

平成30年5月4日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06689

研究課題名（和文）1D・3D解析の融合による多機能CO₂ヒートポンプ給湯システムの性能分析・最適化研究課題名（英文）Performance Analysis and Optimization of a Multi-Functional CO₂ Heat Pump Water Heating System by Integrating 1D and 3D Analyses

研究代表者

横山 良平（YOKOYAMA, Ryohei）

大阪府立大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：70158385

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,800,000円

研究成果の概要（和文）：低炭素社会構築に向けて最も重要な技術の一つとして考えられているCO₂ヒートポンプ給湯システムについて、これまでに実施してきた研究をさらに発展させ、給湯に加えて貯湯槽内の温水流動が複雑になる保温の機能を有する場合に、一次元（1D）数値解析と三次元（3D）実験解析の融合によって多機能システムの性能分析のための数値解析法を構築した。また、この手法を適用して、各種条件下で性能分析を行うとともに、運転条件の最適化を行った。

研究成果の概要（英文）：CO₂ heat pump water heating systems were developed as one of the most important technologies toward low-carbon society. In this research, a method of analyzing the performance of a multi-functional CO₂ heat pump water heating system has been established by integrating one-dimensional numerical analysis and three-dimensional experimental analysis. In addition, the performance analysis has been conducted under several conditions and operation conditions have been determined optimally by applying this method.

研究分野：エネルギーシステム工学

キーワード：ヒートポンプ 冷媒 二酸化炭素 給湯 貯湯 システム性能 予測 最適化

1. 研究開始当初の背景

我が国のエネルギー消費量はこの 20 年間に大幅に増大し、それに伴って CO₂ 排出量も大幅に増大した。これには、全エネルギー消費量の約 1/4 を占める民生用エネルギー消費量の増大が、また民生用エネルギー消費量の約 1/2 を占める家庭用エネルギー消費量の増大が大きな影響を及ぼしている。さらに、家庭用エネルギー消費量のうち給湯用エネルギー消費量が大きく、約 1/3 を占めている。したがって、家庭の給湯用機器のエネルギー変換の効率化による省エネルギー化は、エネルギー消費量および CO₂ 排出量の削減にとって極めて重要な課題である。

このような状況の下で、冷媒として自然冷媒の CO₂ を使用した CO₂ ヒートポンプが開発・商品化され、特に家庭の給湯用機器として導入が進んでいる。CO₂ ヒートポンプは、エネルギー変換の効率化による省エネルギー化、ならびに冷媒として地球温暖化係数が小さい自然冷媒の CO₂ の使用によって、新しい高効率かつ低環境負荷の技術として注目され、低炭素社会構築に向けて長期的にさらなる発展が望まれる重要な技術の一つとして位置付けられている。

このように、CO₂ ヒートポンプに関しては、上記の広範な普及を目標として性能向上に向けて様々な要素技術の開発が行われているが、後述するように、性能向上には本研究で課題として取り上げるシステム技術も必要不可欠である。

CO₂ ヒートポンプに関する性能分析については、ノルウェーの Norwegian University of Science and Technology および SINTEF Energy Research のグループ、ならびに我が国の電力中央研究所のグループを中心として、これまで理論および実験的に研究が行われてきたが、それらは CO₂ ヒートポンプ単体を対象としたものである。

しかしながら、CO₂ ヒートポンプが給湯システムに適用される場合には、その性能は給湯利用まで含めて総合的に分析する必要がある。家庭用 CO₂ ヒートポンプ給湯システムでは、基本的に CO₂ ヒートポンプは貯湯槽とともに用いられるため、気温や給水温度の時間変化だけでなく、給湯需要量の時間変化、貯湯槽の温度分布の時間変化、それに伴う CO₂ ヒートポンプへの入水温度の時間変化、および CO₂ ヒートポンプの運転・制御などを考慮しながら、性能分析を行う必要がある。

