

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

パリ協定を受け、エアコン、ショーケース等の中小型規模の冷凍空調機器へ導入される冷媒の低 GWP 化へ向けた研究開発が本格化している。このような次世代冷媒としては、プロパン等の HC 系冷媒、HFO 系冷媒やそれらの混合冷媒も含めた多様な冷媒が候補となっているが、可燃性や毒性を有する場合が多いため、安全性、リスク評価が進められ、成果も上がりつつある。

一方で、次世代冷媒を導入する場合には、安全性や GWP だけでなく機器としての実運転性能が評価すべき最重要因子の一つであることは誰もが認識しているところであろう。当然、それによってエネルギー起源の CO₂ 排出による地球温暖化影響が決定されるためである。しかし、現状では、機器性能については、十分な評価が行われないうまま、冷媒の選定が進められているのが実情である。

この理由としては、運転される温度帯や機能、運転方法が大きく異なる多様な機種を短期間で開発することが求められることから、新たな冷媒向けのプロトタイプ機器を開発し、性能を逐次評価するような手間がかかる手法を採用することはほぼ不可能なためである。現状では、従来の HFC 系冷媒向けに開発された機器に新たな冷媒をドロップインして機器性能を評価したり、現実とは大きく異なる理想サイクルとしての性能で実機性能を推定したりするような手法がとられている。このようなやり方では、都合よく機器性能を評価できてしまうため、冷媒メーカー、機器メーカー等の思惑が入り乱れ、冷媒の選定がミスリードされる可能性を十分に有する。

このため、工業界や学术界で公平・公正に共有できる実用機レベルまでの性能評価手法や性能評価ツールの開発、これに基づいた冷媒評価の実施が強く望まれていた。

そこで、本研究開発では、低 GWP 冷媒を導入した中小型規模の冷凍空調機器の性能を実用機レベルにおいてまで評価できる手法を確立することを目指す。そして、工業界や学术界でも広く標準ツールとして活用が可能な共通解析プラットフォームとしてのシミュレーションツールとして展開する。

本研究では上記の観点から、次世代冷媒を導入する場合には、安全性や GWP だけでなく、機器の実運転性能が評価すべき最重要因子の一つである。それは、機器の実運転性能によってエネルギー起源の CO₂ 排出による地球温暖化影響が決定されるからである。このため、工業界や学术界で公平・公正に共有できる実用機レベルまでの性能評価手法や性能評価ツールの開発、これに基づいた冷媒評価の実施が強く望まれている。そこで、本研究開発では、低 GWP 冷媒を導入した中小型規模の冷凍空調機器の性能を実用機レベルにおいてまで評価できる手法を確立し、工業界や学术界でも広く標準ツールとして活用が可能な共通解析プラットフォームとしてのシミュレーションツールとして展開することを目指している。

上記目的を達成するために、2018 年度より「性能解析技術研究開発」、「性能評価技術研究開発」、「空調機用シミュレーターの開発」「産業用ヒートポンプシミュレーターの開発」の 4 項目の研究開発を実施している。次世代ヒートポンプ技術に関する研究全体の目的は、次世代冷媒を導入した機器性能を理論と試験の両方から高精度に評価できる技術を開発することである。

2. 主な研究成果

2.1 性能解析技術研究開発

(1) ボイド率評価

静電容量法による冷媒用ボイド率測定センサーの開発及び測定方法の確立を行った。ここでは、非対称電極を持つ静電容量センサーをマクロ及びマイクロサイズの管内の冷媒にも対応可能な高精度ボイド率測定手法を開発した。そして開発した冷媒充填量評価装置を使って、低 GWP 冷媒の主要構成冷媒である R32 と代表的な低 GWP 冷媒である R454C のボイド率の測定を行った。また、最近大多数の冷凍システムに適用される熱交換器は溝付き管を適用して開発されていることから、溝付き管を考慮した冷媒充電量予測とそのためボイド率測定も行った。これにより、低 GWP 冷媒の特性を考慮した新たなボイド率相関式を樹立した。主な成果は、以下のとおり。

- ・流動様式の漸進的な変化を考慮した静電容量法によるボイド率測定センサーの確立
- ・R32 及び R454C のボイド率の測定
- ・低 GWP 冷媒の特性を考慮した新しいボイド率相関式の樹立
- ・数値モデルによる冷媒充填量予測及びボイド率相関式の評価

