

平成 21 年 4 月 1 日現在

研究種目： 基盤研究 (C)  
研究期間： 2007～2008  
課題番号： 19560850  
研究課題名 (和文) 数値シミュレーションの融合による CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> Heat Pump Water Heating Systems by Integration of Numerical Simulation Techniques  
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：** 数値シミュレーションに基づく CO<sub>2</sub> ヒートポンプ給湯システムの性能分析に関する研究を以下の通り発展させ、システム性能の最適化に向けての検討を行うことができた。

(1) 一次元数値シミュレーションのための数値解法を改良し、より短時間に結果を得ることができるようにした。(2) 三次元数値シミュレーションを融合し、一次元数値シミュレーションの妥当性を示した。(3) 各種条件がシステム性能に及ぼす影響を明らかにし、システム性能の向上に対する中温水取出しの効果を示した。

#### 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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、数値シミュレーション

#### 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 CO<sub>2</sub> 排出量も大幅に増大してきた。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く影響を及ぼしていると言える。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高効率化による省エネ

ギー化は、エネルギー消費量および CO<sub>2</sub> 排出量の削減にとって極めて重要な課題の一つとして考えられている。

このような状況の下で、冷媒として自然冷媒の CO<sub>2</sub> を使用した家庭用 CO<sub>2</sub> ヒートポンプ給湯機が我が国で初めて開発・商品化され、約 7 年が経過した。CO<sub>2</sub> ヒートポンプは、エネルギー変換の高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 CO<sub>2</sub> 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、我が国では家庭の給湯用機器として導入が進んでいる。また、2010 年までに家庭の給

湯用機器として 520 万台の導入が目標とされている。

上記の広範な普及を目標として、7 年間に圧縮機およびガスクーラ用熱交換器などの機器要素の技術開発の進展によって、CO<sub>2</sub>ヒートポンプの定格（中間期）条件における成績係数（COP）が当初の約 3.5 から現在の約 5 にまで大きく上昇した。一方、CO<sub>2</sub>ヒートポンプ給湯機の性能向上には、次に述べるシステム技術も必要不可欠である。

CO<sub>2</sub>ヒートポンプの COP は、低温側の外気の温度および高温側の水の温度によって影響を受ける。また、水を給湯用温水にするまで加熱するため、COP は入水および出湯温度の影響を受けることになる。このような CO<sub>2</sub>ヒートポンプの性能の温度依存性に関する分析については、ノルウェーの Norwegian University of Science and Technology (NTNU) および SINTEF Energy Research のグループ、我が国の電力中央研究所のグループ、およびその他によって、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 CO<sub>2</sub>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、家庭用給湯機としての CO<sub>2</sub>ヒートポンプは、給湯需要量の時間変化を考慮して貯湯槽とともに用いられる。この場合には、入水温度は、気温、給水温度、CO<sub>2</sub>ヒートポンプの運転、出湯温度、および給湯需要量によって変化する貯湯槽温度分布の影響を受けることになる。したがって、家庭用 CO<sub>2</sub>ヒートポンプ給湯機の性能は、上記の項目の季節・日・時間変化を考慮しながら、総合的に評価する必要がある。

このような状況の下で、CO<sub>2</sub>ヒートポンプだけではなく貯湯槽も含めた給湯システムの性能評価が重要視されるようになり、フィールド試験や実験による性能評価が行われるようになってきている。例えば、実使用の給湯需要量条件下におけるフィールド試験および模擬の給湯需要量条件下における実験によって、季節ごとあるいは年間を通しての性能評価がいくつかの組織で実施されている。

しかしながら、給湯需要量は家庭によって千差万別であり、限定されたフィールド試験および実験のみによって有用なデータが得られるとは限らない。また、上記の性能評価においては、CO<sub>2</sub>ヒートポンプの運転・制御条件が明確になっていないことも重大な課題であり、系統的な分析が行われていない。さらに、フィールド試験および実験においては極めて長い時間を必要とする。

