

ヒートポンプ給湯機における貯湯制御

土屋 静男

「エコキュート」の愛称で広く知られているCO₂ヒートポンプ給湯機は、熱源機自身の効率は非常に高いものの、日々沸き上げる熱量と使用される熱量の関係により、貯湯効率は大きく変化する。したがって、ユーザが使用する熱量を、その使用状態からいかに精度よく予測するかが重要な課題である。本稿では、弊社で検討してきた学習制御手法について、貯湯タンク構造も含め紹介する。

キーワード：エコキュート、CO₂ヒートポンプ給湯機、学習制御、APF、貯湯タンク構造

1. はじめに

地球温暖化問題を受け議決された京都議定書の温室効果ガス削減目標を達成するべく、各分野で様々な省エネルギーの取り組みが行われている。しかし、民生部門、特に給湯分野においては、温室効果ガスの排出量は増加しており、より一層の削減努力が求められている。

弊社は東京電力株式会社、財団法人電力中央研究所と共同で2001年世界に先駆け、従来のフロン式と比較し高効率で環境負荷の低いCO₂ヒートポンプ給湯機の量産化を開始した。以降、「エコキュート」の愛称で、数社の参入とともにバリエーションが拡大し、2008年10月には累計出荷台数150万台を達成した。CO₂ヒートポンプ給湯機市場の拡大は、京都議定書目標達成計画や、2008年洞爺湖サミットに向けた「福田ビジョン」に記述されるなど、民生部門の省エネルギーに対して大きく期待されている技術である。CO₂冷媒およびCO₂ヒートポンプの特徴は

■ CO₂冷媒の特徴 (表1)

- ・ 自然環境に元来存在する物質である
- ・ オゾン層破壊係数 (ODP) が0
- ・ 地球温暖化係数 (GWP) が1
- ・ 可燃性、毒性無く、工業副生成物である

すなわち、CO₂は特性、製造過程含めて環境負荷の極めて低い冷媒であることがいえる。

■ CO₂ヒートポンプの特徴

- ・ 作動圧力が高い

- ・ 冷媒の密度が高く圧力損失が小さい
- ・ 高圧側が主に超臨界域で作動する

以上の特徴を給湯機用に適用すると、従来のフロン系冷媒では容易でなかった高温沸上げが高い効率で実現可能となる。また、冷媒密度が高いことを利用すれば、低温作動下での冷媒配管内流速が抑えられ、圧力損失の増加による能力低下が小さくできる。

2. CO₂ヒートポンプ給湯機システム

学習制御を論ずる前に、CO₂ヒートポンプ給湯機のシステム作動原理と制御概要を説明しておく。図1が代表的なCO₂ヒートポンプ給湯機システムの基本構成である。

システムはヒートポンプ冷凍サイクルから構成される熱源部と、貯湯タンクから構成される貯湯部に分かれており、水用配管にて接続されている。

2.1 熱源部作動原理と制御概要

コンプレッサにて圧縮加熱されたCO₂冷媒は、超臨界状態となり水熱交換器に流入し、ポンプにより貯

表1 各種冷媒の特徴

■ 各種冷媒の特徴		※1 ODP値 : Ozone Depletion Potential ※2 GWP値 : Global Warming Potential				
	用途例	※1 ODP値	※2 GWP値	可燃性	毒性	
フロン系冷媒	CFC12 自動車用エアコン	1	8,500	なし	なし	
	HFC134a 家庭用冷蔵庫等	0	1,300	なし	なし	
	HCFC22 家庭用エアコン給湯機等	0.055	1,700	なし	なし	
	HFC410A 給湯機自動車用エアコン等	0	1,900	なし	なし	
自然冷媒	R744(CO ₂) 給湯機自動車用エアコン	0	1	なし	なし	
	HC 家庭用冷蔵庫	0	3	強燃性	なし	
	NH ₃ 産業用冷凍機	0	0	弱燃性	あり	

