

給湯用ヒートポンプサイクルに関する熱力学的考察 —理想サイクル及びその成績係数（COP）の導出と各冷媒の上限COPの評価—

背景

冷房や暖房に利用されるヒートポンプの成績係数（=熱出力/圧縮動力：COP）の限界を決めるサイクルとして、逆カルノーサイクルがある（図1）。しかし、給湯用では、水の高温度差加熱が必要となるため、単純な逆カルノーサイクルがCOPの限界を決めるサイクルとしてあてはまらないことは明らかであり、新たに検討が必要である。さらに、現有の各種冷媒の中で給湯用にCOPが最も高くなる可能性を有する冷媒を明示しておく必要がある。

目的

給湯用の理想サイクルを明らかにしてそのCOPを導出するとともに、各種冷媒について、上限となるCOPを求め、給湯用に高いCOPが期待できる冷媒を明らかにする。さらに、その冷媒を用いた給湯用ヒートポンプの実現可能なCOPについて検討する。

主な成果

1. 給湯用理想ヒートポンプサイクルの定義とCOPの導出

給湯用では、加熱範囲内で比熱が一定と仮定できる水の高温度差加熱が必要となる。このため、COPの限界を決める理想サイクルを、高温熱源の温度が比熱一定で変化し、かつ他の過程は逆カルノーサイクルと同じと定義した。図1に提案したサイクルのT-S線図および導出したCOPを逆カルノーサイクルと並べて示す。提案した給湯用理想サイクルのCOPは、逆カルノーサイクルと同様、絶対温度のみの関数として表現できることを明らかにした*1。

2. 各種冷媒による給湯用ヒートポンプサイクルの上限COPの検討

図1に示した理想COPに対し、各種冷媒による損失のないサイクルのCOP（上限COP）を検討した。条件は、JRA4050の定格条件*2である、外気温度16℃、給水温度17℃、給湯温度65℃である。各種冷媒での検討結果を図2に示す。さらに、図3にCO₂冷媒とR410A冷媒におけるT-S線図を示す。

給湯用理想サイクルCOPの12.9に対し、CO₂冷媒では11.5と他の冷媒に比べ最も高い。CO₂冷媒では、臨界温度が30℃と低く、高压側が超臨界圧条件となるため、凝縮の過程がなく、図1に示した理想サイクルと形が近くなり、COPが高くなる。一方、R410Aなどの冷媒では、凝縮過程があるため、サイクルの形がむしろ逆カルノーに近くなり、CO₂冷媒に比べ、COPが低くなる。

以上の検討と外気温度や給水・給湯温度などを変えた他条件での検討から、最も高いCOPを達成できる冷媒は、CO₂冷媒であることが明示できた。

3. CO₂冷媒を用いた給湯用ヒートポンプにおける実現可能なCOPに関する検討

各種冷媒の中で最も高い上限COPとなるCO₂冷媒に関し、JRAの定格条件において、要素機器の効率を考慮した実現可能なCOPの程度を検討した。蒸発熱交換温度差を5℃、給湯熱交換最小温度差3℃、断熱圧縮効率0.75、断熱膨張効率を0.5とすると、6程度のCOPが得られた。

主担当者 エネルギー技術研究所 エネルギー変換工学領域 上席研究員 斎川 路之

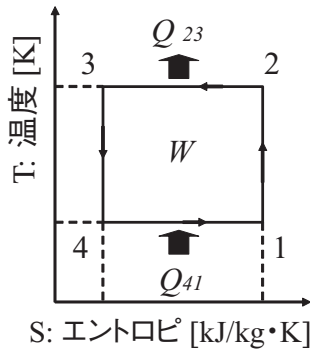
関連報告書 「給湯用ヒートポンプサイクルに関する熱力学的考察」電力中央研究所報告：M06002
(2006年12月)

*1：給湯用理想サイクルのCOPは、無限個の逆カルノーサイクルを考えることで導出できることを付記しておく。

*2：日本冷凍空調工業会が、家庭用ヒートポンプ給湯機に関して制定した自主規格。ヒートポンプ本体の性能評価の定格条件は、外気温度（乾球/湿球）：16/12℃、給水温度：17℃、給湯温度：65℃。