研究代表者らは、数値シミュレーションによれば短時間に性能を評価することができ、有用なデータが系統的に得られるものと期待し、これまで数値シミュレーションによる性能評価を行ってきた。また、フィールド試

験および実験においてほとんど分析されてこなかった貯湯槽温度分布の時間変化がシステム性能に大きな影響を及ぼすことに着目してきた。

## 2. 研究の目的

本研究では、これまでに実施してきた数値シミュレーションに基づく CO<sub>2</sub>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継続・発展させ、一次元数値シミュレーション手法を改良するとともに、三次元数値シミュレーションとの融合を図り、システムの性能に大きな影響を及ぼすと考えられる各種条件を総合的に考慮しながら、より詳細な性能分析を行うとともに、設計および運用の最適化を行うことを目的とする。これによって、システムのエネルギ変換効率の高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) 一次元数値シミュレーション手法の改良： ルンゲ-クッタ法とニュートン-ラフソン法を階層的に組合せた数値解法を開発し、それによって CO<sub>2</sub>ヒートポンプの静特性と貯湯槽の動特性に基づいて得られる混合微分方程式を解いてきた。本研究では、それに必要な偏導関数の計算を解析的に行うことによって数値計算の高効率化を図り、より短時間に豊富な結果を得るための工夫を行う。

(2) 三次元数値シミュレーションの実施： これまで、CO<sub>2</sub>ヒートポンプ給湯システム全体の性能分析を行うために、貯湯槽が温度成層型であることも考慮し、貯湯槽温度分布を鉛直方向のみの一次元分布を考慮して一次元数値シミュレーションを実施してきた。しかしながら、貯湯槽の水の流出入、貯湯槽表面からの放熱、および温水の戻りなどに伴って生じる強制および自然対流によって三次元的な温度分布が生じ、それが CO<sub>2</sub>ヒートポンプ、貯湯槽、およびシステムの性能に影響を及ぼすものと考えられる。本研究では、貯湯槽内の水の三次元的な温度分布を把握するための三次元数値シミュレーションを実施し、それに基づいて一次元モデルの妥当性の検討を行うとともに、必要に応じて一次元モデルの修正を行う。

(3) 設計・運用条件に関する性能分析・最適化： CO<sub>2</sub>ヒートポンプ給湯システムの設計条件としての中温水取出し、また運用条件としての出湯温度および沸き上げ終了時入水温度がシステム性能に及ぼす影響を明らかにする。また、最大限のシステム性能を發揮させるための最適な設計・運用条件を明らか

にする。

### 3. 研究の方法

上述の具体的な研究目的に対応して、実施した研究の方法について述べる。

(1) 一次元数値シミュレーション手法の改良： システムのモデル化の結果として得られる混合微分代数方程式に対して、ルンゲクッタ法とニュートン-ラフソン法を階層的に組合せた数値解法によって解を導出する際に、偏導関数の計算を解析的に行うことによって、ヤコビ行列の計算を効率的に行えるように改良した。

(2) 三次元数値シミュレーションの実施： 貯湯槽内の水の三次元的な温度分布を把握するための三次元数値シミュレーションを実施し、三次元および一次元数値シミュレーションによる給湯時の貯湯槽温度分布の比較を行い、一次元数値シミュレーションの妥当性について検討した。まず、貯湯槽からの温水取出し位置を上部のみに設けている従来システムについて検討した。次に、貯湯槽からの温水取出し位置を、上部に加えて温度中間層の発生し易い中央部に設けた改良システムについて検討した。その際に、貯湯量が多い場合および少ない場合に着目し、それぞれ中央部から取出した温水と給水の混合、および上部と中央部から取出した温水の混合によって給湯を行う場合を想定した。

一方、貯湯槽から取り出した温水を熱交換した後に、貯湯槽に戻す場合についても、貯湯槽内の水の三次元的な温度分布を把握するための三次元数値シミュレーションを実施した。