研究代表者らは、上述のような社会的・学術的背景に着目し、最近 12 年間に CO₂ ヒートポンプおよび貯湯槽から構成される給湯システム全体について、一般の給湯機能のみを有する最も基本的なシステムを対象に、貯湯槽内の温水が温度成層を保持するという仮定の下に、貯湯槽の一次元 (1D) モデルに基づき、ビルディングブロックによるモデル化法と非線形連立混合微分代数方程式の数

値解析法を構築し、性能分析を行ってきた。これらの研究成果に基づき、現時点では長時間を要するラボおよびフィールド実験の代替として数値解析によって性能分析を容易に行えるようになっている。

しかしながら、この数値解析法は、上述のように貯湯槽内の温水が温度成層を保持する場合のみについて、基本的な性能分析を行うためのものである。一方、現実に多用されている給湯および保温機能を有する多機能システムにおいては、熱交換された温水が貯湯槽に戻り、水の密度の温度依存性により貯湯槽内で温水の対流が生じ、それが原因で温度成層が崩れる。このような場合には、構築してきた数値解析法は本質的に適用不可能であり、方法を拡張する必要がある。

2. 研究の目的

上述のような背景から、本研究では、これまでに実施してきた CO₂ ヒートポンプ給湯システムの性能分析に関する基礎的研究をさらに発展させ、給湯および保温機能を有する多機能システムの性能分析のための数値解析法を構築し、各種条件下で性能分析を行うとともに、運転条件の最適化を行うことを目的とした。これを達成するために、まず貯湯槽のみを対象に、温水の流入に伴う貯湯槽内の温水流動の三次元 (3D) 的な挙動を把握するために、各種の実験解析を実施する。次に、その結果から得られた温水の流動特性に基づき、貯湯槽の温度分布を 1D 的に表現するためのモデルを構築する。最後に、そのモデルを給湯システムのモデルに組み込み、給湯システムの性能分析および最適化を行う。その結果として、多機能 CO₂ ヒートポンプ給湯システムについて、1D 数値解析と 3D 実験解析の融合によって性能分析および最適化を行う方法を確立し、エネルギー変換の効率化による省エネルギー化に貢献することを目標とした。具体的な研究目的を簡潔に以下に示す。

(1) 貯湯槽の温水流動実験およびモデル構築： 温水の流入の位置を様々に変更できるような貯湯槽温水流動実験装置を作製し、各種実験解析を行う。これによって、貯湯槽内の温水流動の 3D 的な挙動および温度分布の経時変化を分析する。例えば、保温のための貯湯槽への戻り温水の温度、流量、および位置が、貯湯槽内の温水流動および温度分布に及ぼす影響について分析する。また、実験解析結果に基づき、部分的な完全混合モデルあるいはそれを拡張したモデルなどを適用して、貯湯槽の温度分布を 1D 的に表現するためのモデルを構築する。さらに、貯湯槽のみについて数値解析を実施し、数値解析と実験解析の結果を比較し、モデルの妥当性について検討する。

(2) システムのモデル構築および数値解析： 以前に構築した CO₂ ヒートポンプのモデル、

新たに構築する貯湯槽のモデル，ならびに並行して新たに構築する熱交換器および浴槽などのモデルから構成される給湯システムのモデルを構築する．また，給湯需要量が日変化しない条件下ならびに日変化する条件下で，数値解析を行い，各種システム性能値を評価する．さらに，単一機能システムと多機能システムを比較し，多機能化に伴うシステム性能値の変化を把握する．

(3) システムの性能向上・最適化のための数値解析： システムの性能向上を図る方策として，設計面から中温水取出しを，運用面から運転条件の最適化を取り上げ，それらをシステムのモデルに組込んで，数値解析を行い，各種システム性能値を評価する．また，方策無しと有りのシステムを比較し，方策の導入に伴うシステム性能値の向上を明らかにする．