3. 需要家エネルギーサービス／最適エネルギー利用技術

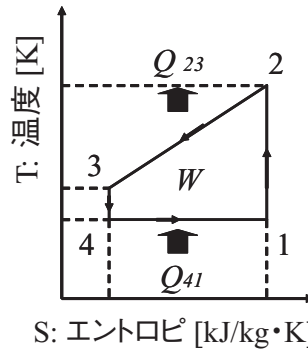
過程 1→2：等エントロピ圧縮
 過程 2→3：可逆等温圧縮（逆カルノーサイクル）
可逆比熱一定変化（給湯用理想サイクル）
 過程 3→4：等エントロピ膨張、過程 4→1：可逆等温膨張
 Q_{23} ：サイクルから取り去られた熱量（高温熱源）、 Q_{41} ：サイクルに加えられた熱量（低温熱源）
 W ：サイクルに加えられた仕事： $=Q_{23}-Q_{41}$
 COP ：高温熱源を出力とするサイクルの成績係数： $=Q_{23}/W=Q_{23}/(Q_{23}-Q_{41})=1/(1-Q_{41}/Q_{23})$



S: エントロピ [kJ/kg·K]

$$COP=1/(1-T_1/T_2)$$

(a) 逆カルノーサイクル



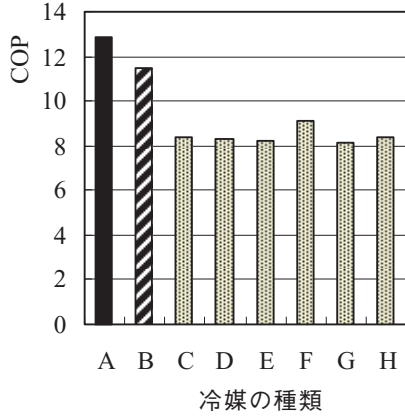
S: エントロピ [kJ/kg·K]

$$COP=1/(1-T_1 \ln(T_2/T_3)/(T_2-T_3))$$

(b) 給湯用理想サイクル

給湯用理想サイクルは、水の高温度差加熱が必要になるため、高温熱源の温度が比熱一定で変化（図右の過程2→3）し、かつ他の過程は、逆カルノーサイクルと同じと定義した。

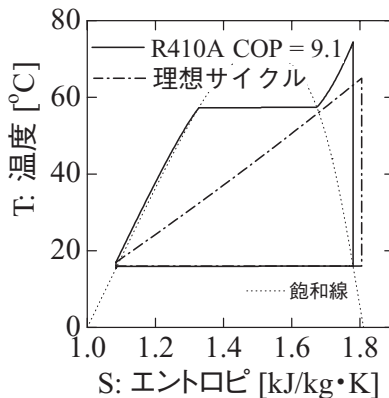
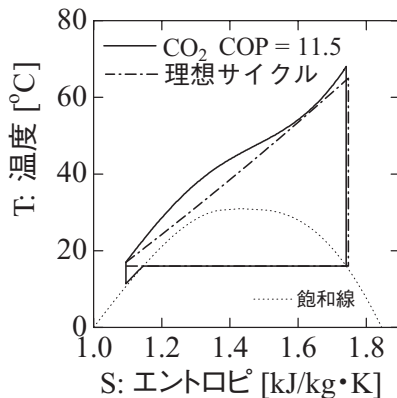
図1 導出した給湯用理想サイクルのT-S線図とCOP（逆カルノーサイクルとの比較）



A: 給湯用理想サイクル
 B: CO₂
 C: R22
 D: R134a
 E: R407C
 F: R410A
 G: イソブタン
 H: プロパン

給湯用理想サイクルのCOP12.9（図のA）に対し、CO₂冷媒では11.5（図のB）と他の冷媒と比べ最も高い。

図2 各種冷媒の上限COPの検討結果（JRA4050 定格条件の値）



図左の CO₂ 冷媒のサイクルは、図右のR410Aに比べ、一点鎖線で示した理想サイクルの形に近く、COPが高くなる。

図3 CO₂とR410Aの上限COPとなるサイクルのT-S線図（JRA 定格条件の値）