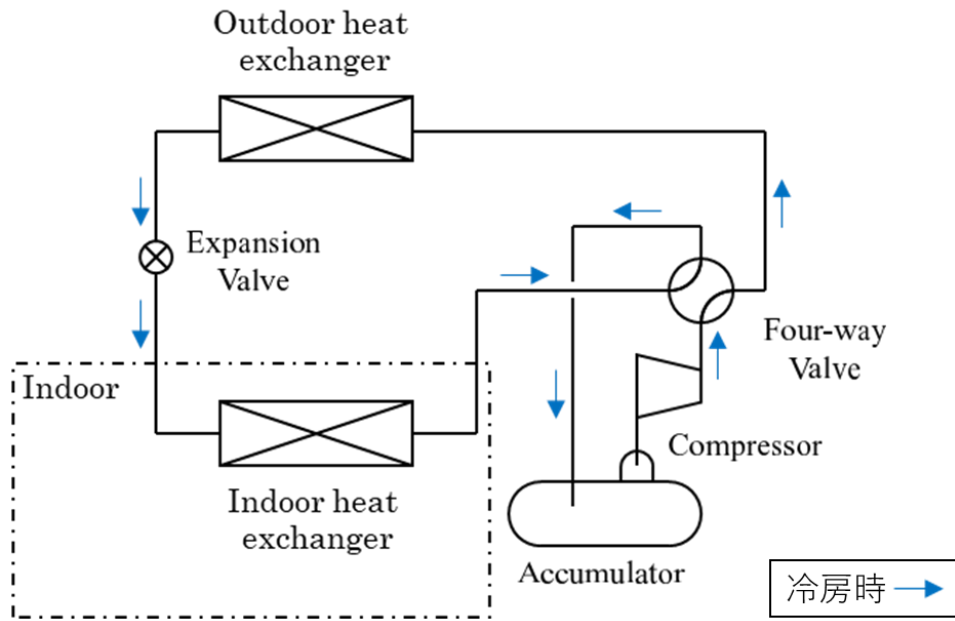


Fig.1 Objective air-conditioning system

2.2 数理モデル

本研究では，2 成分の非共沸混合冷媒を用いた冷凍サイクルを解析する為の数理モデルとシミュレーション手法を提示する．2 成分のうち，片側の成分は添え字 1 で表す．冷媒の状態が Fig. 2 に示すような 2 相状態にある時，検査体積が持つ比エンタルピー h ，循環組成 w ，乾き度 x ，ガス側比エンタルピー h_G ，液側比エンタルピー h_L の関係性を以下に示す．

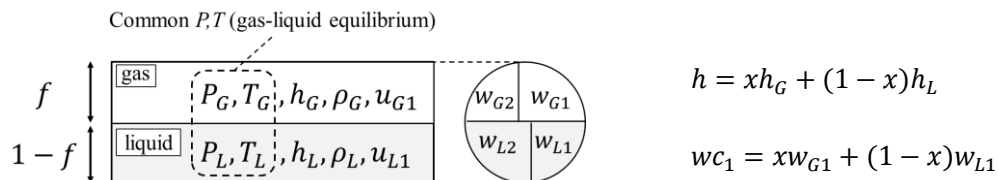


Fig. 2 Two phase flow model

システムの構成要素である熱交換器等の解析モデルは，冷媒の連続の式，エネルギー保存式，圧力損失の式を考慮し構築した．

Table 1 Specification and simulation parameters

Parameters		Units	Values
Cooling capacity		kW	2.5
Compressor rotational speed		rps	40.7
Indoor fan	Power consumption	W	20
Outdoor fan		W	40

Parameters		Units	Values
Indoor unit fan mass flow rate		[kg/s]	0.214
Outdoor unit fan mass flow rate		[kg/s]	0.406
Indoor unit temperature		[°C]	27(dry)
Outdoor unit temperature		[°C]	35(dry)

2.3 ドロップインする冷媒の充填量の設定

本研究では非共沸混合冷媒 R454C(R32/R1234yf=21.5/78.5 mass%)を解析対象とする．本節では冷媒の充填量の決定方法と結果を述べる．充填量は，圧縮機は定格回転数で運転し，蒸発器出口過熱度が 5.0°Cになるように制御をした状態で，COP が最大になる値である 0.6 kg に決定した．熱交換器に流入させる空気条件には，Table 1 に示した値を用いる．R454C の物性値は NIST REFPROPver10.0 を用い混合則より算出した．

