

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

ヒートポンプにおいては、現在地球温暖化係数 GWP の高い冷媒が用いられていることから、次々と新しい低 GWP 冷媒が提案されている。この多様な冷媒を用いた実機性能を比較検討するためには、それぞれの冷媒において最適に設計された機器に対して統一的な条件で性能を評価すべきであるが、その指針が明確となっていない。そこで、研究グループが開発してきた Energy flow +M を利用して新たな冷媒の性能評価を進めるとともに、その比較検討を行った結果について述べる。

2. 主な研究成果

2.1 対象とするエアコン

図 1 示すように通常のエアコンが採用している単段の圧縮式冷凍サイクルを採用した機器を想定して分析を進めることとした。このシステムは、圧縮機、蒸発器、膨張弁、アキュムレーターから構成されているエアコンでは、最も基本となるサイクルである。

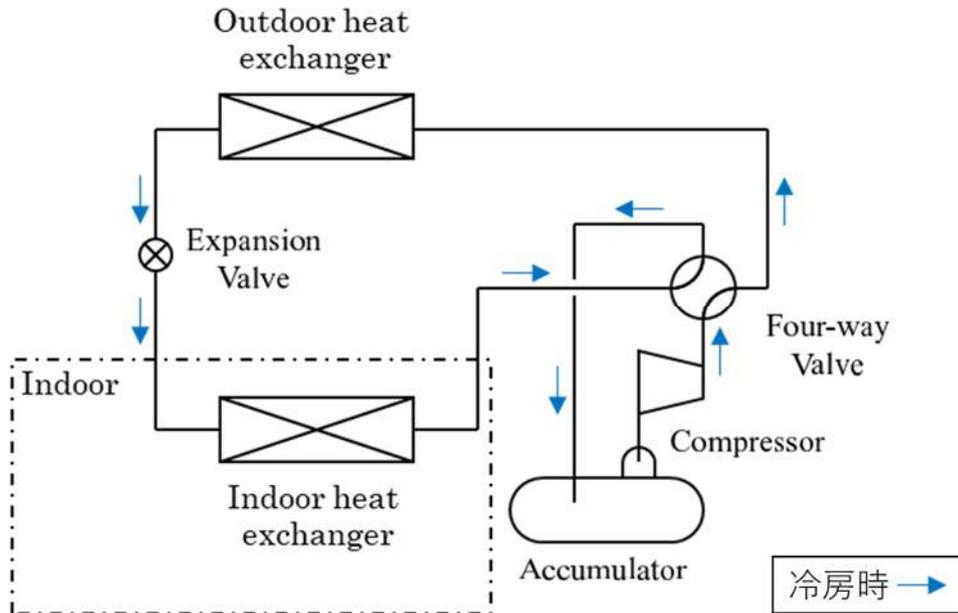


図 1 対象とするエアコン

解析モデルは、Energy flow+MⅡ搭載されているものであり、すでに多くの機器でその妥当性が検証されたものである。

2.2 解析結果

ここでは、圧縮機を定格回転数で定速運転させた条件下で、各冷媒の性能比較を行い、冷媒物性が性能に与える影響を考察する。シミュレーション条件を Table 2.1 に、その時の各冷媒の COP,冷房能力、消費電力を Fig. 2.1 に示す。ただし、Fig. 2.1 のグラフの縦軸は、基準冷媒である R410A の結果を 100%

として無次元化したものを示す。また、この時の圧縮機吐出温度を Fig. 2.2 に示す。なお、室内外の空気条件は Table 2.2 のとおりである。

Table 2.1 シミュレーション条件

操作量	運転方法
膨張弁開度	蒸発器出口過熱度が 5K となるように操作
圧縮機回転数	定格の 100%で固定
室外風量	定格の 100%で固定
室内風量	定格の 100%で固定

Table 2.2 室内外の空気条件

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) / 19(wet)
Outdoor unit temperature	[°C]	35(dry) / 24(wet)

