

# 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

現在、地球温暖化対策の観点から、空調用途向けに、低 GWP 冷媒の開発が進んでいる。従来の CFC 系冷媒は不燃性であったが、低 GWP 冷媒として期待されている冷媒には、微燃性のものが多い。低 GWP 冷媒としては、HFO 系冷媒 (R1234yf, R1234ze (E))、HFC 系との混合冷媒 (R32) などがあるが、微燃性 (2L) 区分の冷媒がほとんどである。このように低 GWP 化 と可燃性についてはトレードオフの傾向があり、GWP が低くても燃焼性や毒性の問題で課題があるものが多い。さらに、次世代 GWP 冷媒自体の開発は急務でありながら、冷媒を空調に適用した際の性能評価と運転特性の解明を通じて業務用空調機(VRF)として適するかどうか、より慎重に評価する必要がある。

国外では、2016 年の「キガリ改正」において、HFC の生産および消費量の段階的削減義務が採択された。日本などの先進国は、HFC の生産量を 2019 年から徐々に減らして 2036 年までに基準年平均に比べて 85%削減する。開発途上国は、先進国に遅れて削減し、国により削減のスケジュールが異なる。最終的に先進国、開発途上国合わせてすべての締約国は 2040 年代後半にそれぞれ基準年比 80~85%削減を目指す。

日本国内では、2015 年に「フロン排出抑制法」が施行され、フロン使用機器の所有者または管理者が、廃棄時だけでなく、日常的な管理が求められるほか、一定以上の漏洩量がある場合は年次報告が必要となった。

このように、「キガリ改正」や「フロン排出抑制法」を始めとする冷媒規制強化を背景に、家庭用・業務用空調システムに現行採用されている R410A (GWP2090) の使用継続が困難となる可能性がある。特に業務用空調機は冷媒充填量の多さもあるため早急な対策が求められる。

そこで本研究では、R410A の代替冷媒として可燃性を抑えつつ低 GWP が実現可能な A2L 冷媒の活用可能性に注目してきた。今後空調システムの冷媒として利用価値を明確にすることは次世代冷媒の開発に大きな進歩となると言える。昨年度の研究に引き続き、A2L 冷媒の中で低 GWP となる冷媒のさらなる拡張と妥当性のある伝熱モデルの構築を行い、解析により空調システムの性能と運転特性を明らかにする。本研究はシミュレーションを活用し、有望な低 GWP 冷媒を空調システムに採用した場合の性能評価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

本研究で対象とするルームエアコンの機器構成を Fig.2.1 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°C) 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。

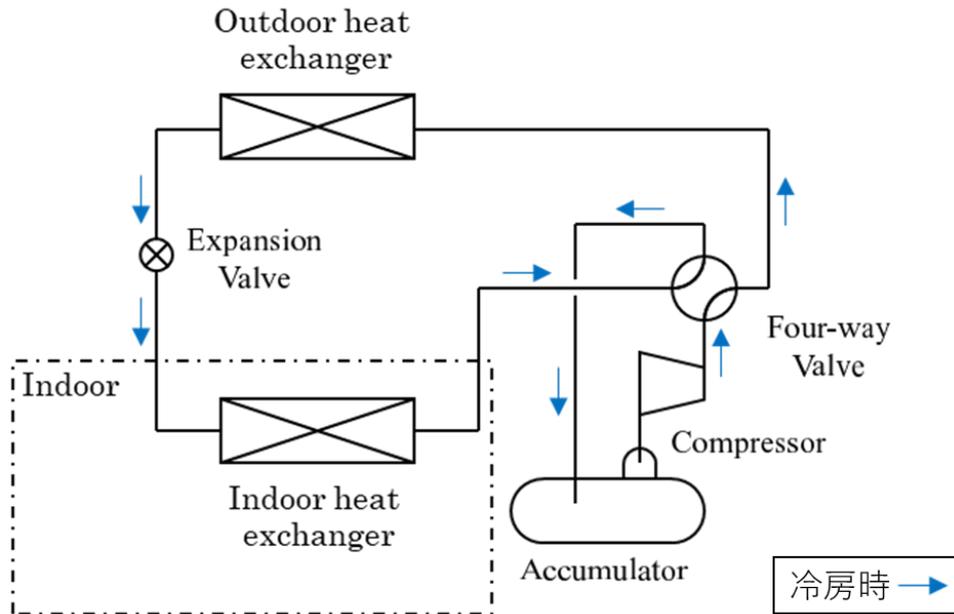


Fig.2.1 対象とするエアコン

## 2.2 対象冷媒と解析条件

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。対象の冷媒物性は Table 2.1 と Table 2.2 に示す。シミュレーション条件は Table 2.3 であり、室内外の空気条件は Table 2.4 のとおりである。