2.4 非共沸混合冷媒を用いるシステムの停止解析結果

R454C を封入したシステムの停止特性を解析する．冷凍サイクルへの操作量としては，圧縮機回転数は連続運転時の冷房能力が定格値の 50% (1.25 kW)になる値を与え，その回転数を連続運転状態から 10 秒かけて完全に停止し，サイクル内部の圧力が一様になるまで非定常計算を行う．膨張弁開度は，連続運転時に圧縮機出口過熱度が 5°Cになる値を与え，常に一定とする．室内機・室外機のファン回転数は定格値で一定とし，室内機・室外機が吸い込む空気の条件は Table 1 の値で一定である．非定常計算 1 ステップの時間間隔は，2 秒に設定した．Fig.3 にサイクルの冷房能力，圧縮機吸入/吐出圧力，冷媒質量分布の応答と，圧縮機の操作量を示す．

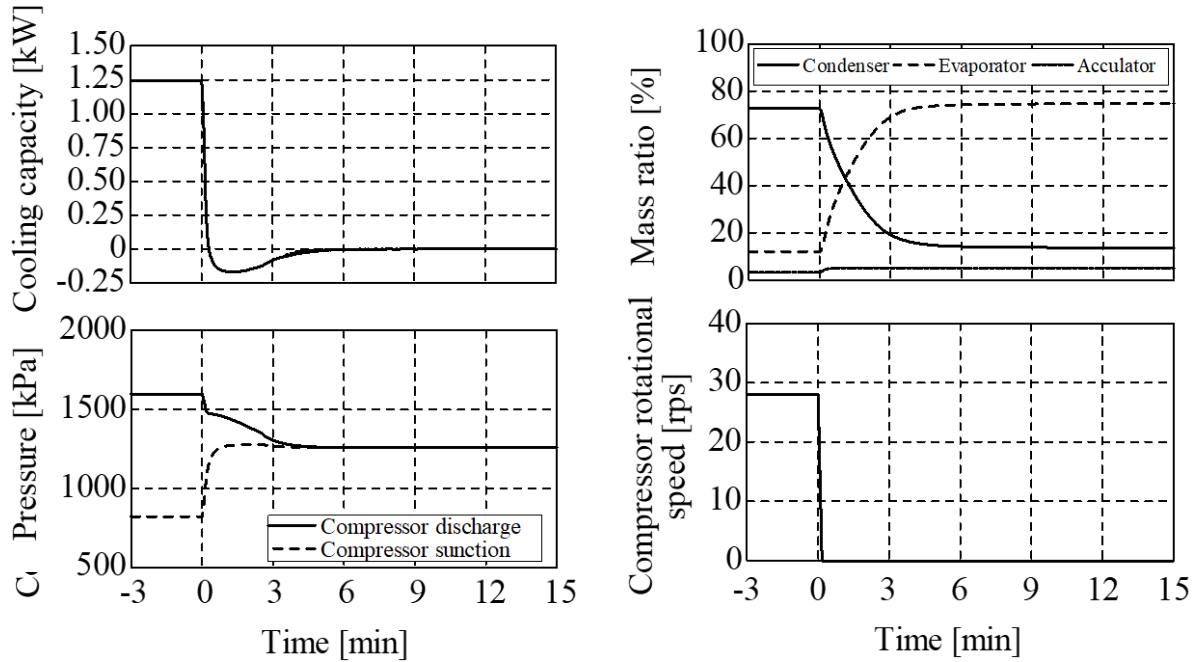


Fig. 3 Shut-down characteristics of the refrigeration cycle

また Fig. 4 に圧縮機停止から 15 分経過した時点での蒸発器、凝縮器内部の冷媒の R32 組成比、乾き度、温度の分布を示す。冷房能力に着目すると、圧縮機停止直後に 0 を下回っている。これは圧縮機停止直後に高温冷媒が膨張弁を通過して蒸発器に流入しており、蒸発器内部の冷媒温度が吸い込み空気温度 27℃を上回り、空気が加熱される為である。

