

冷凍機・ヒートポンプ

2022年10月14日 椿 耕太郎

この図を含む文章の著作権は椿耕太郎にあり、クリエイティブ・コモンズ 表示 - 非営利 - 改変禁止 4.0 国際 ライセンス <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.ja> の下に公開する。最新版は <https://camellia.net> で公開している。

冷凍機・ヒートポンプの中で、家庭用エアコンでよく用いられている蒸気圧縮式の冷凍機・ヒートポンプの仕組みと性能に与える影響について説明する。

1 冷凍機・ヒートポンプとは

エアコンのように仕事を与えられることで、温度の低いところから熱を奪い、温度の高いところへ熱を渡す機械を冷凍機やヒートポンプと呼ぶ。冷凍機・ヒートポンプは、部屋の冷暖房（エアコン）や冷蔵庫の庫内を低温に保つために用いられる。温度の低い熱を奪われるところやものを低温熱源と呼び、温度の高い熱を与えられるところやものを高温熱源と呼ぶ。低温熱源は冷凍機・ヒートポンプにより熱を奪われより温度が低くなり、高温熱源は熱を与えられより温度が高くなる。冷房や冷蔵庫など低温熱源を冷やすために使われる場合は冷凍機、暖房のように高温熱源を加熱するために使われる場合はヒートポンプと呼ばれることが多い。

2 どのように冷やすか

冷房で運転しているエアコンを例にとり、冷たいものをどのようにさらに冷やすかを見ていく。熱力学第二法則よりそのまま熱を低温熱源から高温熱源へ伝えることは不可能である。そこで冷凍機・ヒートポンプでは次のような過程を行う（図1）。

(1-1) 低温熱源よりもさらに温度の低い箇所をつくり、低温熱源から熱を受け取る

(1-2) 低温熱源より温度の低い箇所で受け取ったエネルギーを高温側へ輸送する

(1-3) 高温熱源よりもさらに温度の高い箇所をつくり、高温熱源へ熱を伝える

この過程を実現するために、冷凍機・ヒートポンプの中に冷媒と呼ばれる流体を流す。冷媒の温度を変化させるためには圧力を変化させる。周囲から仕事をし圧力を上げると冷媒の温度は上がり、圧力を下げると冷媒の温度は下がる。冷凍機・ヒートポンプの過程（1-1）～（1-3）は具体的には次のように行われる。

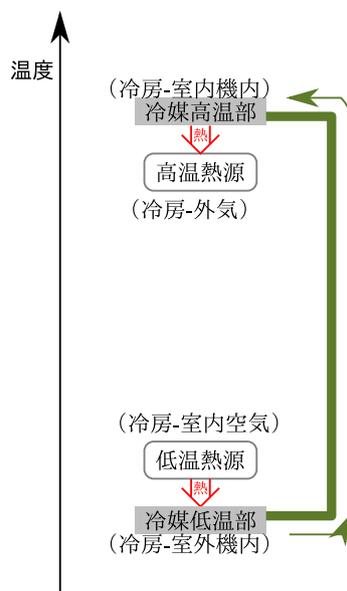


図 1 温度の関係とエネルギーの移動

- (2-1) 冷媒の圧力が低く、低温熱源（冷房-室内空気）よりも温度の低い冷媒低温部により、低温熱源（冷房-室内空気）より熱を受け取る。冷媒の圧力は低温熱源温度よりも冷媒温度が低くなるだけの低圧が必要である。冷媒は低温熱源（冷房-室内空気）より熱を受け取り、内部エネルギーが増加する。
- (2-2) 冷媒低温部で熱として受け取ったエネルギーを冷媒高温部へ輸送するために冷媒を冷媒低温部から高温側へ流す。冷媒低温部で内部エネルギーの増加した冷媒が流れることでエネルギーが冷媒低温部から高温側へ輸送される。高温側へ流す際には、冷媒の温度を高くしつつ流さなくてはならない。冷媒に仕事をすることで圧力を上げることで温度を上げ、冷媒高温部へ流す。この過程では冷媒の圧力を上げることと、冷媒を流すことの二つを行う。
- (2-3) 冷媒の圧力が高く、高温熱源（冷房-外気）温度よりも温度の高い冷媒高温部により、高温熱源（冷房-外気）へ熱を伝える。冷媒の圧力は高温熱源温度よりも冷媒温度が高くなるだけの高圧が必要である。冷媒は高温熱源（冷房-外気）へ熱を与え、内部エネルギーは低減する。
- (2-4) 冷媒低温部から冷媒高温部へ高い内部エネルギーを保有した冷媒が運ばれ高温熱源へエネルギーが伝えられる。そのままだと冷媒が冷媒高温部に溜まってしまうため、内部エネルギーの小さくなった冷媒を圧力を下げながら冷媒低温部へ運ぶことにより連続的な運転を可能にする。この過程を最後に追加することで連続的な運転が可能となる。

このそれぞれの過程を行うのは次の構成要素であり、図 2 のように構成される。

- (3-1) 蒸発器（熱交換器）
- (3-2) 圧縮機
- (3-3) 凝縮器（熱交換器）

(3-4) 膨張弁

圧力を高くし冷媒を流すために圧縮機で仕事を与え、圧力を下げるには膨張弁を、高温熱源、低温熱源と冷媒がそれぞれ熱をやり取りするためには熱交換器を用いる。高温側の熱交換器は通常冷媒が凝縮するため凝縮器と、低温側の熱交換器は通常冷媒が蒸発するため蒸発器と呼ぶ。