Table 2.1 対象の冷媒と物性①

冷媒	R410A(基準冷媒)	R32	R466A	R454B
組成	R32/R125 =50/50mass%	R32=100mass% (単一成分)	R32/R125/CF3I =49/11.5/39.5mass%	R32/R1234yf =68.9/31.1mass%
GWP	2090	675	733	466
ODP	0	0	0.008	0
安全性分類	A1	A2L	A1	A2L
沸点	-51.1	-51.7	-53.5	-50.9
温度グライド	0.1	0	1.5	1.0

Table 2.2 対象の冷媒と物性②

冷媒	R32 と CO <sub>2</sub> の混合冷媒		
	R32/CO <sub>2</sub> = 90/10mass%	R32/CO <sub>2</sub> = 85/15mass%	R32/R1234yf = 80/20mass%
組成	R32/CO <sub>2</sub> = 90/10mass%	R32/CO <sub>2</sub> = 85/15mass%	R32/R1234yf = 80/20mass%
GWP	608	540	473
ODP	0	0	0
安全性分類	-	-	-
沸点	-62.5	-66.1	-69.1
温度グライド	8.7	11.3	13.1

Table 2.3 シミュレーション条件

操作量	運転方法
圧縮機回転数	冷房能力
膨張弁開度	蒸発器出口過熱度 5°C
室外ファン回転数	定格回転数で定速運転
室内ファン回転数	定格回転数で定速運転

Table 2.4 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)

## 2.2 ドロップインする冷媒の充填量の設定

ドロップインする冷媒の充填量を変化させたシミュレーションを実施した。Fig.2.2 に示すように、R410A を基準冷媒としたシステムの仕様条件から各物性の冷媒充填量と COP, 凝縮器出口過冷却度の関係が分かった。