次に、Fig. 4 の熱交換器内部の物性に着目する。まず冷媒温度に着目すると、蒸発器/凝縮器共に入口付近以外の箇所では吸い込み空気温度の 27/35℃と一致している。乾き度に着目すると、蒸発器内部の乾き度は 0 に近くほとんどが液であり、凝縮器は 1.0 に近くほとんどがガスである。ここで、圧縮機停止時に熱交換器入口部分の冷媒温度が吸い込み温度と一致しない理由については、熱交換器に隣接する要素である配管において、外部との熱交換を無視していることが原因と考えられる。

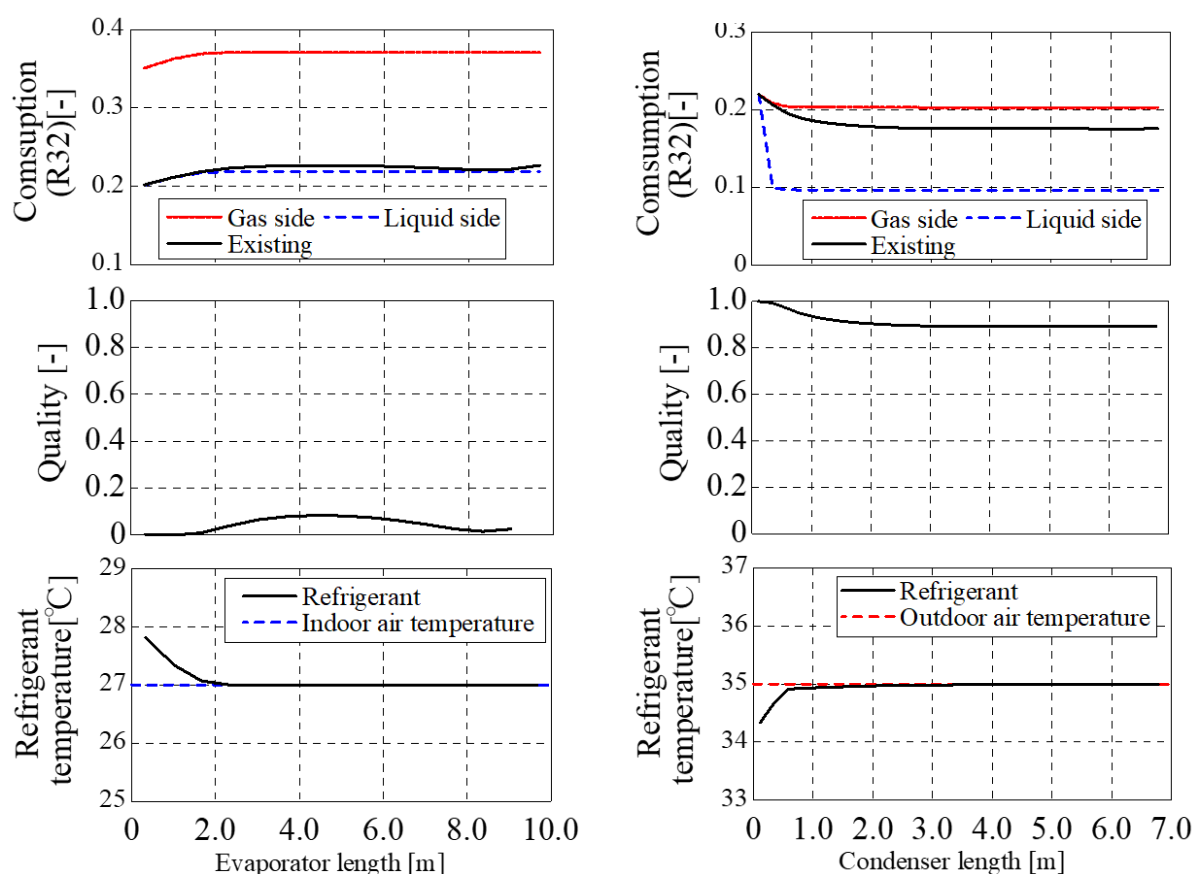


Fig. 4 Distribution of properties

2.5 非共沸混合冷媒を用いるシステムの起動解析結果

Fig.5 に起動特性の解析結果を示す。図には冷房能力、圧縮機消費電力、COP(冷房能力/圧縮機消費電力)、圧縮機吸入/吐出圧力、冷媒質量分布、R32 循環組成(圧縮機、膨張弁、組成一定の条件)、アキュレーターのガス側/液側の R32 組成が示されている。比較のために、充填時の R454C の組成比が運転中に変化しない解析結果も示す。冷房能力は圧縮機起動直後に一度ピークを持った後減少し、その後約 12 分かけて連続運転時に復帰する。ここで冷房能力が起動直後にピークを持つのは、ピークより前は蒸発器内部の全域で熱交換が行われるのに対し、ピーク後は蒸発器の上流部でのみ熱交換が行われる為