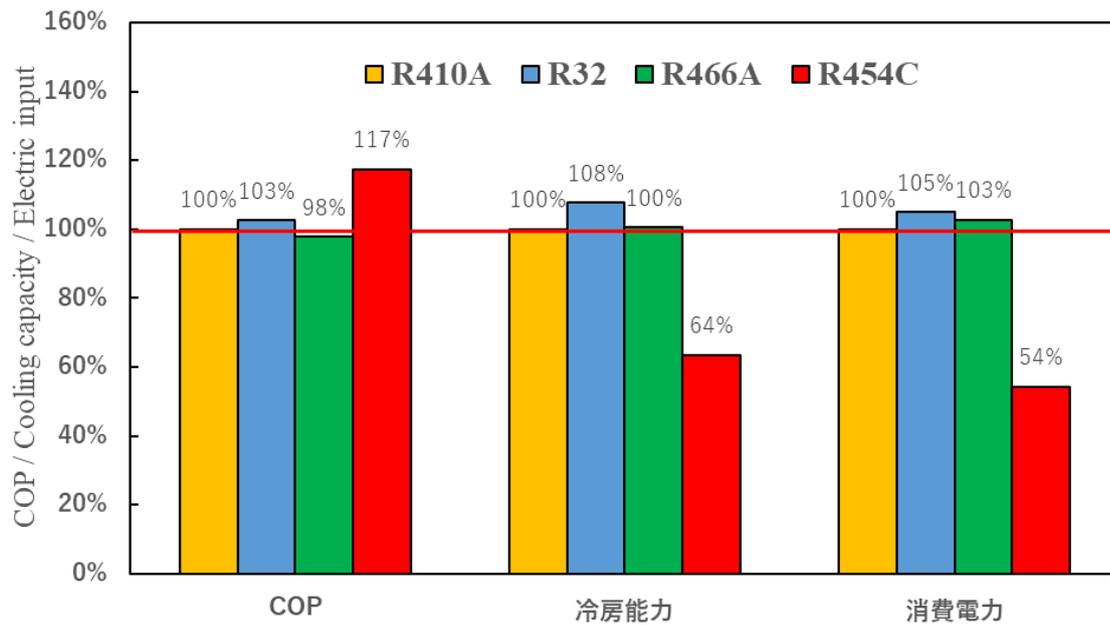


Fig. 2.1 圧縮機定格回転数における性能の比較

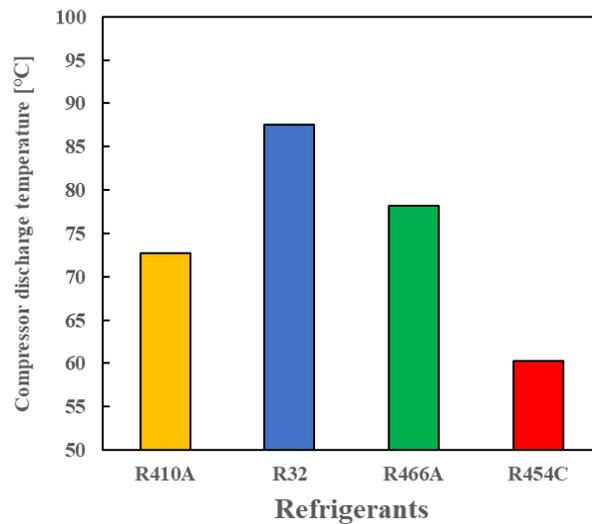


Fig. 2.2 圧縮機定格回転数における圧縮機吐出温度の比較

圧縮機を定格回転数で運転した場合において R410A と比較すると、R32 をドロップインした場合には COP が 3%増加し、冷房能力は 8%増加した。R466A をドロップインした場合には COP が 2%低下し、冷房能力は 0.5%増加した。R454C をドロップインした場合には COP が 17%増加し、冷房能力は 36%低下した。圧縮機吐出温度に着目すると、R32 が約 90°C で最も高くなった。

ここでは、圧縮機を定格回転数で運転した場合において、冷媒物性や運転条件が性能(特に冷房能力)にどのような影響を与えているか考察する。まず、冷媒側のみに着目すると、冷房能力は以下のように表される

冷房能力 Q_c [kW]

$$Q_c = G_R \Delta h \quad (2-1)$$

G_R 冷媒循環量 [kg/s]