(3) 設計・運用条件に関する性能分析・最適化： まず、従来システムについて、8日間の一次元数値シミュレーションを行い、周期的定常状態に達した際のシステム性能を評価した。その際に、季節として夏期、中間期、および冬期を想定し、環境条件としての気温および給水温度を季節によって変化させ、性能分析を行った。また、運用条件としての出湯温度および沸き上げ終了時入水温度を変化させ、パラメータ分析を行った。次に、改良システムについても、同様に8日間の一次元数値シミュレーションを行い、周期的定常状態に達した際のシステム性能を評価した。

### 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) 一次元数値シミュレーション手法の改良： 混合微分代数方程式の数値解法における改良の結果、より短い計算時間で豊富な結果を得ることができるようになった。この改良によって計算時間は約1/2に減少し、例えば8日間の数値シミュレーションでは、計算時間は平均的に約4時間となり、実時間の約1/50であった。

(2) 三次元数値シミュレーションの実施： まず、貯湯槽からの温水取出し位置を上部のみに設けている従来システムについての検討の結果、給湯開始直後には下面中央部から流入する水は水平方向に拡散せず、山型に広がるが、時間が経過すると密度差と熱伝導によって温度成層が形成され、三次元および一次元数値シミュレーションによる温度分布はほぼ一致した。次に、貯湯槽からの温水取出し位置を、上部に加えて温度中間層の発生し易い中央部に設けた改良システムについての検討の結果、中央部から取出した温水と給水の混合によって給湯を行う場合には、上記の従来システムに対する結果と同様の結果が得られた。また、上部と中央部から取出した温水の混合によって給湯を行う場合には、給湯開始時に既に貯湯槽下部に低温水が存在するため、給湯開始直後でも温度成層が崩れず、三次元および一次元数値シミュレーションによる温度分布は良好に一致した。これらより、一次元数値シミュレーションの妥当性を示すことができた。

一方、貯湯槽から取り出した温水を熱交換した後に、貯湯槽に戻す場合についての検討の結果、三次元数値シミュレーションと実験による温度分布が必ずしも良好に一致しなかった。そこで、貯湯槽の一次元モデルの一部に完全混合モデルを適用して一次元数値シミュレーションを実施したところ、一次元数値シミュレーションと実験による温度分布が比較的良好に一致することが判明した。

(3) 設計・運用条件に関する性能分析・最適化： まず、従来システムについての検討の結果、各条件下において貯湯槽温度分布および温度中間層の大きさを把握した。また、各条件が性能特性値としてのヒートポンプCOP、貯湯槽およびシステム効率、ならびに貯湯および残湯量に及ぼす影響を明らかにした。次に、改良システムについての検討の結果、上記の各条件下において中温水取出しによる貯湯槽温度分布の変化および温度中間層の減少を確認した。また、中温水取出しが上記の性能特性値に及ぼす影響を明らかにし、システム性能の向上に対する中温水取出しの効果を確認した。これらより、システム性能の設計・運用条件に関する最適化に向けての基礎的な検討を行うことができた。

本研究では、CO<sub>2</sub>ヒートポンプ給湯システムを対象として、日変化しない基本給湯需要量に対して周期的定常状態に達した際の性能を分析した。また、給湯機能のみを有するシステムの性能を分析した。これらに関連して、今後の研究課題として次のようなものが考えられる。

(1) 家庭の給湯需要量は生活に応じて日変化する。給湯需要量が日変化する場合についても性能分析を行い、貯湯槽温度分布およびシステム性能における特徴を明らかにする必要がある。

(2) 給湯機能だけではなく、給湯追焚きや暖房などの他の機能も有するシステムも開発・商品化されている。このような場合については、本研究でその妥当性が判明したように、貯湯槽の一次元モデルの一部に完全混合モデルを適用し、一次元数値シミュレーションによって性能分析を行っていく必要がある。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

① R. Yokoyama, T. Wakui, J. Kamakari and K. Takemura, Performance Analysis of a CO<sub>2</sub> Heat Pump Water Heating System Under a Daily Change in a Standardized Demand, Proceedings of the 21st International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2008), Vol. I (2008), pp. 391-399. 査読有

[学会発表] (計 12 件)