である。圧縮機停止中における凝縮器内部の冷媒状態はほぼガス、蒸発器内部はほぼ液である。圧縮機起動直後は蒸発器に液が残留している為、吸込空気温度と冷媒温度の温度差が確保される。これにより圧縮機起動直後は冷房能力が上昇し続ける。その後、時間の経過に伴い凝縮器から未凝縮のガスを多く含んだ冷媒が蒸発器に流入する。これらの影響によりシステムの COP は起動直後の冷房能力に沿って変化していることがわかる。次に、R32 の循環組成と、アキュムレーター内の組成比に注目する。R32 は R1234yf と比較して沸点が低い為、ガス側の R32 の組成は封入組成である 0.215 より高く、液側の組成は 0.215 より低くなる。その為、アキュムレーター内に液で溜まる冷媒の R32 組成比は封入組成より小さく、その反面ガス側が高くなり、サイクル内を循環する冷媒の R32 組成比も封入組成より 10%以上高くなる。アキュムレーターガス部の R32 組成は圧縮機起動直後にピークを迎え、それに起因して圧縮機吸入での R32 組成比も起動直後にピークを迎える。圧縮機内の圧力は、R32 の組成比の増加により、循環組成比固定の解析と比べ全体的に高くなっていることが分かる。起動直後は R32 の組成の影響を強く受けた冷房能力、消費電力の動きとなり、結果として COP が上昇することが明らかとなった。

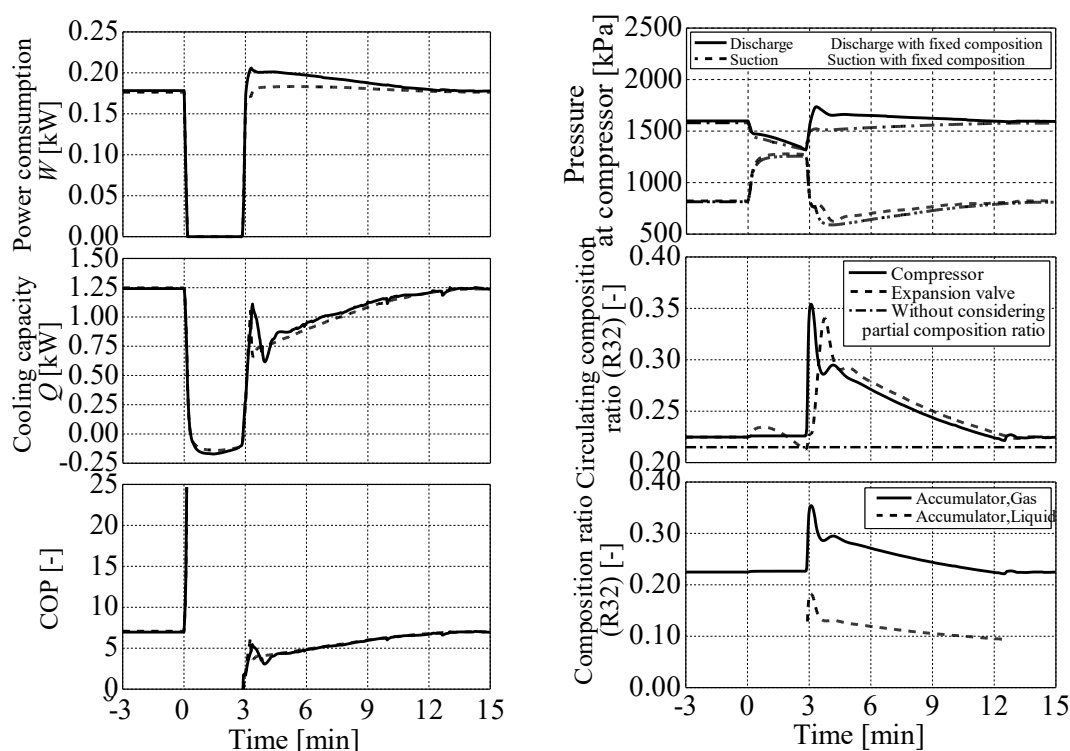


Fig.5 Startup characteristics of the refrigeration cycle (R454C)

