

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 3 日現在

機関番号： 24403
 研究種目： 基盤研究(C)
 研究期間： 2010～2012
 課題番号： 22560838
 研究課題名（和文） ARX 時系列分析モデルによる CO₂ ヒートポンプ給湯システムの性能予測および最適化
 研究課題名（英文） Performance Prediction and Optimization of a CO₂ Heat Pump Water Heating System by an ARX Time Series Analysis Model
 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

研究成果の概要（和文）： 新しい高効率かつ低環境負荷の技術として注目されている家庭の給湯用機器の CO₂ ヒートポンプ給湯システムを対象に、オンラインでのシステムの運転に適用できるように、システム性能値の日変化の予測を行い、それに基づいてヒートポンプ運転条件を最適化する手法を開発した。システム性能の開発した手法による予測値と数値シミュレーションによる計算値との比較によって、開発した手法の妥当性および有効性を示した。

研究成果の概要（英文）： An operation problem has been investigated on a residential CO₂ heat pump water heating system as a novel technology with high efficiency and low environmental impact. Methods of predicting daily changes in system performance values and optimizing heat pump operating conditions have been developed so that they can apply to the on-line operation. The validity and effectiveness of the developed methods have been shown through the comparison between the system performance values predicted by the methods and calculated by a numerical simulation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
2012 年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 総合工学・エネルギー学

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多く、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た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。一般に、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はなく、給湯需要量の日・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、これまで 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、中位レベルの研究課題として、貯湯槽の一次元モデルを用いた状態量時間変化の動特性分析を行い、その妥当性を実験との比較によって検証するとともに、基本的な性能分析を行ってきた。また、下位レベルの研究課題として、CO₂ ヒートポンプの性能についてはサイクル分析によって、また貯湯槽の温度分布については三次元モデルを用いた熱流体解析によっても妥当性を検証してきた。これらの研究成果に基づき、現時点では実験の代替として数値シミュレーションによって基本的な性能分析を容易に行えるようになってきている。しかしながら、これらの方法は基本的にシステムの性能分析・最適化をオフラインで行うための方法であり、

システムの運転のための性能予測・最適化をオンラインで行うためには適用不可能である。

2. 研究の目的

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・最適化に関する基礎的研究をさらに飛躍的に発展させるため、オンラインでのシステムの運転に適用できるように、上位レベルの研究課題として、時系列分析によって性能日変化の予測を行い、それに基づいて運転の最適化を行うための方法を構築することを目的とする。また、その結果として、上述のマルチレベルにおける各アプローチによって性能分析・最適化を総合的に行う方法を確立することを目的とする。これによって、システム的设计フェーズから運転フェーズまでエネルギー変換効率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する。具体的な研究目的を以下に示す。

(1) 性能日変化の予測手法の開発： 給湯需要量が日変化する条件下において、CO₂ ヒートポンプ給湯システムのヒートポンプ COP、貯湯槽効率、システム効率、貯湯量、および残湯量という性能特性値の日変化特性を予測する手法を開発する。この際に、システム性能は環境および運転温度の影響を受けるので、それらの影響を考慮したモデル化を行う。また、モデルのパラメータ値を適切に同定する手法を開発する。さらに、手法の妥当性を、上述の動特性分析によって得られた性能特性値を用いる分析によって検証する。

(2) 運転の最適化手法の開発： 給湯需要量が日変化する条件下において、システムの上記の性能特性値の予測を行いながら、予測値が望ましい値になるように、ヒートポンプ運転条件として運転時の出湯温度および運転終了時の入水温度を最適化する手法を開発する。また、同様に、手法の妥当性を、上述の動特性分析によって得られた性能特性値を用いる分析によって検証する。

(3) 実システムへの適用の検討： 上記の予測および最適化手法を実システムに適用するには、給湯需要量の予測を行うとともに、給湯需要量の不確実性を考慮する必要がある。実測データに基づいて給湯需要量を予測する手法を開発するとともに、給湯需要量の不確実性を考慮することによって、システム性能を予測し、ヒートポンプ運転条件を最適化する手法を開発する。また、手法の妥当性を、実測によって得られた給湯需要量および

性能特性値を用いる分析によって検証する。

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) 性能日変化の予測手法の開発： 給湯需要量、貯湯量、残湯量、およびヒートポンプ運転条件の過去数日の値、ならびに必要なに応じて当日の値に基づき、当日のシステム性能値としてのヒートポンプ COP、貯湯槽効率、システム効率、貯湯量、および残湯量を予測するためのモデルを開発した。当初、ヒートポンプ運転条件を除外してシステム性能値を予測するために、ARX（自己回帰・外生入力）時系列分析モデルを適用した。しかしながら、その後ヒートポンプ運転条件も考慮してシステム性能値を予測するために、より柔軟にモデル化を行う必要があり、それに対応可能なニューラルネットワークモデルを適用した。また、これらのモデルに含まれているパラメータの値を適切に同定するために、非線形計画問題の大域的最適化手法として研究代表者が開発を行っているモードトリミング法を適用した。