(2) 圧縮機

スクロール圧縮機とロータリ圧縮機を対象に、シミュレーションモデルを構築し、R410A 冷媒の家庭用エアコンを対象に、3 種類の冷媒 (R410A, R32, R466A) を用いて圧縮機シミュレーションと性能試験およびサイクルシミュレーションを行った。Fig.1, Fig.2 に、スクロール圧縮機およびロータリ圧縮機について、3 種類の冷媒を用いたサイクルシミュレーションによる COP の評価結果をそれぞれ示す。

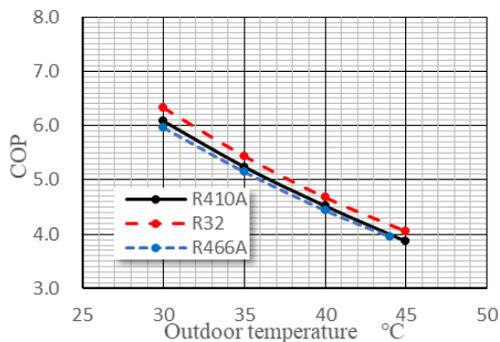


Fig. 1 Cycle COP (scroll comp.)

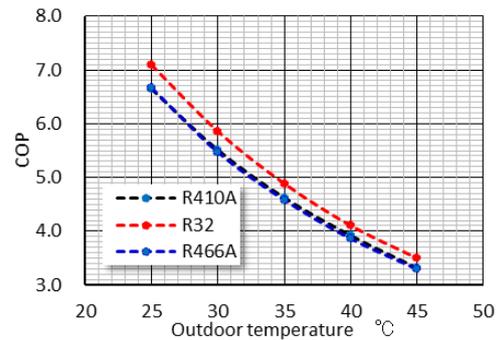


Fig.2 Cycle COP (rotary comp.)

(3) 膨張弁

冷媒として R32 を用いた場合の家庭用エアコンの膨張弁を対象に、その膨張弁の特性に影響を与えるパラメータと膨張弁の特性を表す重要な指標である流量係数の相関関係を明らかにし、分析することで流量係数の相関式作成を行った。さらに実験相関式を作成し、実験値との相対誤差は最大 5%以内程度であったため、実験結果をよく再現できることを確認した。これにより、膨張弁を構成要素に含むシステムの性能予測、挙動解析などに供しうる、流量係数の実験相関式が作成できた。式(1)に作成した相関式を示す。

$$c_d = a_z \left(\frac{z - z_0}{z_{fo} - z_0} \right)^2 + a_{\Delta P} \left(\frac{\Delta P}{P_c} \right) + a_{P_i} \left(\frac{P_i}{P_c} \right) + a_{T_{sc}} \left(\frac{T_{sc}}{T_c} \right) + a_{\dot{m}} \left(\frac{\dot{m}}{\dot{m}_{max}} \right) + a_0 \quad (1)$$

2.2 性能評価技術研究開発

(1) 数理的性能評価手法開発

次世代冷媒の性能評価を目的として、熱交換器回路の進化的最適化に基づく評価手法を提案した。フィン付き管式熱交換器を対象としたシミュレーションでは、冷媒回路の双方向の数学的表現（管・管隣接行列）と、進化的探索の際に回路の一貫性と実現性を確保するための関連する制約条件の定式化を行った。また、熱交換器の解析において最適配置の効率的な進化的探索のために、新しい最適化アルゴリズムである「遺伝的熱経路生成法」を開発した。そして、この技術は、物理的に実現可能である限り、分割・合流ノードの数や位置に制約のない複雑な回路への遺伝的演算子の実装を扱うことができ、それゆえ、従来の最適化研究の探索空間を拡大し最適化することが可能となる。

(2) 性能評価装置開発（エミュレーター式負荷試験装置によるラウンドロビンテスト）

第三者機関である2社の試験装置において、エミュレーターのソフトウェアを本学から各社に提供し、本学と各社にてエミュレーターを用いたラウンドロビンテストを実施した。A社の室内機室は本学とほぼ同様の大きさであるがB社は4~5倍の大きさである。試験には2022年度に新しく購入したR32冷媒のパッケージエアコン4馬力機を用いた。その結果、いずれの試験条件においても本学と各社の差異は5%以下になり、「エミュレーター式負荷試験装置」は異なる試験室においても同一の機器であれば、同一の動的性能が得られることが証明できた。Table 1に試験結果を示す。