出典：電力中央研究所報告W98-004/平成11年1月改訂

CO₂は自然界に存在し、環境負荷の少ない冷媒

つちや しずお
 (株)デンソー 空調冷熱事業部
 〒448-8661 刈谷市昭和町1-1

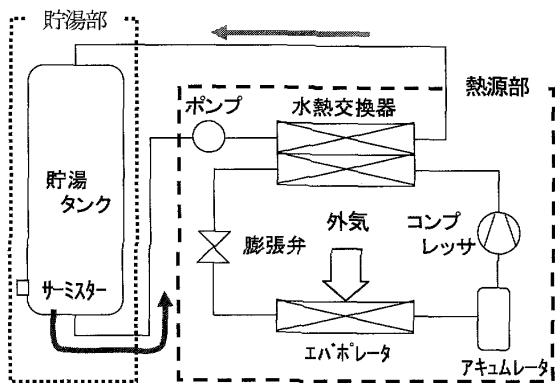


図1 CO₂ ヒートポンプ給湯機システム

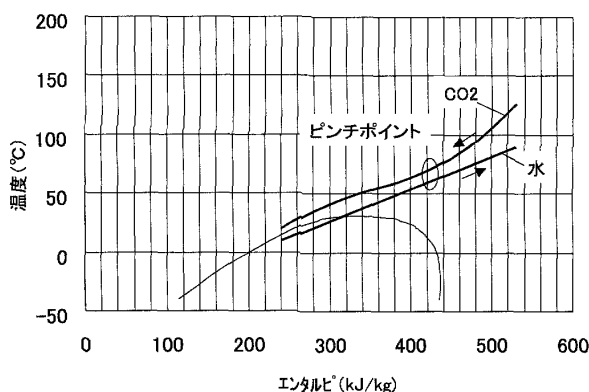
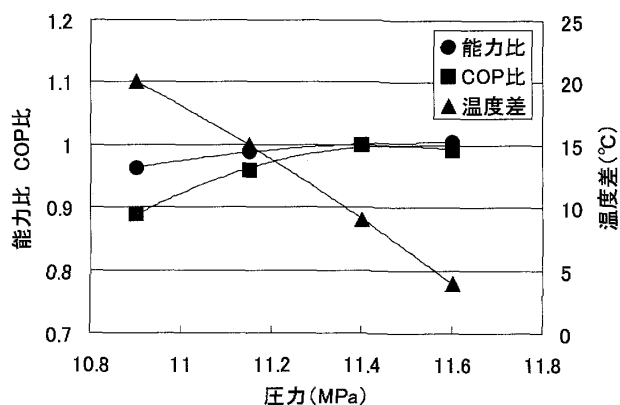


図2 高圧側加熱特性

湯タンク下部より導かれた貯湯水を所定温度まで加熱する。水熱交換器にて熱を放出したCO₂冷媒は膨張弁にて、概ね外気温度より5~10°C程度低い状態まで減圧された気液混合状態となり、エバポレータに流入する。エバポレータにはファンにて外気が導入されており、CO₂冷媒は外気から熱を吸収し低温低圧のガス状態となり、再びコンプレッサにて圧縮加熱される。

特に給湯機にCO₂ヒートポンプ冷凍サイクルを適用する場合、高温の沸き上げ温度を要求され、これを実現するため、高効率の対向流水熱交換器を用いることとなる。この場合の高圧側加熱特性は図2に示されるCO₂冷媒と水の特性により、熱交換器内部に最小温度差となるピンチポイントを持つ。このため、給湯機用CO₂ヒートポンプ冷凍サイクルの効率を制御するためには、高圧側冷媒圧力もしくは冷媒の熱交換量を代表する水熱交換器の出口冷媒温度を指標に制御する必要がある。

実際に環境試験室にユニットを設置し、膨張弁にて高圧圧力を変化させたときの加熱能力と冷凍サイクル効率(以下COPと略)、および冷媒の水熱交換器出口温度(T_{go})と給水温度の差 ΔT を測定するとともに、



外気: 3°C、54% 給水温度: 7.2°C

図3 CO₂給湯機性能特性

に、この温度差 ΔT を指標として高圧圧力を制御した場合のシステム挙動を測定した(図3)。

冷媒の水熱交換器出口温度が高圧上昇とともに低下した結果、給水温度との差 ΔT が小さくなる特性を示す。このような結果から、弊社は ΔT をCOPが最高となるように膨張弁開度にて制御する方法を採用することとした。