Δh 蒸発器入口出口における比エンタルピ差 [kJ/kg]

また、冷媒循環量は以下のように表される。

冷媒循環量 G_R [kg/s]

$$G_R = n \eta_V \rho_{R,I} V \quad (2-2)$$

n 圧縮機回転数 [rps]

η_V 圧縮機体積効率 [-]

$\rho_{R,I}$ 圧縮機吸い込み密度 [kg/m³]

V 圧縮機行程容積 [m³]

ここで、圧縮機体積効率 η_V [-]、圧縮機行程容積 V [m³] は圧縮機により一定であり、定格回転数で定速運転を行っている為圧縮機回転数 n [rps] も一定である。以上から、冷房能力は蒸発器入口出口における比エンタルピ差 Δh [kJ/kg] と圧縮機吸い込み密度 $\rho_{R,I}$ [kg/m³] の二つの物性から決定され、これらの積が大きいほど冷房能力も大きいことがわかる。冷媒ごとの、冷房能力を支配する物性を Fig. 2.3 に示す。ただし、グラフの縦軸は、基準冷媒である R410A の物性を 100% として無次元化したものを示す。

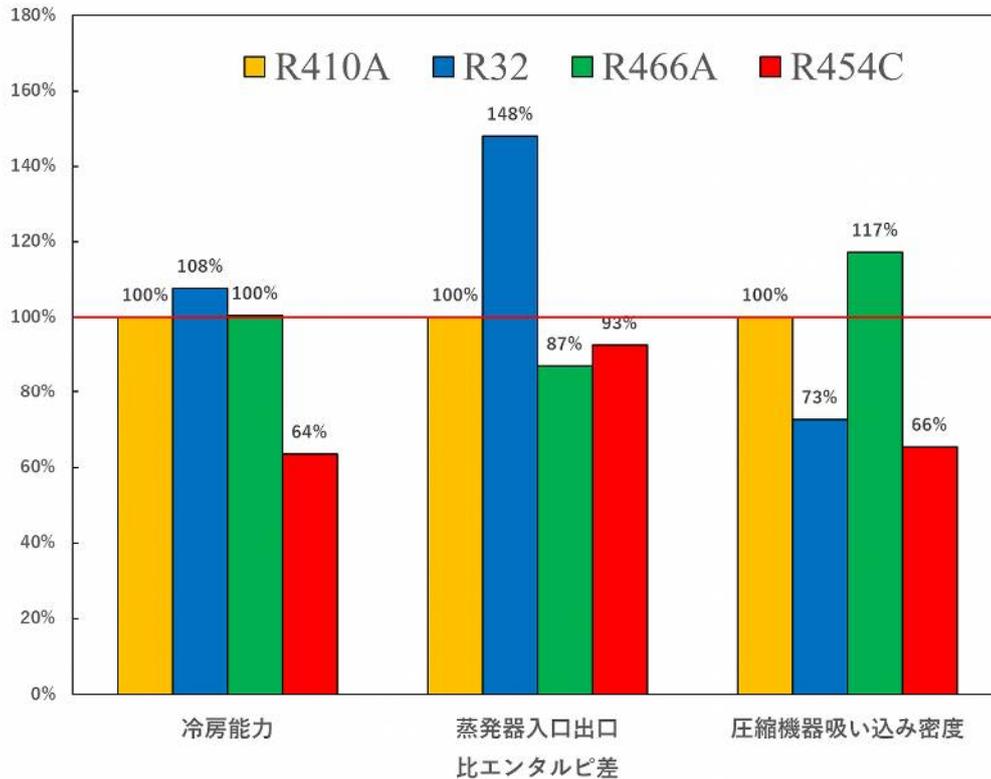


Fig. 2.3 冷房能力を支配する冷媒物性

まず、冷房能力が基準冷媒より 36%低くなった R454C に着目する。このように R454C の冷房能力が低くなった要因の一つとして、Fig. 2.3 に示すように圧縮機吸い込み密度が 34%低いことが挙げられる。このように R454C の吸い込み密度が低い要因は、低圧冷媒である R1234yf が R454C の組成の 78.5% を占めており、R454C 自体も低圧冷媒の傾向を持つためであると考えられる。これにより、冷媒循環量が不足し、冷房能力が低下した。Fig. 2.1 に示すように R454C の COP は基準冷媒より 17%高いが、これは冷房能力が低いため、相対的に冷房能力あたりの熱交換器の体格が大きくなり、十分に熱交換が行え蒸発温度と凝縮温度が近づいたためであると考えられる。