3. 研究の方法

上述の具体的な研究目的に対して，実施した研究の方法について述べる．

(1) 貯湯槽温水流動実験： まず，円筒型貯湯槽の上下面に加えて側面にも複数箇所に温水の流出入口を設置し，温水流入口の位置を変更できるような貯湯槽温水流動実験装置を作製する．次に，保温機能に対応して貯湯槽への戻り温水を想定し，温水の流入に伴う貯湯槽内の温水流動の 3D 的な挙動および温度分布の経時変化を分析する．また，性能向上のための方策としての中温水取出しによって，貯湯槽側面から温水の流出がある場合にも，同様の実験を行い，温水流動および温度分布の経時変化を分析する．

(2) 貯湯槽モデルの構築および試行数値解析： まず，貯湯槽温水流動実験によって得られた温度分布の経時変化に基づき，貯湯槽温度分布の 1D モデルを構築する．特に，保温機能に対応して貯湯槽への戻り温水がある場合には，流入温水が低流速の場合，貯湯槽温度分布は基本的に流入温水の温度と位置によって決定されるものと推定しており，それに基づいて部分的に完全混合を仮定したモデルを採用する．次に，上記のようにモデル化した貯湯槽のみを対象に試行数値解析を実施し，温度分布の時間変化を算出し，実験結果が再現できることを確認する．

(3) システムのモデル構築および試行数値解析： 貯湯槽の温水流動実験およびモデル構築と並行して，システムのモデル構築を実施する．まず，これまでに構築した CO₂ ヒートポンプのモデルに加えて，熱交換器，浴槽，および多機能化に伴う温水分岐・合流のモデルを構築する．次に，上記のモデルおよび従来の貯湯槽のモデルをシステムのモデルに組み込み，温度成層が崩れない条件下で試行数値解析を行い，結果の妥当性を確認する．また，新しい貯湯槽のモデルを構築後に，システムのモデルに組み込み，温度成層が崩れる条

件下で試行数値解析を行い，結果の妥当性を確認する．

(4) 日変化無し給湯需要量の条件下における性能分析： 給湯システムの基本性能特性として，日本工業規格に従って，特定の一日の給湯需要量を設定し，それが毎日繰返し発生するものと仮定し，周期的定常状態に達するまで数値解析を行い，その結果からヒートポンプ COP，貯湯槽効率，システム効率，貯湯量，および残湯量などのシステム性能値を評価する．また，単一機能システムと多機能システムを比較し，多機能化に伴うシステム性能値の変化を明らかにする．

(5) 日変化有り給湯需要量の条件下における性能分析： 給湯システムの日変化性能特性として，修正 M1 モードと呼ばれる日変化を考慮した一箇月の模擬給湯需要量を設定し，数値解析を行い，その結果から上記のシステム性能値の日変化を評価する．また，同様に多機能化に伴うシステム性能値の変化を明らかにする．

(6) 運転条件最適化による性能分析： ヒートポンプ運転条件としての出湯温度および沸き上げ終了時入水温度はシステム性能に大きな影響を及ぼし，給湯需要量の日変化に対して適切に設定する必要がある．これまでに構築してきたニューラルネットワークによる性能推定および最適化による運転条件決定の手法を適用し，上記の温度の日々適切な設定がシステム性能の向上に及ぼす影響を明らかにする．

(7) 中温水取出しシステムの性能分析： 多機能化によって貯湯槽への温水の戻りが生じる場合には，システム性能の低下の原因となる温度中間層が増大すると考えられる．そこで，温度中間層を減少させるための方策の一つとして中温水取出しシステムを対象とし，数値解析によって性能分析を行い，中温水取出しがシステム性能の向上に及ぼす影響を明らかにする．

(8) 実測データに基づく検討： CO₂ ヒートポンプ給湯システムの研究に関連して，最近 10 年間に民間企業より CO₂ ヒートポンプ給湯システムの実測データの提供を受けている．本研究の期間中も民間企業との協力関係を継続することができれば，実測給湯需要量を用いて数値解析によって性能分析を行い，実測システム性能値と比較する．