さらに最新機種では、冷媒高圧側に圧力センサを採用し、運転初期は反応が早い圧力を目標に、安定時は ΔT を目標に膨張弁開度を制御することで、起動から性能安定までの時間短縮を図っている。

また、熱源機の加熱能力はコンプレッサ回転数を外気温度に応じてインバータにて可変することで、常に機器の規定能力を確保できるよう制御している。

2.2 貯湯部作動原理と制御概要

水回路に設定されたポンプにより、貯湯タンク下部の水を水熱交換器に送水、所定温度まで水を加熱する。加熱された温水はタンク上部に戻り、冷温水の密度差により積層貯湯させていく。貯湯タンク下部には温度サーミスターが設置されており、温水の積層貯湯量が満量になったかをその検出値で判断し、所定温度に達した場合に熱源機の運転を停止させる。

また、水の加熱温度は、水回路に設置されたポンプの回転数をリニアに変化させることで65~90°Cの範囲で所定温度に制御している。熱源機の運転は、電力料金の安い深夜時間帯(概ね午後11時~午前7時)に実施する。具体的には、午前7時に熱源機運転が停止=必要貯湯量確保できるよう、下記式を参考に算出された必要運転時間(H_a)を基に、運転開始時間を決定している。

$$H_a = \{Q / (860 \times P)\} \times Stp$$

H_a : 必用沸上げ時間 (hr)
 Q : 必用貯湯量 (kcal)
 P : 熱源機定格加熱能力 (kW)
 Stp : 沸上げ温度における水比重

3. CO₂ ヒートポンプ給湯機のシステム効率

現在市場に普及している CO₂ ヒートポンプ熱源機の加熱能力は 4.5 kW, 6 kW の二種類が主流となっている。これは、燃焼系給湯機のように大能力・瞬間方式とすることが重量・体格・价格的に困難な面が多いため、図 1 のように貯湯タンクを併設し事前に必要貯湯量を確保しておく必要がある。このため、給湯機としての効率はヒートポンプ熱源機の効率だけではなく、システム全体の効率で論じることが不可避である。

図 4 は、CO₂ ヒートポンプ給湯機システムのエネルギーフローを概念的に示した図である。

具体的には、システムへの入力エネルギー（電力量）①に対し実際に使用された給湯熱量⑥の比率がシステム効率であり、2008 年以降は熱源機単体の COP（図 4 中の安定時沸上熱量とシステム入力電力量①との比率）の他、APF 値（年間給湯効率）として製品カタログへの記載が義務付けられている。

フロー図に沿ってエネルギーの流れを説明する。入力された電力量①に対し、貯湯部補機類（制御基盤等）電力量②が消費される。次に、ヒートポンプにより大気より吸熱された熱量が加わり、加熱能力は入力電力量①に対し大幅に増加する（最新機種では 5 倍）。

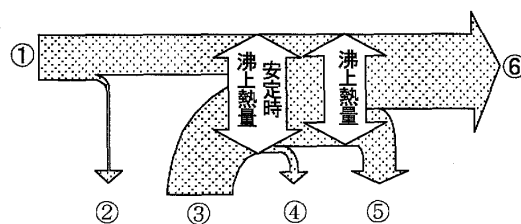
ただし、ヒートポンプで生み出された加熱熱量すべてが給湯熱量として使用されるわけではなく、また加熱に使用されない電力消費も必要となる。

④は熱源機停止中の待機電力や、貯湯部に設定されている逃がし弁から流出する温水のロスを示す。さらに、貯湯タンク表面からの熱放出によるロス⑤が加わる。

特に翌日深夜に熱源機が運転開始するまでに使用されなかった貯湯タンク内残湯は、放熱ロスを増加させるとともに、貯湯タンク内部の温度境界層を広げ、再度沸き上げが必要な中途半端な温度の湯を残す結果となる。