次に、R32 に着目する。R32 は圧縮機吸い込み密度が 37%低いにも関わらず、冷房能力は 8%高くなっている。これは、Fig. 2.3 に示すように R32 の蒸発器入口出口における比エンタルピ差、すなわち蒸発潜熱が 48%高くなっている為である。これにより、R32 は少ない循環量でも基準冷媒より大きい冷房能力を発揮できたと考えられる。

最後に、R466A に着目する。R466A は圧縮機吸い込み密度が基準冷媒より 17%高いが、潜熱は 13%小さい。結果として、冷房能力は基準冷媒とほぼ同等になった。

冷媒と空気間の熱伝達に着目すると次のことがわかる。冷房能力は、蒸発器における熱コンダクタンス $KA[W/K]$ と温度差 ΔT の積から決定される。各冷媒の熱伝達率、熱コンダクタンスを Fig. 2.4 に示す。

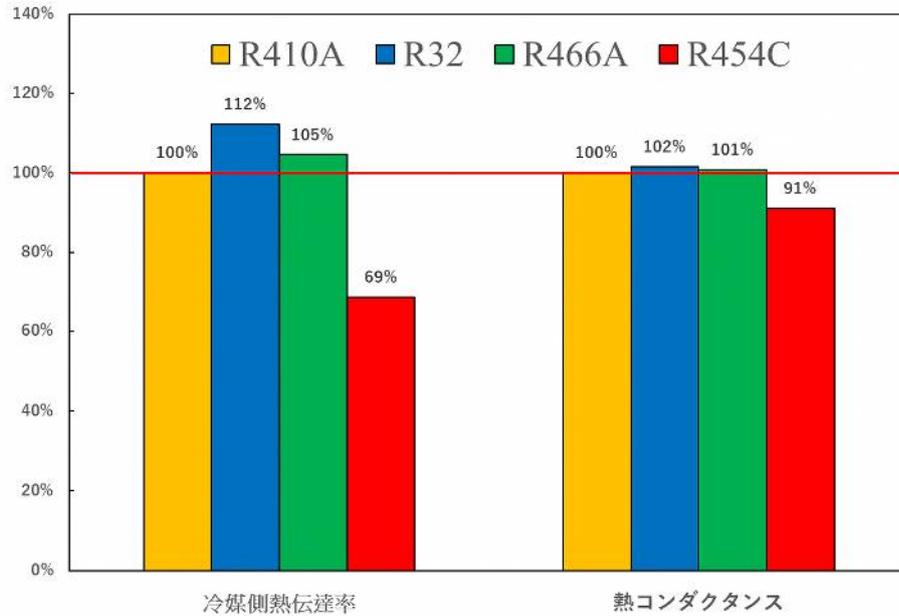


Fig. 2.4 各冷媒の熱伝達率・熱コンダクタンス

Fig. 2.4 より、冷媒により冷媒側の熱伝達率は多少異なるが、熱コンダクタンスはほぼ同程度であることがわかる。これは、蒸発器における熱移動の支配要因が空気側にあるためである。このことから、蒸発器における冷媒側の熱伝達率の違いは能力にほとんど影響しないといえる。

次に、冷媒と空気の温度差 ΔT に着目する。ここでは、代替冷媒の候補の中で最も温度グライドの大きい R454C と、基準冷媒である R410A の蒸発器における温度分布を比較することで、温度グライドを持つことが能力にどのような影響を与えるか考察する。両者の冷媒の蒸発器における温度分布・熱伝達率の分布を Fig. 2.5 に示す。