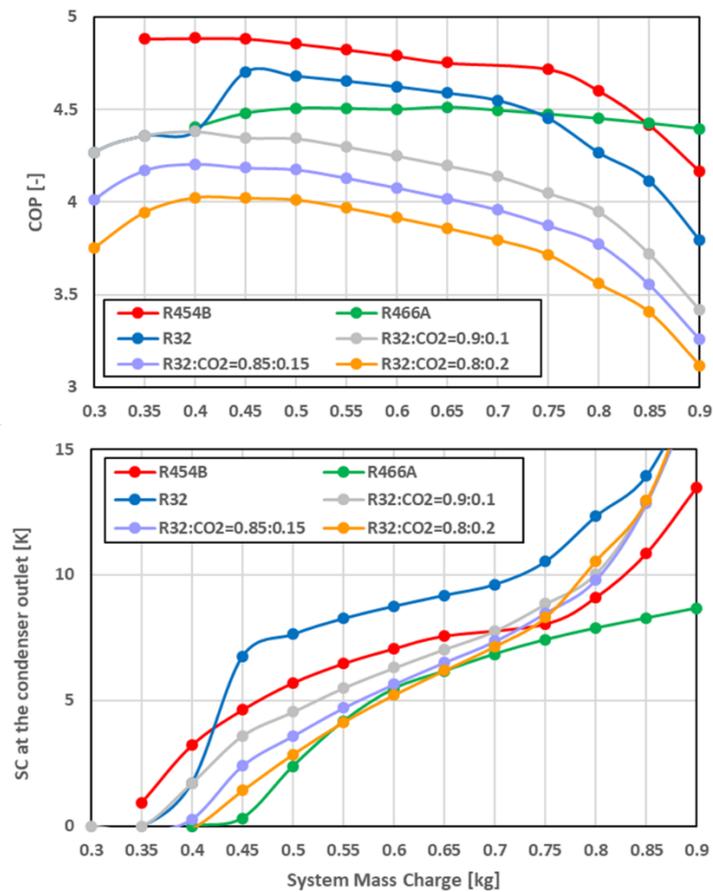


Fig. 2.2 冷媒充填量と COP, 凝縮器出口過冷却度の関係

それぞれの冷媒で最も COP が高くなる充填量をサイクルに封入する充填量として決定し、Fig. 2.3 に各冷媒の充填量を示す。

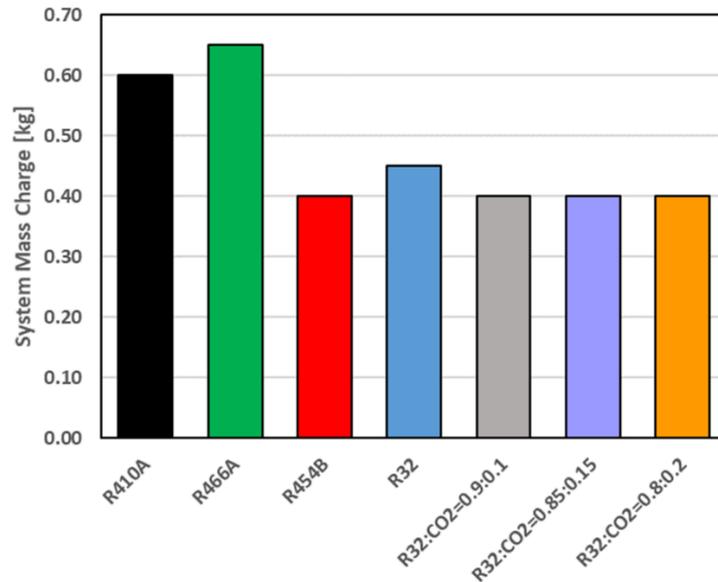


Fig. 2.3 各冷媒の充填量

### 2.3 冷媒の性能評価

#### (a)能力をパラメータとした場合の比較

冷房能力をパラメータとして変化させた場合の各冷媒の性能比較を行う。シミュレーションとしては、圧縮機回転数を変化させることで、冷房能力を変化させた。圧縮機回転数に対する COP,冷房能力の関係を Fig. 2.4 に、冷房能力に対する COP,圧力損失(蒸発器前後)の関係を Fig. 2.5 に示す。