弊社は図 4 のエネルギーフローを基に、エネルギーロスの詳細を分析し、給湯機システム効率の向上のために、ハード・ソフト両面での改良を実施してきた。

その詳細を次に説明していく。



- ① 給湯機システム入力電力量
- ② 貯湯部補機消費電力量
- ③ ヒートポンプによる大気吸熱量
- ④ 待機電力消費量、接続配管熱ロス
- ⑤ 貯湯タンク放熱ロス、残湯ロス
- ⑥ 使用給湯熱量

図 4 給湯システムエネルギーフロー図

4. システム効率改善対応

本稿の趣旨はソフト面での最適化であるが、給湯機システムの場合は、3 節で説明したように、ハード、ソフト両面での改良が必要となる。したがって、まずはハード面での改良点を簡潔に説明しておく。

4.1 ハード面での改善

詳細構造、効果説明は本稿では省略するが、弊社が現在までエネルギーロスをハード面で改善してきた具体例を以下に列挙する。

- ・ 貯湯タンク、配管放熱ロス低減
 - 【断熱材材質変更】
 - グラスウール→発泡ポリスチレン成型品
 - 【貯湯タンク構造変更】
 - 中温水取り出し構造の採用
 - 【システム構成変更】
 - 熱源・貯湯部分離型→熱源・貯湯部一体型
- ・ ヒートポンプ効率向上
 - 【エジェクターサイクル採用】
 - 2001 年：3.46→2008 年：5.00
- ・ 電気ロス低減
 - 【待機電力低減】
 - 操作リモコン表示自動消灯機能
 - 制御基盤消費電力低減 等

4.2 ソフト面での改善

次に本稿の趣旨であるソフト＝制御面での改善内容を説明していく。制御で最もシステム効率に影響を与えるのが、深夜時間帯での貯湯量決定である。貯湯タンクを持つ CO₂ ヒートポンプ給湯機は、深夜時間帯にその日に消費する使用熱量をあらかじめ予測して、深夜時間帯での貯湯熱量を決定しておく必要がある。

必要量に対し余裕量を過度に見積もるとシステム効率低下に結びつくが、逆に余裕量を低減させていくと湯切れによるユーザ利便性低下を招く。このバランスをいかに最適化するかが最大の課題である。

弊社では給湯機開発の実績がなく、ユーザ使用実態に関するデータも不十分であったため、CO₂ヒートポンプ給湯機開発当初は「ユーザに使用湯量を意識させない」こと、すなわち様々なユーザの使用状況に湯切れなく対応できることを最重要視し制御開発を進めてきた。このような方針を基に開発した初期の貯湯量決定の制御プロセスは以下のような内容であった。

- ① 毎日の使用湯量（熱量）を、全日分と、使用量の増加する午後5時以降使用分の2種類に別け記憶しておく。
- ② 湯使用パターンを7日間区切りで判断。
- ③ 7日間単位で全日使用湯量、午後5時からの使用湯量それぞれの最大量を日々算出し更新。
- ④ 前記③で算出した全日最大使用湯量を深夜時間帯での貯湯できるよう、貯湯温度と貯湯量を決定。
- ⑤ 午後5時での貯湯タンク内残湯量が③で算出した午後5時からの最大量がより少ない場合は、その差分の熱源機を運転。
- ⑥ ユーザの急激な湯使用に対処するべく、常時貯湯タンク内に湯を残しておくため最低貯湯量を決め、最低貯湯量を切った場合は、最低貯湯量を段階的に増加。7日間増加した最低貯湯量を切らない場合は、最低貯湯量を段階的に減少。