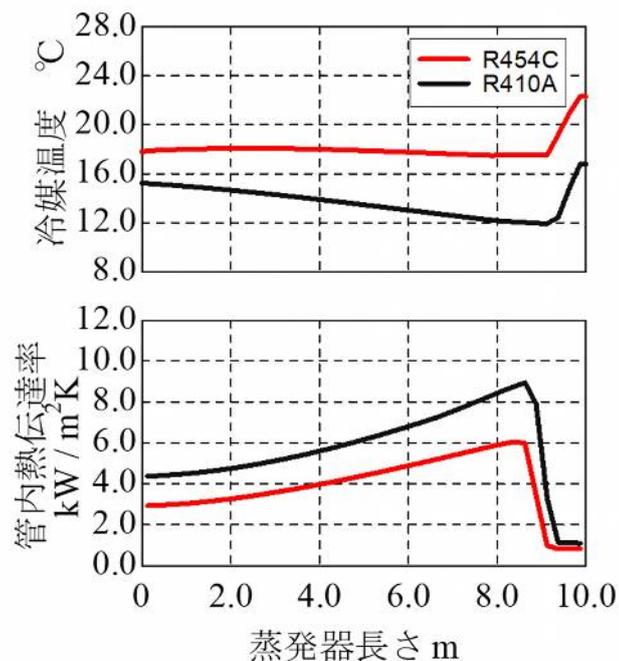


Fig. 2.5 蒸発器における温度・冷媒側熱伝達率の分布

まず R410A の温度分布に着目すると、二相域において蒸発温度が低下していることがわかる。これは圧力損失に伴い、蒸発温度が低下する為である。(R410A は非共沸冷媒であるため温度グライドを持つが、極僅かである。) これに対し、大きな温度グライドを持つ R454C の温度分布に着目する。ここでは、圧力損失による蒸発温度低下と、温度グライドによる蒸発温度増加の両方が同時に発生している。これにより、R454C と R410A を比較すると、R454C の方が空気(熱交換器入口温度 27°C)との温度差 ΔT が小さいことがわかり、これが冷房能力の低下を招いたといえる。このように、温度グライドを持つことが、R454C の冷房能力が低下した 2 つ目の要因であるといえる。

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 (高等研究所 講師 (任期付))

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 客員准教授)

粥川 洋平 (理工学術院 客員准教授)

東條 健司 (理工学術院総合研究所 招聘研究員)

4. 研究業績

4.1 学術論文 (Journal papers)

- (1) *◎ Sholahudin, Keisuke Ohno, Niccolo Giannetti, Seiichi Yamaguchi, Kiyoshi Saito, "Dynamic modeling of room temperature and thermodynamic efficiency for direct expansion air conditioning systems using Bayesian neural network", Applied Thermal Engineering, July-2019, Volume 158
- (2) *◎ Niccolo Giannetti, Piyatida Trinuruk, Seiichi Yamaguchi & Kiyoshi Saito, Film rupture and partial wetting over flat surfaces with variable distributor width, Science and Technology for the Built Environment, Accepted author version posted online: 31 Jul 2019, Published online: 09 Sep 2019, Volume 25, 2019 - Issue 1, Pages 1313-1324
- (3) *◎ Mark Anthony Redo, Jongsoo Jeong, Niccolo Giannetti, Koji Enoki, Seiichi Yamaguchi, Kiyoshi Saito, Hyunyoung Kim, Characterization of two-phase flow distribution in microchannel heat exchanger header for air-conditioning system, Experimental Thermal and Fluid Science, Sep-2019, Volume 106, Pages 183-193
- (4) *◎ Nasruddin, Sholahudin, Pujo Satrio, Teuku Meurah Indra Mahlia, Niccolo Giannetti, Kiyoshi Saito, Optimization of HVAC system energy consumption in a building using artificial neural network and multi-objective genetic algorithm, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Oct-2019, Volume 35, Pages 48-57
- (5) *◎ Mark Anthony Redo, Keisuke Ohno, Niccolo Giannetti, Seiichi Yamaguchi, Kiyoshi Saito, Seasonal performance evaluation of CO₂ open refrigerated display cabinets, Applied Thermal Engineering 25-Dec-2019, Volume 163, Article 114354
- (6) *◎ Niccolo Giannetti, Mark Anthony Redo, Sholahudin, Jongsoo Jeong, Seiichi Yamaguchi, Kiyoshi Saito, Hyunyoung Kim, Prediction of two-phase flow distribution in microchannel heat exchangers using artificial neural network, International Journal of Refrigeration