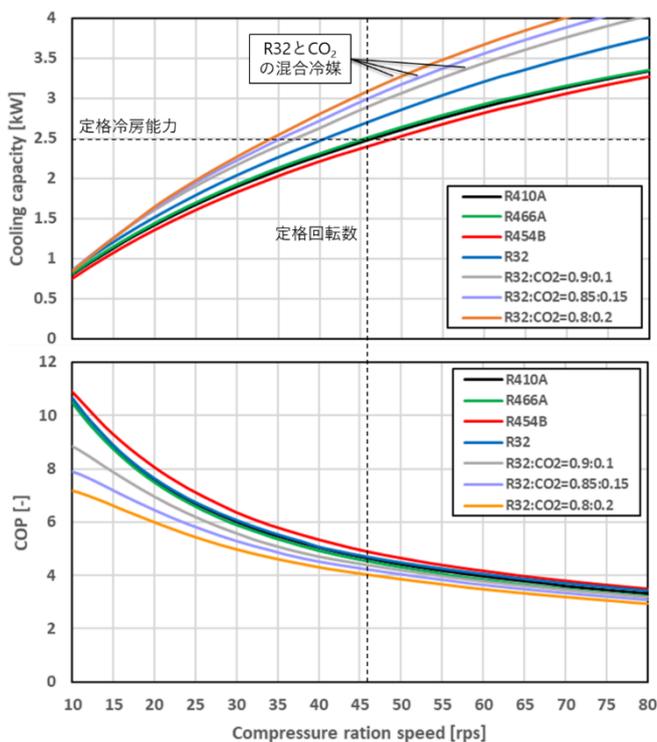


Fig. 2.4 圧縮機回転数と能力・COP の関係性

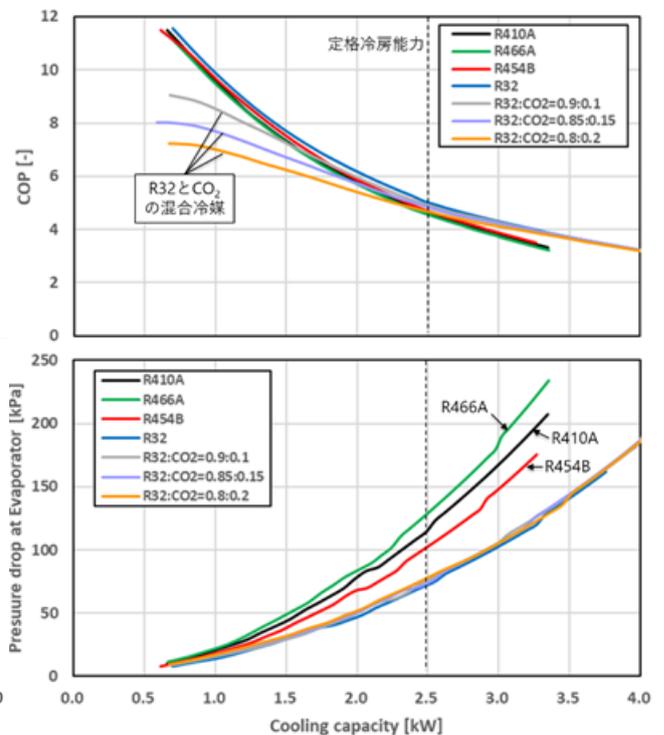


Fig. 2.5 冷房能力と COP, 圧力損失の関係

Fig. 2.4 の圧縮機回転数と能力・COP の関係に着目すると、R466A, R454B は圧縮機定格回転数に比較的近い回転数で、定格冷房能力を発揮できることがわかる。これに対し、R32 純冷媒と、R32 と CO<sub>2</sub> の混合冷媒は定格回転数より少ない回転数で定格冷房能力を確保でき、圧縮機の容積をより小さくできる可能性が示唆される。

次に、Fig. 2.5 の冷房能力と COP, 圧力損失の関係に着目する。同じ冷房能力で比較すると、定格付近では R32 と CO<sub>2</sub> の混合冷媒の COP は基準冷媒である R410A の COP より高くなっている。これに対し、冷房能力が低い領域では R32 と CO<sub>2</sub> の混合冷媒の COP は基準冷媒である R410A の COP より低くなっている。解析した範囲において、R32 純冷媒の COP は常に R410A の COP より高く、R466A と R454B の COP は R410A の COP に近い値になった。圧力損失に着目すると、解析した範囲において R466A の圧力損失は常に R410A の圧力損失より高く、それ以外の冷媒の圧力損失は R410 より小さくなった。なお、特に R32 と CO<sub>2</sub> の混合冷媒を用いたサイクルは R410A を用いたサイクルより高压側で作動する為、蒸発器前後の圧力損失の絶対値のみから圧力損失が COP に与える影響の大小を議論することは困難である。

#### (b) 定格冷房能力における比較

冷房能力が定格冷房能力 2.5[kW]になるように圧縮機回転数を制御した条件下で、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した。各冷媒の COP, 消費電力, 冷房能力を Fig. 2.6 に示す。ただし、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である。

結果より、定格冷房能力で比較した場合、R466A の COP は基準冷媒より 2%低下、R454B は 2%増加。R32 は 8%増加、R32/CO<sub>2</sub>=90/10mass%は 6%増加、R32/CO<sub>2</sub>=85/15mass%は 5%増加、R32/CO<sub>2</sub>=80/20mass%は 5%増加した。COP が低下する要因としては冷媒側の圧力損失、冷媒-空気間の伝熱損失、空気側の圧力損失等が考えられる。