Table 1 Reproducibility verification of tests

Outdoor temp (°C)	PLR (%)	Room Volume (m ³)	COP			Deviation (%)	
			① Waseda	② CompanyA	③ CompanyB	① : ②	① : ③
29	25	75	5.37	5.22	5.23	2.79	2.61
		147	5.34	5.57	5.39	4.31	0.94
		147	6.24	6.10	6.04	2.24	3.21

2.3 空調機用シミュレーターの活用

(1) 熱交換器シミュレーター

空調用途の36個の配管数を持つ蒸発器の最適化回路に対し、代表的なR32, R410A, R454Cの3種類の冷媒を用いた場合の性能を評価した。所定の空調機能力（出力容量）と空気出口温度において、R454Cのような非共沸混合冷媒では、より大きなCOP向上（最大7.26%）が達成され、空気温度変化と温度グラインドを適切にマッチングさせることで、必要な圧縮比をさらに低減できる可能性があることが分かった。また、熱交換器の冷媒回路を冷媒ごとに最適化した解析では、R454CがR410Aより高性能化が可能になり、R32と同等の高いCOPが達成する可能性があることが示唆された。Fig. 2に結果を示す。

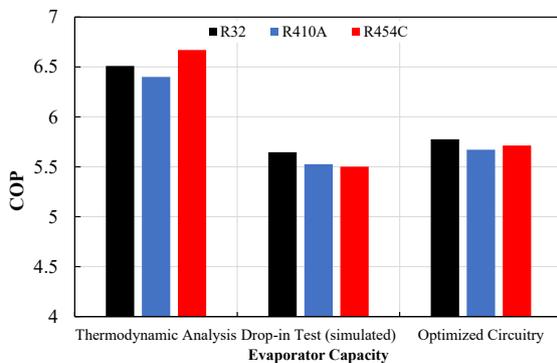


Fig. 2 Results from different refrigerant assessment methods at 4 kW capacity

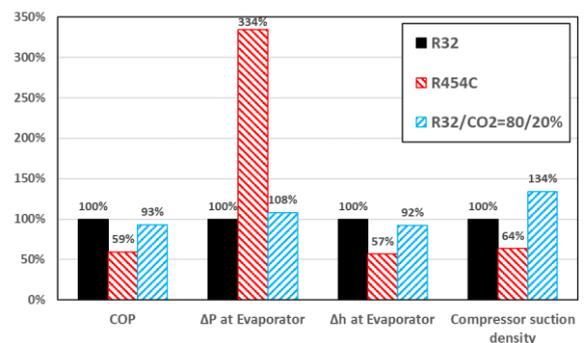


Fig. 3 Comparison of performance (2.5kW, 100% of rated cooling capacity)

(2) 空調機用システムシミュレーターによる解析（定常解析）

冷房能力を同一に運転させた場合の条件下で冷媒物性が性能に与える影響を把握した。冷媒の物性のうち、①冷媒密度(ガス密度)、②潜熱、③温度グライドの3つがドロップイン時の性能に大きな影響を与えることがわかった。

冷房能力を同一に運転した場合の R454C と R32 の比較では、R454C は R32 より COP が低く、蒸発器における圧力損失が大きくなった。定格冷房能力基準で R454C の COP は R32 より 41%低下した。