2.6 まとめ

本研究では非共沸混合冷媒の局所的・過渡的な組成変化を考慮し、停止・起動時のシステム特性と性能を解析可能な数理モデルと解析手法を確立した。また、構築したモデルを用いて非共沸混合冷媒である R454C を用いたシステムの停止・起動時の性能を解析した。

圧縮機停止から蒸発器、凝縮器内部の冷媒の R32 組成比、乾き度、温度の分布を解析により明らかにできた。また、停止状態から起動状態での熱交換器内部での詳細な特性とシステムとしての特性・性能評価を解析により明らかにすることができた。本研究の成果により、非共沸混合冷媒を用いたシステムの停止時の性能を詳細に予測する為には、組成変化を考慮することが重要であることが示唆された。

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）

ニコロ ジャンネッティ（高等研究所 准教授）

井上 修行（理工学術院総合研究所 招聘研究員）

鄭 宗秀（理工学術院総合研究所 准教授）

粥川 洋平（理工学術院 客員准教授）

東條 健司（理工学術院総合研究所 招聘研究員）

4. 研究業績

4.1 ジャーナル論文&雑誌

- (a) 寺石遼馬, 粥川洋平, 赤坂 亮, 鄭 宗秀, 齋藤 潔, ECS モデルによる冷媒の飽和物性値および理論性能の推算精度の検証, 日本冷凍空調学会論文集, Vol.38, No.3, 2021
- (b) John Carlo S. Garcia, Niccolo Giannetti, Daryl Anne B. Varela, Richard Jayson Varela, Seiichi Yamaguchi, Kiyoshi Saito, Menandro S. Berana, Design of a Numerical Simulator for Finned-Tube Heat Exchangers with Arbitrary Circuitry Heat Transfer Engineering, Published online: 11 Nov 2021 <https://doi.org/10.1080/01457632.2021.2001741>
- (c) Hifni Mukhtar Ariyadi, Jongsoo Jeong, Kiyoshi Saito, Computational analysis of hydrogen flow and aerodynamic noise emission in a solenoid valve during fast-charging to fuel cell automobiles, Journal of Energy Storage, Volume 45, January 2022, 103661, <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103661>
- (d) Niccolo Giannetti, Moojoong Kim, Hiroaki Yoshimura, Kiyoshi Saito, Variational formulation of non-equilibrium void fraction, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 183, Part B, February 2022, 122119, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122119>
- (e) Niccolo Giannetti, Mark Anthony Redo, Kiyoshi Saito, Hiroaki Yoshimura, Variational formulation of stationary two-phase flow distribution, Case Studies in Thermal Engineering, Volume 26, August 2021, 101082, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101082>
- (f) Hideto Yamakawa, Takumi Ogiwara, Richard Jayson Varela, Miyaoka Yoichi, Jongsoo Jeong, Kiyoshi Saito, Intermittent Operation of Vapor Compression Air Conditioning System Using Low GWP Refrigerant, March 2022, FRIO CALOR AIRE ACONDICIONADO, Spanish Magazine.