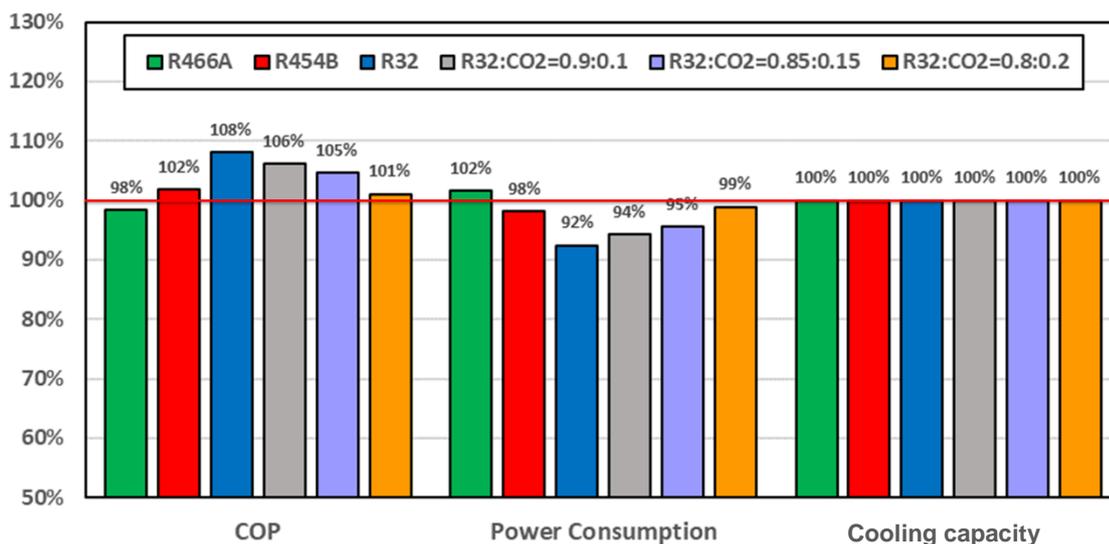


Fig. 2.6 定格冷房能力における性能の比較

#### (c) 部分負荷(定格冷房能力の 50%)における比較

Fig. 2.7 には、冷房能力が定格冷房能力の半分である 1.25[kW]になるように圧縮機回転数を制御した条件下で、各冷媒の COP, 冷房能力, 消費電力を示す。図に示したように、R466A と R454B の COP と冷房能力の関係は R410A に近い為、ここでは特に R32 純冷媒と、R32 と CO<sub>2</sub> の混合冷媒の比較に着目

する。ただし、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。

結果より、定格冷房能力で比較した場合、R32 の COP は基準冷媒より 4% 増加、R32/CO<sub>2</sub> = 90/10 mass% は 6% 低下、R32/CO<sub>2</sub> = 85/15 mass% は 14% 低下、R32/CO<sub>2</sub> = 80/20 mass% は 21% 低下した。R32 と CO<sub>2</sub> の混合冷媒は CO<sub>2</sub> の質量分率が増加するほど COP が低下する傾向があり、この原因は、潜熱  $\Delta h$  [kJ/kg]、冷媒密度  $\rho_R$  [kg/m<sup>3</sup>]、その積である体積能力  $Q_{vol}$  [kJ/m<sup>3</sup>] が蒸発器における圧力損失を支配していると考えられる。