Fig. 3 に計算結果の一例を示す。

2.4 産業用ヒートポンプシミュレーターの開発

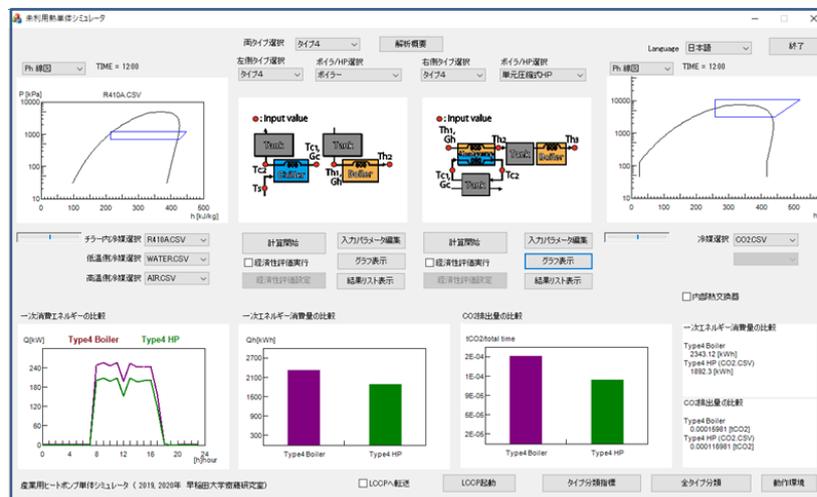
工場などにヒートポンプを導入するにあたって、設置費用、ランニングコスト、導入するヒートポンプシステムの構造などを、事前に検討する必要がある。そのため、実際のシステムには高効率性、経済性などを定量的に明らかにしてから導入するのが好ましい。しかし、既存のシステムを実際に用いてヒートポンプの導入効果を検証することは費用や実証期間から考えて極めて困難である。そのため、導入効果を定量的に評価するには、シミュレーションによる解析が有効である。そこで、簡単な入力でヒートポンプ単体の導入効果が計算できる「産業用ヒートポンプ単体シミュレーター」と、ヒートポンプだけでなく工場全体の熱システムが詳細に検討できる「産業用エネルギー統合シミュレーター」の2つを開発した。以下に研究成果を簡潔にまとめる。

(1) 産業用ヒートポンプ単体シミュレーターの構築

- ・ 実際の工場の年間実測データを用いて解析モデルの妥当性を確認した
- ・ 複数の導入事例分析を行い、ヒートポンプ導入効果を定量的に示した
- ・ 他のシミュレーターにはない特徴である「冷媒変更時の評価検討」を行った

Fig. 4 に産業用ヒートポンプ単体シミュレーターの画面の例を示す。

Fig. 4 Screen example of industrial heat pump unit simulator



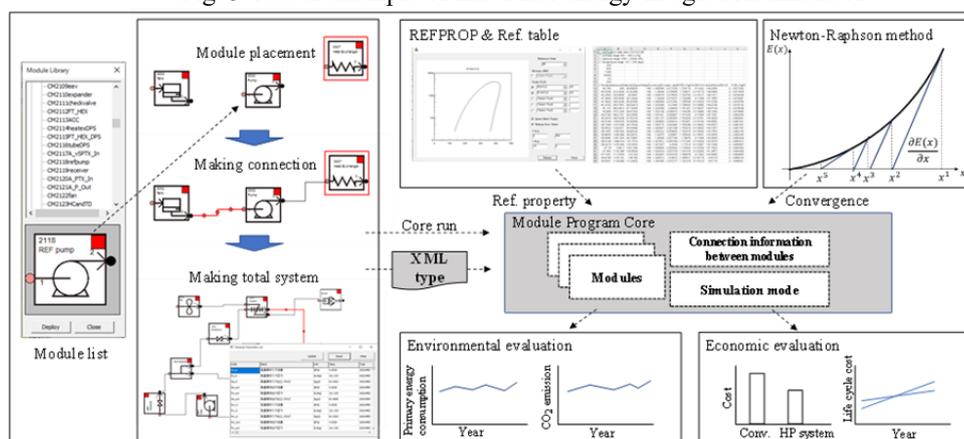
(2) 産業用ヒートポンプ統合シミュレーターの構築

- ・ 導入事例を調査し、モジュールを構築し、GUIを搭載した。
- ・ 導入効果をコスト面から検討するための経済性評価の計算ロジックを構築した。
- ・ 工場での実測データを用いて精度検証を行い、妥当性を確認した。
- ・ 導入事例を対象に、統合シミュレーターを用いて、それぞれの事例に対し省エネルギー性、環境性。経済性の3つの評価を行った。
- ・ システム稼働率を変化させた場合のライフサイクルコストの推移を分析した。

- ・ ヒートポンプの冷媒を従来冷媒（高 GWP 冷媒）から、低 GWP 冷媒へ変更した場合の環境性評価として LCCP を計算し、評価を行った。

Fig. 5 に産業用エネルギー統合シミュレーターの画面の例を示す。

Fig. 5 Screen example of Industrial energy integration simulator



2.5 まとめ

本研究では、工業界や学术界で公平・公正に共有できる実用機レベルまでの性能評価手法や性能評価ツールの開発を目指し、「性能解析技術研究開発」、「性能評価技術研究開発」、「空調機用シミュレーターの開発」「産業用ヒートポンプシミュレーターの開発」の4項目の研究開発を実施した。その結果、低 GWP 冷媒を導入した中小型規模の冷凍空調機器の性能を実用機レベルにおいて、高精度で評価できる性能評価装置を構築すると共に、工業界や学术界でも広く標準ツールとして活用が可能な共通解析プラットフォームとしての、シミュレーションツールを開発した。