(2) 運転の最適化手法の開発： 開発した予測手法を用いて性能日変化の予測を行いながら、性能特性値の予測値が望ましい値になるように、ヒートポンプ運転条件を最適化する手法を開発した。具体的には、残湯量予測値の下限値を満足すべき制約条件として、またシステム効率予測値を最大化すべき目的関数として考慮し、ヒートポンプ運転条件として運転時の出湯温度および運転終了時の入水温度を離散候補値から選択するようにした。

(3) 実システムへの適用の検討： 給湯需要量の実測データを入手し、それに基づいて性能日変化を予測し、ヒートポンプ運転条件を最適化するための検討を行った。当初は当日の給湯需要量を予測する方法を開発することを検討した。しかしながら、給湯需要量はユーザの生活に依存するため、日変化が大きく、正確に予測することが困難であることが判明した。そこで、給湯需要量を複数の区間に分割し、その内の一つの区間をユーザが選択することによって、給湯需要量をその範囲内の値を取るという不確実性を有する量として捉え、ヒートポンプ運転条件を決定する方法について検討した。また、不確実な給湯需要量の想定しうるすべての値に対する目的関数の機会損失の中からその最大値を選択し、それを最小化するというミニマックス機会損失基準に基づき、ヒートポンプ運転条件を最適化するというロバスト最適化の手法を開発した。

4. 研究成果

上述の研究の方法に対応して、主要な研究成果は以下の通りである。

(1) 性能日変化の予測手法の開発： 開発した手法を利用して、修正 M1 モードと呼ばれる 1 箇月間の模擬給湯需要量の日変化に対して、システム性能値の日変化を予測するとともに、数値シミュレーションによる計算値との比較によって本手法の妥当性および有効性を検討した。その結果、中間期の環境条件下において、ニューラルネットワークモデルのパラメータ値同定に規範データとして使用した給湯需要量およびヒートポンプ運転条件に対する予測値は計算値に良好に一致し、モデルパラメータ値の同定が適切に行われ、モデルによってシステム性能値を極めて高精度に予測できることがわかった。また、規範データとして使用していない給湯需要量およびヒートポンプ運転条件に対するシステム性能値も、同一のモデルによって高精度に予測できることがわかった。さらに、中間期だけではなく夏期および冬期の環境条件下においても、システム性能値を高精度に予測できることがわかった。以上より、開発した予測手法の妥当性および有効性を示すことができた。

(2) 運転の最適化手法の開発： 開発した手法を利用して、修正 M1 モードの 1 箇月間の模擬給湯需要量の日変化に対して、ヒートポンプ運転条件を最適に決定するとともに、それによるシステム性能の予測値と数値シミュレーションによる計算値との比較によって本手法の妥当性および有効性を検討した。その結果、最適化によって、必要な残湯量を保持しながら、平均システム効率を低下させることなく、ヒートポンプ運転条件を適切に決定できることがわかった。以上より、開発した最適化手法の妥当性および有効性を示すことができた。

(3) 実システムへの適用の検討： 開発した手法を利用して、修正 M1 モードの 1 箇月間の模擬給湯需要量および実測給湯需要量の日変化に対して、それらの不確実性を考慮しながら、ヒートポンプ運転条件を最適に決定するとともに、それによるシステム性能の予測値と数値シミュレーションによる計算値との比較によって本手法の妥当性および有効性を検討した。その結果、ロバスト最適化によって、給湯需要量が不確実性を有していたり、システム性能の予測値が誤差を有していたり、必要な残湯量を保持しながら、平均システム効率を低下させることなく、ヒートポンプ運転条件を適切に決定できることがわかった。以上より、開発したロバスト最適化手法の妥当性および有効性を示すことができた。

なお、以上の研究成果の一部は、後述するように、国内の論文集に掲載されただけではなく、国際会議でも講演発表を行い、その論文集にも掲載された。また、その国際会議で推薦を受け、国際論文集にも掲載されることが決定した。さらに、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、定期的にかかれている国際シンポジウム KIFEE International Symposium on Environment, Energy and Materials の場で研究交流を行っており、今後は以上の研究成果も発表していく予定である。

一方、今後の課題として、本研究で対象とした基本的な CO₂ ヒートポンプ給湯システムに加えて、中温水取出しにより性能向上を図ったシステム、ならびに給湯および保温機能を有する多機能システムについても、性能予測および最適化に関する研究を展開していく予定である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