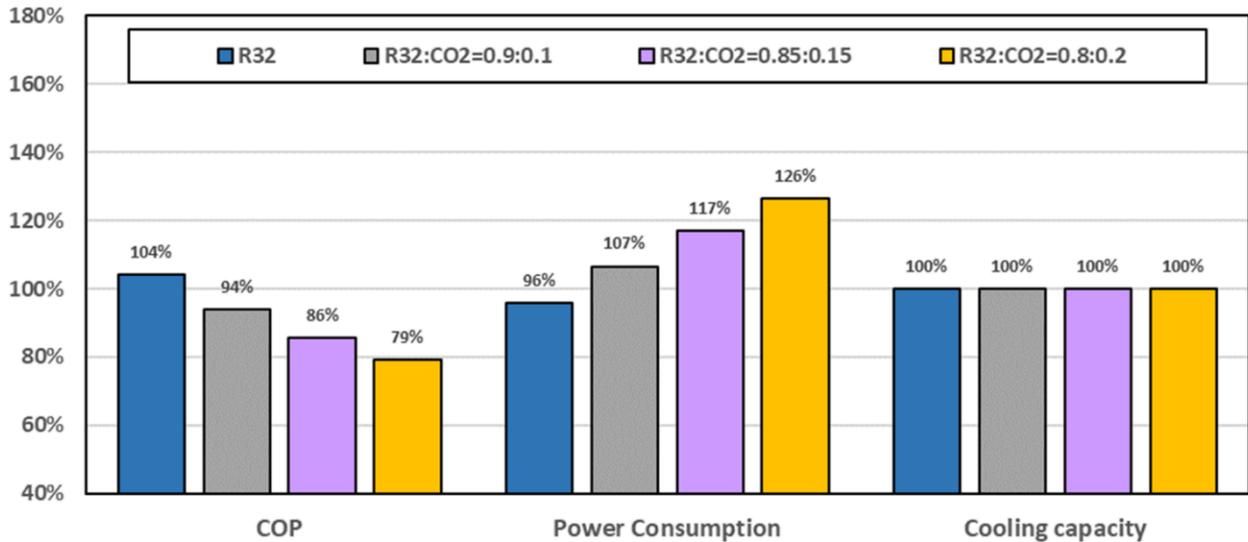


Fig. 2.7 部分負荷(定格冷房能力の 50%) における性能の比較

#### 2.4 性能評価のまとめ

以上のように、定格冷房能力で運転させた場合と定格冷房能力の 50% で運転した場合の 2 条件下で冷媒物性が性能に与える影響を把握した。基準冷媒である R410A と比較して、同じ冷房能力で比較した際の COP が  $\pm 2\%$  の値であった R466A と R454B の場合、R466A の圧縮機吸い込み密度は R410A より大きい、潜熱は R410A より小さい。R454B の圧縮機吸い込み密度は R410A より小さい、潜熱は R410A より大きい。また、R466A、R454B の温度グライドは 2°C 以下で小さい値である。結果として R466A、R454B と R410A の圧力損失は同程度になり、COP に大きな差が生じなかったと考えられる。

次に、解析した範囲において R410A よりも COP が高くなり、定格冷房能力では COP が 8% 大きくなった R32 の検討結果をまとめると、R32 は潜熱が基準冷媒より大きいため少量の冷媒循環量で定格冷房能力を発揮する事が可能であり、これにより冷媒圧力損失が小さくなり COP が基準冷媒より高くなったと考えられる。

最後に、R32 と CO<sub>2</sub> の混合冷媒の検討結果では、これらの混合冷媒は定格冷房能力で R410A より COP が高いが、負荷が下がるにつれて COP が R410A より小さくなり、この傾向は CO<sub>2</sub> の質量分率が高くなるほど顕著になった。これは、R32 に CO<sub>2</sub> を混合することで、以下の長所と短所が性能面に現れるためであると考えられる。

[長所] CO<sub>2</sub> の沸点が R410A や R32 より低い為、CO<sub>2</sub> の質量分率が増えるほどサイクルは高压側に移行し、冷媒密度が上昇するため圧力損失が生じにくくなる。

[短所] R32 と CO<sub>2</sub> の沸点が異なるため、CO<sub>2</sub> の質量分率が増えるほど温度グライドが大きくなる。同

じ冷房能力を確保する場合、温度グライドによる蒸発温度上昇を打ち消すため、多量の冷媒を流して圧力損失を増加させ、温度差を確保する必要がある、圧縮機動力が増して COP が低下する。

定格冷房能力付近では冷媒の種類に拠らず圧力損失が COP に与える影響が大きいため、長所と短所が相殺しあうことで混合冷媒の COP は R410A と同等もしくはそれ以上になったと考えられる。これに対し、部分負荷では冷媒の種類に拠らず圧力損失が COP に与える影響が小さくなるため、同じ冷房能力で比較した際に長所が発揮されにくく、CO<sub>2</sub>の質量分率が高いほど温度グライドの影響により COP が低下したと考えられる。