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）

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）

榎木 光治（SEES 客員准教授）

4. 研究業績

4.1 学術論文

a) J.C.S. Garcia, N. Giannetti, D.A. Varela, R.J. Varela, S. Yamaguchi, K. Saito, M.S. Berana, Design of a Numerical Simulator for Finned-Tube Heat Exchangers with Arbitrary Circuitry, Heat Transfer Engineering, Volume 43, Issue 19, Pages 1675 – 1693, Jan.2022

b) Yuichi Sei, Koji Enoki, Seiichi Yamaguchi, Kiyoshi Saito, Prediction of Boiling Heat Transfer Coefficients for Mini-Channels, Multiphase Science and Technology, Vol.34, No.2, pp.43-65, Feb.2022

c) Moojoong KIM, Kanta, Komeda, Jongsoo Jeong, Mizuki Oinuma, Tetsuya SATO, Kiyoshi SAITO, Optimizing Calibration for a Capacitance-Based Void Fraction Sensor with Asymmetric Electrodes under Horizontal Flow in a Smoothed Circular Macro-Tube, Sensors, May 2022, 22(9), 3511

- d) ジャンネッティ ニコロ・ガルシア ジョン カルロ・ヴァレラ リチャード ジェイソン・清 雄一・榎木 光治・鄭 宗 秀・齋藤 潔, 遺伝的冷媒流路生成アルゴリズムを用いた熱交換器の最適化に関する研究, 日本冷凍空調学会論文集 Trans. of the JSRAE Vol.39, No.3 (2022), pp.223-239
- e) N. Giannetti, S. Matsui, R. Mori, J. Jeong, H. Mukhtar Ariyadi, Y. Miyaoka, E. Togashi, K. Saito, Emulator-type load-based tests for dynamic performance characterization of air conditioners, Energy and Buildings, Volume 273, no. 112411
- f) 宮岡 洋一・森 稜平・ジャンネッティ ニコロ・鄭 宗 秀・富樫 英介・齋藤 潔, エミュレーター式負荷試験装置によるエアコンディショナの動的試験, 日本冷凍空調学会論文集 Vol.40, No.1 (3月31日発行号) 論文 22-17_OA
- g) 湊明彦, 山口誠一, 榎木光治, 齋藤潔, 膨張弁狭隘流路の流量評価法, 混相流, In Press
- h) Moojoong KIM, Jongsoo JEONG, Tetsuya SATO, Kiyoshi SAITO, Experimental investigation of void fraction of R32 refrigerant in horizontal flow configuration using capacitance-based and quick-closing valve-based methods, Applied Thermal Engineering, Available online 4 April 2023, 120497

4.2 受賞・表彰

5 件

受賞名	タイトル	受賞者
令和 4 年度科学技術分野 科学技術賞 (研究部門) 文部科学大臣表彰	回路論的視点に基づく熱システム の統一解析論に関する研究	齋藤 潔
日本冷凍空調学会 優秀講演賞	ルームエアコンの起動運転時にお ける運転制御の検討	石坂 成基
日本冷凍空調学会 会長奨励賞	分子振動解析を用いた R32 および R1123 の理想. 気体比熱推算.	坂庭 駿
空気調和・衛生工学会 優秀講演奨励賞	エミュレーター式性能評価装置を 用いた空調機の動的性能評価	森 稜平
日本冷凍空調学会 学術賞	遺伝的冷媒流路生成アルゴリズム を用いた熱交換器の最適化に関す る研究	ジャンネッティ ニコロ・ガルシア ジョン カルロ・ヴァレラ リチャ ード ジェイソン・清 雄一・榎木 光治・鄭 宗 秀・齋藤 潔

5. 研究活動の課題と展望

2022 年度までの研究は、熱交換器をはじめとしたデバイスやサイクルシミュレーション技術、さらには機器システムのサイクル性能評価技術の開発を進めてきた。ここで、これまでの研究では、実際の機器の製造過程における様々な制約条件については加味していない。

そこで2023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し、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ための研究を開始する。このシミュレーション技術には AI を導入し、次世代冷媒ごとに冷凍サイクルを最適化した上で、実際に製造可能な機器における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上市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。