4.2 発表 (国際) (International conferences)

- (1) Yujin OHASHI, Ryosuke MORIWAKI, Seiichi YAMAGUCHI, Kiyoshi SAITO, “Numerical Simulation of Falling-Film Absorbers at High Temperature”, International Workshop on Environmental Engineering 2019, Okinawa, Japan, June 25 - 28, 2019;
- (2) Kosuke BIZEN, Seiichi YAMAGUCHI, Kiyoshi SAITO, “Thermal load characteristics of refrigerated display cabinet air curtain by thermal fluid analysis”, International Workshop on Environmental Engineering 2019, Okinawa, Japan, June 25 - 28, 2019;
- (3) S. Yamaguchi, “Development of finned-tube heat exchanger simulator for heat pumps”, International Workshop on Environmental Engineering 2019, Okinawa, Japan, June 25 - 28, 2019;
- (4) N. Giannetti, “Theoretical Formulation of Two-phase Flow Distribution in Microchannel Heat Exchangers using Electric Circuit Analogy”, International Workshop on Environmental Engineering 2019, Okinawa, Japan, June 25 - 28, 2019;
- (5) SHOLAHUDIN, Keisuke OHNO, Seiichi YAMAGUCHI, and Kiyoshi SAITO, “Identification of vapour compression air conditioning system behaviour using Bayesian regularization neural network”, ICR 2019, Montreal, Quebec, Canada, August 24 - 30 2019;
- (6) Richard Jayson VARELA, Niccolo GIANNETTI, Hifni ARIYADI, Seiichi YAMAGUCHI, Kiyoshi SAITO, Xin-Ming WANG, Hiroshi NAKAYAMA, “A practical heat and mass transfer model between air and ionic liquid solution in an internally cooled dehumidifier with partial wetting”, ICR 2019, Montreal, Quebec, Canada, August 24 - 30 2019;
- (7) M. A. Redo, J. Jeong, S. Yamaguchi, K. Saito, H. Kim, “Two-Phase Flow Distribution in Dual-Compartment Microchannel Heat Exchanger Header”, ICR 2019, Montreal, Quebec, Canada, August 24 - 30 2019;
- (8) Hifni M. ARIYADI, Niccolò GIANNETTI, Seiichi YAMAGUCHI, and Kiyoshi SAITO, “Comparative analysis of ionic liquids as sorptive media for absorption cooling systems”, ICR 2019, Montreal, Quebec, Canada, August 24 - 30 2019;
- (9) Kiyoshi SAITO, “History and latest trends of domestic hot water heat pump technologies”, ICR 2019, Montreal, Quebec, Canada, August 24 - 30 2019;
- (10) N. Giannetti, R.J. Varela, H. Ariyadi, S. Yamaguchi, K. Saito, X.M. Wang, H. Nakayama, “SEMI-THEORETICAL MODEL OF THE WETTING CHARACTERISTICS OF AQUEOUS IONIC LIQUID ON AN ALUMINIUM FINNED-TUBE DESICCANT CONTACTOR”, ICR 2019, Montreal, Quebec, Canada, August 24 - 30 2019;
- (11) Koki Furuta, Ryoma Teraishi, Yohei Kayukawa, Seiichi Yamaguchi and Kiyoshi Saito, “PVT property measurements for low-temperature natural refrigerant, nitrous oxide”, ATPC2019 The 12th Asian Thermophysical Properties Conference, Xi'an China, October 2 - 6 2019;
- (12) JCS Garcia, N Giannetti, H Ariyadi, DA Varela, “Numerical Simulation of Finned-Tube Heat Exchangers with Arbitrary Connectivity and Flexible Set of Input Conditions”,