### 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）

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 研究院准教授）

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, Niccolo Giannetti, Seiichi Yamaguchi, Kiyoshi Saito, Katsuhiko Tanaka ,Hiroto Ogami, A cost effective and non-intrusive method for performance prediction of air conditioners under fouling and leakage effect, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Volume 42, 2020, Article 100856.
- (2) \*◎Falk Cudok , Niccolo ` Giannetti , Jos´e L. Corrales Ciganda , Jun Aoyama , P. Babu ,Alberto Coronasf, Tatsuo Fujii , Naoyuki Inoue , Kiyoshi Saito , Seiichi Yamaguchi , Felix Ziegler, Absorption heat transformer - state-of-the-art of industrial applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 141, 2020, Article 110757.
- (3) \*◎Niccolo GIANNETTI, Kiyoshi SAITO and Hiroaki YOSHIMURA, Formulation of steady-state void fraction through the principle of minimum entropy production, International Journal of Thermal Sciences, Vol.15, No.3, 2020, Pages JTST0025.
- (4) \* ◎Sholahudin, NiccoloGiannetti, SeiichiYamaguchi, KiyoshiSaito, Yoichi Miyaoka, Katsuhiko Tanaka, Hiroto Ogami, Experimental implementation of artificial neural network for cost effective and non-intrusive performance estimation of air conditioning systems, Applied Thermal Engineering, Volume 181, 25 November 2020, Article 115985.
- (5) \* ◎Niccolò Giannetti, Seiichi Yamaguchi, Kiyoshi Saito, Hiroaki Yoshimura, Semitheoretical formulation of annular flow void fraction using the principle of minimum entropy production, International Journal of Thermal Sciences, Volume 158, December 2020, Article 106522.

#### 4.2 発表（国際）（International conferences）

- (a) Hifni M. ARIYADI, Niccolò GIANNETTI, Jongsoo JEONG, Seiichi YAMAGUCHI, Kiyoshi SAITO, Changhoon LEE, Jungtae KIM, Seungbeom LEE, Jiyong LEE, and Kwangyeol JEONG, Flow Characteristics and Noise Diagnosis of Hydrogen Charging Solenoid Valve in Hydrogen-Fueled

Automobile, ECOS 2020, Jun.2020, Osaka, Japan.

- (b) Adriano MILAZZO, Niccolo GIANNETTI, Seiichi YAMAGUCHI, Kiyoshi SAITO, Thermodynamic investigation of asynchronous open inverse air cycle integrated with compressed air energy storage, GL2020, DEC. 2020, Tokyo, Japan.
- (c) Richard Jayson Varela, Seiichi Yamaguchi, Niccolo Giannetti, Kiyoshi Saito, Xin-Ming Wang, Hiroshi Nakayama, Experimental performance analysis and simulation of an internally cooled liquid desiccant air conditioning system using a novel ionic liquid, , GL2020, DEC. 2020, Tokyo, Japan.
- (d) Niccolo Giannetti, Luca Rametta, Ryota Fukui, Masayoshi Hirasawa, Noriyuki Nishiyama, Seiichi Yamaguchi, Kiyoshi Saito, Assessment of surfactant-induced Marangoni convection within high-temperature aqueous Lithium-Bromide solution, GL2020, DEC. 2020, Tokyo, Japan.
- (e) Yulianto Muhamad, Suzuki Takaoki, Miyaoka Yoichi, Ohno Keisuke, Giannetti Niccolo, Saito Kiyoshi, Yamaguchi Seiichi, Numerical Investigation of CO<sub>2</sub> Heat Pump Water Heater Performance, GL2020, DEC. 2020, Tokyo, Japan.
- (f) Hifni Mukhtar Ariyadi, Niccolo Giannetti, Jongsoo Jeong, Seiichi Yamaguchi, Kiyoshi Saito, Seungbeom Lee, Jiyoung Lee, Kwangyeol Jeong, Euidong Ro, Jaebeom An, Noise Diagnosis in Solenoid Valve inside Hydrogen Tank Solenoid System during Refuelling, 2020 JSAE Congress, Oct. 2020, Tokyo, Japan.