① R. Yokoyama, R. Kato, T. Wakui and K. Takemura, Performance Estimation and Optimal Operation of a CO₂ Heat Pump Water Heating System, International Journal of Thermodynamics, Vol. 16 (2013), pp. 62-72 [掲載決定], 査読有。

② R. Yokoyama, R. Kato, T. Wakui and K. Takemura, Performance Estimation and Optimal Operation of a CO₂ Heat Pump Water Heating System, Proceedings of the 25th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2012), (2012), pp. 344-1-15, 査読有。

③ 横山良平・河野泰大・涌井徹也・竹村和久, 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 (運転条件決定への適用), 日本冷凍空調学会論文集, Vol. 29 (2012), pp. 31-42, 査読有。

④ 横山良平・河野泰大・涌井徹也・竹村和久, 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 (一定環境および運転条件下における推定), 日本冷凍空調学会論文集, Vol. 28 (2011), pp. 181-191, 査読有。

[学会発表] (計 13 件)

① 横山良平・加藤良介・涌井徹也・竹村和久, CO₂ ヒートポンプ給湯システムにおける運転条件のロバスト最適化 (実測給湯需要量を用いた検討), 第32回エネルギー・資源学会研究発表会, (2013.6.6-7), 東京 [発表決定]。

② 加藤良介・横山良平・涌井徹也・竹村和久, CO₂ ヒートポンプ給湯システムにおける運転条件のロバスト最適化 (環境条件の影響分析), 日本機械学会関西支部第88期定時総会講演会, (2013.3.16-17), 大阪。

③ 加藤良介・横山良平・涌井徹也・竹村和久, CO₂ ヒートポンプ給湯システムにおける運転条件の最適化 (ミニマックス機会損失基準によるロバスト最適化), エネルギー・資源学会第29回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, (2013.1.29-30), 東京。

④ 横山良平・加藤良介・涌井徹也・竹村和久, 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 (冬期における推定), 2012年度日本冷凍空調学会年次大会, (2012.9.12-14), 札幌。

⑤ 横山良平・大條祐平・涌井徹也・竹村和久, CO₂ ヒートポンプ給湯システムにおける運転条件の最適化 (実測給湯需要量を用いた検討), 第31回エネルギー・資源学会研究発表会, (2012.6.5-6), 大阪。

⑥ 横山良平・大條祐平・涌井徹也・竹村和久, CO₂ ヒートポンプ給湯システムにおける運転条件の最適化 (給湯需要量の不確定条件下における検討), エネルギー・資源学会第28回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, (2012.1.30-31), 東京。

⑦ 加藤良介・横山良平・涌井徹也・竹村和久, 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 (夏期における推定), エネルギー・資源学会第28回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, (2012.1.30-31), 東京。

⑧ 横山良平・加藤良介・涌井徹也・竹村和久, CO₂ ヒートポンプ給湯システムにおける運転条件の最適化 (給湯需要量の確定条件下における検討), 日本機械学会熱工学コンファレンス2011, (2011.10.29-30), 浜松。

⑨ 横山良平・河野泰大・涌井徹也・竹村和久, 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 (ヒートポンプの運転条件最適化の検討), 第30回エネルギー・資源学会研究発表会, (2011.6.2-3), 東京。

⑩ 河野泰大・横山良平・涌井徹也・竹村和久, 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 (ヒートポンプ運転条件決定の拡張), 日本機械学会関西支部第86期定時総会講演会, (2011.3.19-20), 京都。

⑪ 河野泰大・横山良平・涌井徹也・竹村和久, 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 (ヒートポンプ運転条件決定への適用), エネルギー・資源学会第27回エネルギー

ギーシステム・経済・環境コンファレンス,
(2011.1.25-26), 東京.

⑫ 横山良平・河野泰大・涌井徹也・竹村和久,
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 (COPおよび貯湯槽効率日変化
の推定), 2010年度日本冷凍空調学会年次大会,
(2010.9.14-18), 金沢.

⑬ 河野泰大・横山良平・涌井徹也・竹村和久,
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 (ニューラルネットワークによ
る貯湯および残湯量日変化の推定), 第29回エ
ネルギー・資源学会研究発表会, (2010.6.16-
17), 大阪.

[その他]

<受賞>

河野泰大, エネルギー・資源学会第 15 回茅
奨励賞 受賞 (2011.6.2, 学会発表⑬)

<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

涌井 徹也 (WAKUI TETSUYA)
大阪府立大学・大学院工学研究科・准教
授
研究者番号: 40339750

(3) 連携研究者

無し