図5は以上の制御プロセスのタイムチャートを示したものである。

図5タイムチャートに沿った制御ロジックにて、実際のユーザー宅で貯湯量指令値と実使用湯量の推移を

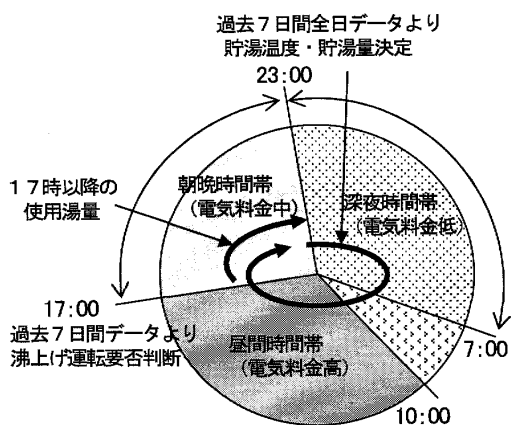


図5 制御タイムチャート

測定した結果を図6に示す。

当初の意図通り、湯切れ兆候はなく「ユーザに使用湯量を意識させない」目的は達成できているものの、余裕量＝貯湯タンク内残湯量は、特異日（20～21日）を除いても最大250L発生しており、使用湯量変動に柔軟に対応できる改善が必要であった。

課題を整理すると

- ① 最大使用湯量が発生した日から7日間は使用湯量に係わらず貯湯量を強制的に最大使用湯量に固定。
 - ② 最大使用湯量が発生した日は最低貯湯量も切る割合が多く、最低貯湯量も強制的に増加するため、①に加えさらに残湯量が増加。
 - ③ 上記①②はいずれも深夜貯湯量を増加させる方法に作用し、沸き上げ温度が上昇し、熱源機COPが低下し、貯湯タンク放熱ロスも増加。
- ①②はいずれも、ユーザ使用湯量のバラツキが要因である。したがって、このバラツキをパラメータにし制御改良を進めることで、湯切れ防止と残湯量減少の両立を図ることとした。

さらに改良を進めるに当たり、ユーザの省エネルギーへの注目度を考慮した。2001年のCO₂ヒートポンプ給湯機発売開始や、2002年の京都議定書批准を受け、地球温暖化防止のための脱化石燃料社会実現に向け、個人レベルでの省エネルギー・省CO₂化の意識が急速に高まってきている。この流れを受け、「使用湯量を意識させない」ことから、「使用湯量を意識して使ってもらうことでさらなる効率向上を達成する」ことを目的に省エネルギーに特化した新たな運転モード追加を検討した。

4.3 バラツキに着目した新制御開発

過去7日間の最大量を貯湯することで必要余裕量確保できるとの考えを白紙に戻し、日々の使用湯量バラツキが必要余裕量であるとの新たな仮説に基づき、制御ロジックを全面変更することとした。さらに、仮説

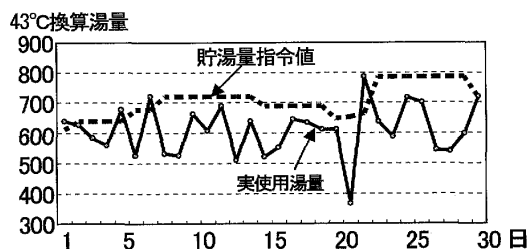


図6 貯湯量指令値、実使用湯量推移

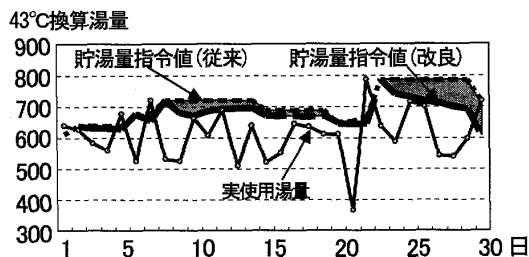


図7 貯湯量指令値, 実使用湯量推移

表2 制御仕様比較表

制御項目	おまかせ運転	省エネルギー運転
貯湯量	平均値+ σ	平均値+ $\alpha \times \sigma$ ($\alpha < 1$)
最低貯湯量	0~A	0~(A- β) ($\beta > 50L$)
リモコン表示消灯時間	SW未操作 30分経過後	SW未操作 5分経過後
熱源機停止判定	タ/下部<T a °C	*タ/下部<T b (T b < T a)
貯湯温度	MAX 90°C	MAX 75°C

(注) *中温水取出し構造採用機種のみ

の効率的検証のため、ユーザモニタリングサンプル数増強と制御変更による残湯量・システム効率変化が机上レベルで検証できる専用シミュレーションプログラム開発に注力し、実データを基にしたシミュレーション検証にて新制御の最適化を図っていった。