4. 研究成果

上述の研究の方法に対応して，得られた主要な研究成果について述べる．

(1) 貯湯槽温水流動実験： まず，体積において実スケールの約 1/3 規模の亚克力樹脂製の円筒型貯湯槽を作製し，上下面に加えて側面にも温水の流出入口を設置し，研究の目的および方法に合致する実験が行えるようにした．次に，保温機能に対応して貯湯槽への戻り温水を想定し，貯湯槽内の低温水中

に高温水が流入する場合、および貯湯槽内の高温水中に低温水が流入する場合の2通りについて実験を行い、貯湯槽内の温度分布を計測し、その結果に基づいて温水流動の3D的な挙動を推定することができ、また両実験結果の相違を定性的に説明することができた。また、性能向上のための中温水取出しを想定し、貯湯槽側面のみから温水が流出する場合、および貯湯槽上面および側面から温水が流出する場合の2通りについて実験を行い、貯湯槽内の温度分布を計測し、その結果に基づいて温水流動の3D的な挙動を推定することができ、また両実験結果の相違を定性的に説明することができた。

(2) 貯湯槽モデルの構築および試行数値解析： 保温機能に対応して貯湯槽への戻り温水がある場合には、貯湯槽温水流動実験によって得られた温度分布の経時変化に基づき、部分的完全混合の仮定によって貯湯槽温度分布の1Dモデルを構築した。ここでは、部分的完全混合が逐次瞬時に生じるものと仮定し、非線形連立混合微分代数方程式を数值的に解くための各時間ステップの計算後に、貯湯槽温度分布を変更するという新たな数値解法を採用した。また、モデル化した貯湯槽のみを対象に試行数値解析を実施し、温度分布の時間変化を算出し、実験結果が再現できることを確認した。一方、性能向上のための中温水取出しがある場合にも、モデル化した貯湯槽のみを対象に試行数値解析を実施し、温度分布の時間変化を算出し、貯湯槽上面のみから温水が流出する際に適用したモデルと同様のモデルによって実験結果が再現できることを確認した。

(3) システムのモデル構築および試行数値解析： これまでに構築したCO₂ヒートポンプのモデルに加えて、熱交換器、浴槽、および多機能化に伴う温水分岐・合流のモデルを新たに構築し、貯湯槽のモデルとともにそれらを合成してシステムのモデルを構築した。これまで以上に複雑な構成のシステムに対して、運転状態の変化に伴って解くべき非線形連立混合微分代数方程式の切替えを適切に行うことによって、様々な条件下での数値解析を行えるようにした。保温機能に対応して貯湯槽への戻り温水がある場合、性能向上のための中温水取出しがある場合、それらが組合された場合などについて、試行数値解析を行い、結果の妥当性を確認した。

(4) 日変化無し給湯需要量の条件下における性能分析： 日本工業規格に従う特定の一日の給湯需要量が毎日繰返し発生するものと仮定し、周期的定常状態に達するまで数値解析を行い、貯湯槽への戻り温水による貯湯槽温度分布の特徴を明らかにした。また、その結果から各種システム性能値を評価し、単一機能システムと多機能システムの性能比較により、多機能化に伴うシステム効率および残湯量の低下を定量的に明らかにした。さらに、貯湯槽への戻り温水の位置を変化させ

て数値解析を行い、それが各種システム性能値に及ぼす影響を明らかにした。

(5) 日変化有り給湯需要量の条件下における性能分析： 修正M1モードによる日変化を考慮した一箇月の模擬給湯需要量を設定し、数値解析を行い、貯湯槽への戻り温水による貯湯槽温度分布の日変化の特徴を明らかにした。また、その結果から各種システム性能値を評価し、多機能化に伴うシステム性能値の日変化の特徴を明らかにした。さらに、貯湯槽への戻り温水の位置を変化させて数値解析を行い、それが各種システム性能値に及ぼす影響を明らかにした。