4.2 発表（国際）（International conferences）

- (g) Sholahudin, Niccolo Giannetti, Yoichi Miyaoka, Jeongsoo Jeong, Kiyoshi Saito, Numerically Trained Artificial Neural Network for Experimental Performance Prediction of Air Conditioning Systems, The SICE Annual Conference 2021, Sep. 8-10, Web 開催, FrC06.3, 2021
- (h) Kiyoshi Saito, Simulation and Evaluation Technologies, HFO2021, Jun. 16-18, Keynote Lecture 2, Web 開催開催, 2021
- (i) Hideto Yamakawa, Takumi Ogiwara, Richard Jayson Varela, Yoichi Miyaoka, Jongsoo Jeong, Kiyoshi Saito, Intermittent operation of vapor compression air-conditioning system using low GWP refrigerant, HFO2021, Jun.16-18, 1054, Web 開催, 2021
- (j) Koichi Kitamura, Koske Bizen, Takaaki Suzuki, Yoichi Miyaoka, Jongsoo Jeong, Kiyoshi Saito, Tadao Watanabe, Takahiro Iwasaki, Koji Takiguchi, Annual performance evaluation of a refrigerated display cabinet using HFO-1234yf refrigerant, HFO2021, Jun. 16-18, 1055, Web 開催, 2021

- (k) Erika Wada, Tao Lyu, Kenji Tojo, Yonezou Ikumi, Hiroo Nakamura, Kiyoshi Saito, Evaluating Compressor Performance with Low-GWP Refrigerants by Simulation Model, 25th International Compressor Engineering Conference at Purdue, May.24-28, 1251, Web 開催, 2021
- (l) Koichi Kitamura, Takaoki Suzuki, Kosuke Bizen, Yoichi Miyaoka, Kiyoshi Saito, Tadao Watanabe, Takahiro Iwasaki, Koji Takiguchi, Performance evaluation by simulation of refrigerated display cabinets using HFO refrigerant, HPC2020, Apr.26-29, 250, Web 開催, 2021
- (m) Takaoki Suzuki, Zheng Ge, Muhamad Yulianto, Yoichi Miyaoka, Seiichi Yamaguchi, Kiyoshi Saito, Annual performance assessment of heat pump water heaters applying various refrigerants, HPC2020, Apr.26-29, 297, Web 開催, 2021
- (n) Akihiro Ichikawa, Jongsoo Jeong, Yoichi Miyaoka, Seiichi Yamaguchi, Kiyoshi Saito, Categorization of industrial heat pump for integrated simulation technology, HPC2020, Apr.26-29, 322, Web 開催, 2021

4.3 発表（国内）（Domestic conferences）

- (1) 坂庭 駿, 赤坂 亮, 粥川 洋平, 鄭 宗秀, 齋藤 潔, 一般化蒸気圧相関式による臨界定数および偏心因子の予測, 化学工学会第 52 回秋季大会, 9 月 22 日-24 日, Web 開催, VF108, 2021
- (2) Giannetti Niccolo, Garcia John Carlo, Varela Richard Jayson, 清 雄一, 榎木 光治, 鄭 宗秀, 齋藤 潔, 低 GWP 冷媒を採用した次世代冷凍空調技術の実用化評価に関する研究開発, 第 4 報: 熱交換器の最適化に関する 2020 年度の取り組みと成果, 2021 年度日本冷凍空調学会 年次大会, 9 月 8 日-10 日, Web 開催, B143, 2021
- (3) 宮岡 洋一, ニコロ ジャンネッティ, 鄭 宗秀, 齋藤 潔, 低 GWP 冷媒を採用した次世代冷凍空調技術の実用化評価に関する研究開発, 第 5 報: ハイブリッド型性能評価装置の開発に関する取り組みと成果, 2021 年度日本冷凍空調学会 年次大会, 9 月 8 日-10 日, Web 開催, B144, 2021
- (4) 鄭 宗秀, ジャンネッティ ニコロ, 宮岡 洋一, 齋藤 潔, 低 GWP 冷媒を採用した次世代冷凍空調技術の実用化評価に関する研究開発, 第 6 報: 2020 年度のシミュレーター開発の取り組みと成果, 2021 年度日本冷凍空調学会 年次大会, 9 月 8 日-10 日, Web 開催, B145, 2021
- (5) 米田 寛太, 金 武重, 鄭 宗秀, 齋藤 潔, 締切法, 静電容量法を用いた R32 マクロ管のボイド率測定, 2021 年度日本冷凍空調学会 年次大会, 9 月 8 日-10 日, Web 開催, B345, 2021
- (6) 石坂 成基, 山川 英士, ヴアレラ リチャード・ジェイソン, 鄭 宗秀, 齋藤 潔, 非共沸混合冷媒を用いた蒸気圧縮式空調システムの起動・停止挙動, 2021 年度日本冷凍空調学会 年次大会, 9 月 8 日-10 日, Web 開催, D114, 2021
- (7) 保正 樹輝, ヴアレラ リチャード・ジェイソン, ジャンネッティ ニコロ, 鄭 宗秀, 齋藤 潔, リキッドデシカント調湿空調システムの高効率化, 2021 年度日本冷凍空調学会 年次大会, 9 月 8 日-10 日, Web 開催, D315, 2021
- (8) 丸山 拓飛, 武藤 聡, 宮岡 洋一, 鄭 宗秀, 齋藤 潔, 産業分野におけるヒートポンプ導入効果の評価手法の構築と「産業用エネルギー統合シミュレーター」の開発, 2021 年度日本冷凍空調学会 年次大会, 9 月 8 日-10 日, Web 開催, D123, 2021
- (9) 坂庭 駿, 赤坂 亮, 粥川 洋平, 鄭 宗秀, 齋藤 潔, 低 GWP 冷媒に対する一般化蒸気圧相関式, 2021 年度日本冷凍空調学会 年次大会, 9 月 8 日-10 日, Web 開催, D222, 2021
- (10) 坂井 祐太, ジャンネッティ ニコロ, 鄭 宗秀, 齋藤 潔, 低温固体表面における過冷却液滴凍結の特性解明とその凍結予測に関する研究, 2021 年度日本冷凍空調学会 年次大会, 9 月 8 日-10 日, Web 開催, A142, 2021