<招待・依頼講演>

① 横山良平, CO<sub>2</sub>ヒートポンプ給湯システムの性能評価, 日本機械学会関西支部第297回講習会「熱エネルギーシステムのフロンティア技術を学ぶ(ヒートポンプ・蓄熱システムの動向と最新技術)」, (2008. 9. 25-26), 大阪

② 横山良平・涌井徹也, 住宅用熱電併給・給湯機器の開発動向および導入評価事例, 平成20年電気学会電子・情報・システム部門大会, (2008. 8. 20-22), 函館

③ 横山良平, CO<sub>2</sub>ヒートポンプ給湯システムの数値シミュレーション, 日本機械学会第17回環境工学総合シンポジウム2007, (2007. 7. 19-20), 大阪

<一般講演>

④ 鎌苅順也・横山良平・涌井徹也・竹村和

久, CO<sub>2</sub>ヒートポンプ給湯システムの中温水取出しによる性能向上(模擬給湯需要量の日変化条件下における性能分析), 日本機械学会関西支部第84期定時総会講演会, (2009. 3. 16-17), 東大阪

⑤ 横山良平・鎌苅順也・涌井徹也・竹村和久, CO<sub>2</sub>ヒートポンプ給湯システムの中温水取出しによる性能向上(性能向上に対する環境および運転温度の影響), エネルギー・資源学会第25回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, (2009. 1. 29-30), 東京

⑥ 鎌苅順也・横山良平・涌井徹也・竹村和久, CO<sub>2</sub>ヒートポンプ給湯システムの数値シミュレーションによる性能分析(給湯需要量の日変化に伴う性能に関する一考察), エネルギー・資源学会第25回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, (2009. 1. 29-30), 東京

⑦ 横山良平・涌井徹也・竹村和久, CO<sub>2</sub>ヒートポンプ給湯システムの中温水取出しによる性能向上(基本給湯需要量を用いた性能特性のトレードオフ分析), 2008年度日本冷凍空調学会年次大会, (2008. 10. 20-23), 大阪

⑧ 涌井徹也・横山良平・鎌苅順也・河野泰大, CO<sub>2</sub>ヒートポンプ給湯システムにおける貯湯槽内温度分布の分析(2つの給湯モードによる中温水取出し時の分析), 2008年度日本冷凍空調学会年次大会, (2008. 10. 20-23), 大阪

⑨ 横山良平・涌井徹也・竹村和久, CO<sub>2</sub>ヒートポンプ給湯システムの中温水取出しによる性能向上(基本給湯需要量を用いた性能分析), 第27回エネルギー・資源学会研究発表会, (2008. 6. 5-6), 大阪

⑩ 鎌苅順也・横山良平・涌井徹也・竹村和久, CO<sub>2</sub>ヒートポンプ給湯システムの数値シミュレーションによる性能分析(給湯需要量の日変化に伴う性能の分析), 第27回エネルギー・資源学会研究発表会, (2008. 6. 5-6), 大阪

⑪ 鎌苅順也・横山良平・涌井徹也・竹村和久, CO<sub>2</sub>ヒートポンプ給湯システムの数値シミュレーションによる性能分析(基本給湯需要量の日変化に伴う性能の分析), エネルギー・資源学会第24回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, (2008. 1. 30-31), 東京

⑫ 涌井徹也・横山良平・鎌苅順也, CO<sub>2</sub>ヒートポンプ給湯システムにおける貯湯槽内温度分布の分析(中温水取り出し時の分析), 日本機械学会第17回環境工学総合シンポジウム2007, (2007. 7. 19-20), 大阪

[その他]

<受賞>

鎌苅順也, 平成 20 年度日本冷凍空調学会賞  
優秀講演賞 受賞 (2009. 5. 14, 学会発表⑧)

<ホームページ>

[http://www.me.osakafu-u.ac.jp/esalab/Home/  
Main/Main.html](http://www.me.osakafu-u.ac.jp/esalab/Home/Main/Main.html)

## 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・助教  
研究者番号: 40339750

### (3) 連携研究者

無し