IMPRES2019, Kanazawa Chamber of Commerce and Industry, October 20 – 23, 2019

- (13) S. Yamaguchi, K. Saito, Takumi Ogiwara, Richard Jayson Varela, Seiichi Yamaguchi, Kiyoshi Saito, Hiroshi Nakayama, Xinming Wang, “Transfer characteristics of a fin-tube-type regenerator for liquid desiccant systems with ionic liquid”, ISTP 30th, Vinpearl Halong Bay Resort, November 1st- 3rd 2019;
- (14) Kiyoshi Saito, “Heat-Pump Technologies Save Humankind From Global Warming and Food Shortage”, 10th International Mechanical Engineering Research Conference, University of San Carlos, Cebu City, Philippines, January 23 – 24, 2020;

4.3 発表（国内）（Domestic conferences）

- (1) 平沢 優好, 齋藤 潔, 山口 誠一, 井上 修行, “吸収冷凍機における不凝縮ガスが吸収現象に与える影響の解明”, 第 53 回空気調和・冷凍連合講演会, 東京海洋大学, 4 月 17 日～19 日, 2019;
- (2) 福井 遼太, 山口 誠一, 齋藤 潔, “高温度域における濡れ特性を考慮した流下液膜の数値解析”, 2019 年度日本冷凍空調学会年次大会, 東京海洋大学 越中島キャンパス（東京）, 9 月 11 日～13 日, 2019;
- (3) 寺崎 佑隆, 山口 誠一, 齋藤 潔, 三吉 直也, 立石 浩毅, 長谷川 泰士, “数値シミュレーションによるターボ冷凍機の非定常特性解析”, 2019 年度日本冷凍空調学会年次大会, 東京海洋大学 越中島キャンパス（東京）, 9 月 11 日～13 日, 2019;
- (4) 市川 暁広, 鄭 宗秀, 宮岡 洋一, 山口 誠一, 齋藤 潔, “産業用ヒートポンプシステムの統合シミュレーション技術の構築第 1 報：シミュレーションのコンセプトとシステム性能評価解析ロジック”, 2019 年度日本冷凍空調学会年次大会, 東京海洋大学 越中島キャンパス（東京）, 9 月 11 日～13 日, 2019;
- (5) 金子 琢哉, ジェイソン ヴァレラ リチャード, 山口 誠一, 齋藤 潔, 中山 浩（中部電力）, 王 新明（エボニックジャパン）, “イオン液体を吸収材として用いた中間冷却型気液接触器の熱・物質移動特性”, 2019 年度日本冷凍空調学会年次大会, 東京海洋大学 越中島キャンパス（東京）, 9 月 11 日～13 日, 2019;
- (6) 吉田 知広, 大野 慶祐, 山口 誠一, 齋藤 潔, 二渡 直樹（NTT ファシリテーズ）, 宇田川 陽介（NTT ファシリテーズ）, “ガスインジェクションサイクルの制御検討に向けた体系的特性把握”, 2019 年度日本冷凍空調学会年次大会, 東京海洋大学 越中島キャンパス（東京）, 9 月 11 日～13 日, 2019;
- (7) 宮岡洋一, “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 1 報：次世代低 GWP 冷媒のサイクル性能評価研究の概要と 2018 年度の取り組み”, 2019 年度日本冷凍空調学会年次大会, 東京海洋大学 越中島キャンパス（東京）, 9 月 11 日～13 日, 2019;
- (8) 井上 洋平, “膨張弁における混合冷媒流れの数値解析”, 2019 年度日本冷凍空調学会年次大会, 東京海洋大学 越中島キャンパス（東京）, 9 月 11 日～13 日, 2019;
- (9) 齋藤 潔, “次世代冷媒の性能シミュレーション”, 2019 年度近畿地区シンポジウム, 神戸大学 梅田インテリジェントラボラトリ（梅田ゲートタワー 8 階）, 11 月 15 日, 2019;

5. 研究活動の課題と展望

このように次世代冷媒に対する機器の性能を評価することができた。今回は、まずは、次世代冷媒として R466A と R454C についての検討を行った。来年度は、さらに提案されている多くの冷媒についての分析を進めるとともに、これらの新冷媒を採用した場合に生じる様々な現象や課題を整理

するとともに次世代冷媒として最適な冷媒は何かとの問いに答え得るように引き続き，次世代冷媒に関する検討をシミュレーションで進めていく．