- (11) 森 稜平, 松井 隼, 宮岡 洋一, 鄭 宗秀, 齋藤 潔, 空調機器の実運転性能評価に関する研究, 第 1 報 : 「ハイブリッド型実運転性能評価装置」の開発, 2021 年度日本冷凍空調学会 年次大会, 9 月 8 日-10 日, Web 開催, A233, 2021
- (12) 松井 隼, 森 稜平, 宮岡 洋一, 鄭 宗秀, 齋藤 潔, 空調機器の実運転性能評価に関する研究, 第 2 報 : 空調機器の発停状態を含む部分負荷運転時の性能評価, 2021 年度日本冷凍空調学会 年次大会, 9 月 8 日-10 日, Web 開催, A236, 2021
- (13) 齋藤 潔, 最新のヒートポンプ関連技術のシミュレーターと実運転性能評価装置の開発, 第 25 回動力・エネルギー技術シンポジウム, 7 月 26 日-27 日, E221, Web 開催, 2021
- (14) 森 稜平, 松井 隼 1, 宮岡 洋一, 鄭 宗秀, 齋藤 潔, ヒートポンプ機器の実運転性能評価装置の開発, 第 31 回環境工学総合シンポジウム 2021, 7 月 8 日-9 日, 408, Web 開催, 2021
- (15) 鈴木 啓将, アリヤディ ヒフニ, 鄭 宗秀, 齋藤 潔, 水素供給用ソレノイドバルブにおける流動様相及び騒音特性, 第 31 回環境工学総合シンポジウム 2021, 7 月 8 日-9 日, 104, Web 開催, 2021
- (16) 武藤 聡, 丸山 拓飛, 宮岡 洋一, 鄭 宗秀, 齋藤 潔, 産業分野におけるヒートポンプ導入効果の評価手法の構築とシミュレーターの開発, 第 31 回環境工学総合シンポジウム 2021, 7 月 8 日-9 日, 412, Web 開催, 2021
- (17) 粥川洋平, 寺石遼馬, 赤坂亮, 西山教之, 齋藤潔,, HFO 系代替冷媒候補物質群に関する拡張対応状態原理 (ECS) , 第 54 回空気調和・冷凍連合講演会, 4 月 22 日-23 日, 2021/4/23, 16, Web 開催, 2021

5. 研究活動の課題と展望

2021 年度では, 非共沸混合冷媒の局所的・過渡的な組成変化を考慮し, 停止・起動時のシステム特性と性能を解析可能な数理モデルと解析手法を確立した. 例として, 非共沸混合冷媒である R454C を用いたシステムの停止・起動時の運転特性を明らかにした. 引き続き, 本年度の研究成果をベースとし, システムの高効率運転を課題とした基本的なシステムの断続運転特性の検討をシミュレーションで進めていく.