この結果、貯湯制御を以下のように見直した。

- ① 7日間単位での全日使用湯量、午後5時以降の使用湯量それぞれの平均値とバラツキ(標準偏差 σ)を日々算出し更新。
- ② 深夜時間帯での貯湯量が①で算出した平均値+ σ となるように、貯湯温度と貯湯量を決定。
- ③ 午後5時時点での貯湯タンク内残湯量が①で算出した平均値+ σ より少ない場合は、その差分の熱源機運転を実施。
- ⑤ 最低貯湯量を σ に対応し日々変更するとともに、バラツキが少ない場合は最低貯湯量は0Lとする。

図7は図6に示した実際のユーザ宅の使用湯量推移を基に、改良制御を採用した場合の貯湯量指令値推移をシミュレーションにて検討した結果である。斜線部分が従来制御に対する改良効果(貯湯量低減効果)で、1カ月間の累計では貯湯量を5%低減できることが判明した。貯湯量は熱源機運転時間=入力電力量に比例するため、システム効率5%向上の効果に相当する。

4.4 省エネルギー運転モード

今まで説明してきた内容は、運転モードを「おまかせ運転」に設定した場合の貯湯量制御の概要である。弊社はさらにCO₂冷媒ヒートポンプ給湯機の性能を最大限発揮できる「省エネルギー運転モード」を考案し、蓄積してきたフィールドデータによるシミュレーションおよび実証試験を積み重ね、実用上問題ない制御仕様を作り込んできた。その一例を表2に示す。

「省エネルギー運転モード」は、実証試験と各種常数見直しを積み重ねた結果、十分ユーザ使用実態に対応できるレベルまで最適化できたため、ハード改善と

合わせて、現在では全機種に採用している。

5. まとめ

以上説明したハード面、ソフト面での改良により、最新機種ではJRA 4050: 2007に基づく年間給湯効率(APF)は、業界トップレベルの3.5を達成している。2001年の初期モデル発売時はAPF測定基準がなく、公式の比較はできないが、社内規格での測定ベースでは、最新機種は約15%の効率向上に相当する。

今後は、熱源機改良や熱ロス低減等の基本的効率改善だけでなく、車を参考としたユーザインターフェース改善による省エネルギー化の工夫が必要と考える。

筆者は、エコキュートはある意味、車と似た面を持つと考えている。車には10、15モードに代表される燃費基準がカタログ表示されているが、ユーザの走り方により、実際の燃費はカタログ値とかけ離れる場合があることは広く知られている。その乖離を可能な限り少なくするため、最近のハイブリッド車両等ではエコガイド機能(エコ達成度表示、使い方アドバイス等)により、省エネルギー運転を意識させる工夫が採用され始めている。

エコキュートも使い方によりAPFが変化することは否めず、制御だけではあらゆる場面に対応することは困難である。したがって、ユーザにお湯の使い方によりどの程度システム効率が変わるのか、どうすればより無駄なくお湯が使えるかを的確に知らせ、より良い使い方を意識させる工夫が必要である。そのためのインターフェースとして何が最適かを提案するのが、次の最適制御の課題であると考えられる。車で消費するエネルギーも、お湯で消費するエネルギーも同じエネルギーであるから。

参考文献

- [1] 藤原健一, 山中康司, 平田敏夫: 冷凍, 73 (853), 1009 (1998).
- [2] M. Saikawa and K. Hashimoto: "AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE BEHAVIOR OF CO₂ HEAT PUMP CYCLE" (ed. By IIR-IIF Sections B and E-Oslo, Norway-1998).
- [3] 川村ほか: 自然冷媒 (CO₂) ヒートポンプ給湯機の開発 第2報 エジェクタサイクルの適用, "平成15年度冷凍空調学会学術講演会講演論文集," (A 306).
- [4] 平ほか: 寒冷地対応自然冷媒 (CO₂) ヒートポンプ給湯機の開発, "平成15年度冷凍空調学会学術講演会講演論文集," (A 307).