(6) 運転条件最適化による性能分析： ヒートポンプ運転条件としての出湯温度および沸き上げ終了時入水温度、ならびに保温機能の使用を日変化させ、各種システム性能値の日変化を評価した。また、これまでに構築してきたニューラルネットワークによる性能推定の手法を拡張して適用することによって、運転条件の日変化からシステム性能値の日変化を推定した。さらに、これまでに構築してきた最適化による運転条件決定の手法を拡張して適用することによって、残湯量を確保しながらシステム効率を最大化するように運転条件を決定した。その結果、運転条件の日々の適切な設定がシステム性能の向上に及ぼす影響を明らかにした。

(7) 中温水取出しシステムの性能分析： 多機能化による性能低下を抑制するための方策の一つとして中温水取出しを行うシステムを対象とし、数値解析によって性能分析を行い、中温水取出しがシステム性能の向上に及ぼす影響を明らかにした。その他、給湯時間にもCO₂ヒートポンプを運転するような条件下においても性能分析が行えるようにモデルを拡張し、数値解析によって性能分析を行い、CO₂ヒートポンプの運転時間の給湯時間へのシフトがシステム性能の向上に及ぼす影響を明らかにした。

(8) 実測データに基づく検討： 研究実施計画で述べた実測データに基づく検討については、民間企業との協力関係を継続することができなかつたため、実施することができなかった。今後民間企業との協力関係を持つ機会があれば、その際に実施したいと考えている。

なお、以上の研究成果の一部は、後述するように国内で開催された学会で発表を行い、その論文集にも掲載された。また、前述したノルウェーのNorwegian University of Science and Technology および SINTEF Energy Research のグループとは研究交流を行い、定期的で開催されている国際シンポジウムで発表している。さらに、現在学術雑誌への論文投稿の準備を進めている。

International Energy Agency のヒートポンプ実施協定 Annex 46 (給湯用ヒートポンプ) における国際研究では、各参加国での技術調査検討、経済性検討などをもとにして、情報交

換が行われている。研究代表者はその国内委員会に参加する機会があり、その中で Task 3: Modelling calculation and economic models に関連して、CO₂ ヒートポンプ給湯システムの性能分析および最適化によって得られた研究成果について情報提供を行うなどして貢献している。

今後の課題として、本研究で取り上げた多機能 CO₂ ヒートポンプ給湯システムを太陽熱利用システムと組合せたシステムなど、より複雑なシステムの性能分析および最適化が行えるように、研究を展開していく予定である。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計6件)

石原瑞紗, 横山良平, 涌井徹也, CO₂ ヒートポンプ給湯システムの運転条件を考慮した性能分析, 日本機械学会関西支部第 93 期定時総会講演会, (2018).

前川純一, 横山良平, 涌井徹也, 多機能 CO₂ ヒートポンプ給湯システムにおける性能日変化の推定および運転条件の最適化, 日本機械学会関西支部第 92 期定時総会講演会, (2017).

R. Yokoyama, Performance Analysis of a Multi-Functional CO₂ Heat Pump Water Heating System, 9th Kyoto International Forum for Environment and Energy, (2017).

前川純一, 横山良平, 涌井徹也, 多機能 CO₂ ヒートポンプ給湯システムにおける性能日変化の推定および運転条件の決定, エネルギー・資源学会第 33 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, (2017).

前川純一, 横山良平, 涌井徹也, 多機能 CO₂ ヒートポンプ給湯システムにおける性能日変化の推定, エネルギー・資源学会第 32 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, (2016).

R. Yokoyama, Optimal Operation of a CO₂ Heat Pump Water Heating System, 8th KIFEE International Symposium on Environment, Energy and Materials, (2015).

〔その他〕

< ホームページ >

<http://www.me.osakafu-u.ac.jp/esalab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横山 良平 (YOKOYAMA, Ryohei)
大阪府立大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 70158385

(2) 研究分担者
無し

(3) 連携研究者
無し