#### 4.3 発表（国内）（Domestic conferences）

- (1) 鄭 宗秀, 宮岡 洋一, 西山 教之, Giannetti Niccolo, 山口 誠一, 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3報:シミュレーター開発, 2020年度 日本冷凍空調学会年次大会, Sep. 9-11,Web 開催, 2020.
- (2) 宮岡 洋一, 西山 教之, ジャンネッティ ニコロ, 鄭 宗秀, 山口 誠一, 齋藤 潔, 榎木 光治, 井上 洋平, 清 雄一, 湊 明彦, 関口 通江, 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2報: 2019年度の取り組みと成果, 2020年度 日本冷凍空調学会年次大会, Sep. 9-11,Web 開催, 2020.
- (3) 和田 瑛里花 (早大), 齋藤 潔, 東條 健司, 井汲 米造, ジャンネッティ ニコロ, 低 GWP 冷媒の実用化に向けたシミュレーションによる圧縮機の性能評価第1報:漏れと熱伝達を考慮したスクロール圧縮機モデル, 2020年度 日本冷凍空調学会年次大会, Sep. 9-11,Web 開催, 2020.
- (4) 田中 裕樹 (早稲田大理工), Giannetti Niccolo, Jongsoo Joeng, 宮岡 洋一, 齋藤 潔, 法福 守 (日立ジョンソンコントロールズ空調(株)), 高藤 亮一, 平田 匠弥, マイクロチャンネル熱交換器の最適設計に関する研究, 2020年度 日本冷凍空調学会年次大会, Sep. 9-11,Web 開催, 2020.
- (5) 寺石 遼馬 (早大院), 赤坂 亮 (九産大), 粥川 洋平 (産総研), 西山 教之 (早大), 齋藤 潔 (早大), ECS モデルによる多様な冷媒の理論性能に関する予測精度の検討, 2020年度 日本冷凍空調学会年次大会, Sep. 9-11,Web 開催, 2020.
- (6) 鈴木 隆起 (早稲田大学), 丸山 拓飛 (早稲田大学), 備前 滉介 (早稲田大学), 宮岡 洋一 (早稲田大学), 齋藤 潔 (早稲田大学), 渡辺 忠男 (富士電機), 岩崎 高宏 (富士電機), 滝口 浩司 (富士電機), HFO 冷媒を用いた冷蔵ショーケースの性能評価,第1報:シミュレーションによる性能評価, 2020年度 日本冷凍空調学会年次大会, Sep. 9-11,Web 開催, 2020.
- (7) 山川 英士 (早大), 宇田川 陽介 (NTT ファシリティーズ), 二渡 直樹, 齋藤 潔 (早大), 宮岡 洋一, 西山 教之, Energy Flow+M による低 GWP 冷媒を用いたデータセンター用空調機の

検討, 2020 年度 日本冷凍空調学会年次大会, Sep. 9-11, Web 開催, 2020.

- (8) 荻原 拓視 (早大), 齋藤 潔 (早大基幹理工), 宮岡 洋一(早大基幹理工), 西山 教之 (早大基幹理工), EnergyFlow+M による低 GWP 冷媒をドロップイン冷媒とした R410A 用ルームエアコンの性能評価, 2020 年度 日本冷凍空調学会年次大会, Sep. 9-11, Web 開催, 2020.
- (9) 松井 隼 (早稲田大学), 宮岡 洋一 (早稲田大学), 齋藤 潔 (早稲田大学), 山口 誠一 (早稲田大学), 蒸気圧縮式ヒートポンプの非定常特性の解明と制御検討, 第 1 報: 部分負荷時における非定常特性, 2020 年度 日本冷凍空調学会年次大会, Sep. 9-11, Web 開催, 2020.
- (10) 市川 暁広(早稲田大学院), 鈴木 隆起 (早稲田大学院), 鄭 宗秀(早稲田大学), 宮岡 洋一(早稲田大学), 齋藤 潔(早稲田大学), 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 2 報: 「産業用ヒートポンプ単体シミュレーター」の開発, 2020 年度 日本冷凍空調学会年次大会, Sep. 9-11, Web 開催, 2020.

## 5. 研究活動の課題と展望

今年度は, A2L 冷媒の中で低 GWP となる冷媒のさらなる拡張(R32, R454B, R32+CO<sub>2</sub>)と妥当性のある伝熱モデルの構築を行い, 解析により空調システムの性能と運転特性を明らかにできた. 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, 比定常状態を考慮した断続運転における低 GWP 冷媒の能力評価を行う. これにより, 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.