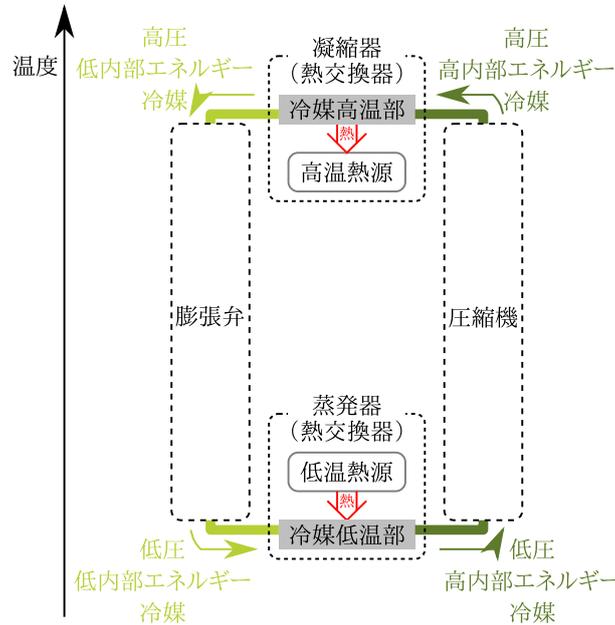


図2 冷凍機・ヒートポンプの構成

実際に身の回りで使われている冷凍機・ヒートポンプであるエアコンでは室内機と室外機があり、その間が二本の銅管で繋がれ冷媒が循環しているのが一般的である (図3)。冷房運転では室内機で室内の空気を取り込み熱を奪い冷却した冷たい空気を室内へ戻し、室外機で外気を取り込み加熱した熱い空気を室外へ戻す。このときの低温熱源は室内の空気、高温熱源は外気である。室内機と室外機を繋ぐ銅管内は冷媒が循環しており、室内と室外の間でエアコンによって空気が移動することはない。エアコンの冷房運転では室内機に低温熱源である室内空気よりも温度の低い冷媒低温部を作り室内を冷却し、室外機に高温熱源である外気よりも温度の高い冷媒高温部を作り室外へ放熱する。

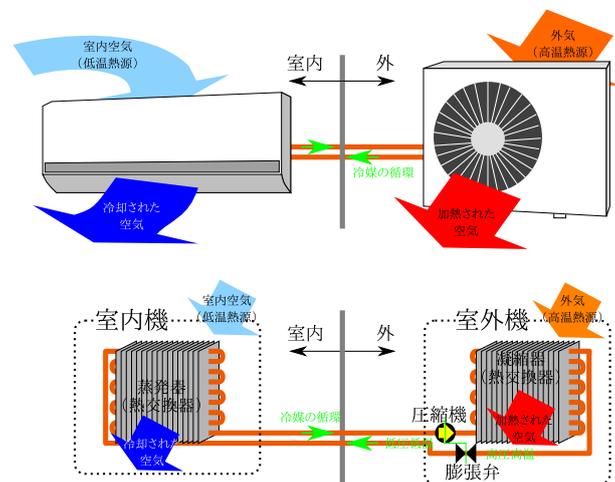


図3 冷房運転中のエアコン

エアコンで冷房と暖房の切り替えは室内機と室外機の熱交換器の働きを変えることで切り替える。冷房と暖房を切り替えると室外機内に設置された四方弁が動き室内機と室外機の熱交換器の働きを入れ替える。圧縮機と膨張弁は運転時に騒音が発生するため通常室外機の中に置かれている。図4に示すように、冷房運転では圧縮機から出た冷媒は室外機の熱交換器に入り凝縮器として外気を加熱し、膨張弁を通過し減圧され、室内機の熱交換器に入り蒸発器として室内空気を冷却する。四方弁を切り替えると図4の暖房運転のように、圧縮機を出た冷媒は室内機の熱交換器で凝縮器として室内の空気を加熱し、室外機へ戻り膨張弁を経て熱交換器で蒸発器として外気を冷却する。

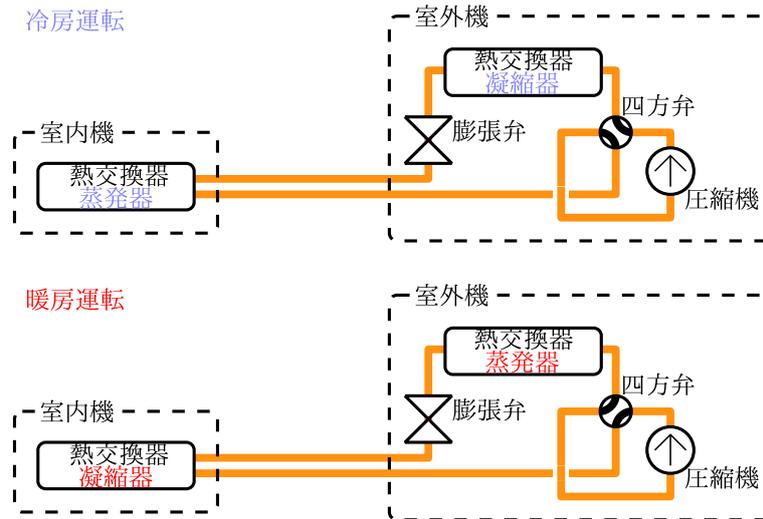


図4 四方弁による切り替え

3 状態線図

冷凍機・ヒートポンプ内の冷媒の状態の変化を視覚的にわかりやすく表すために、 $P-h$ 線図や $T-s$ 線図が用いられる。

$P-h$ 線図は縦軸を圧力 P 、横軸を比エンタルピー h で表したグラフである。横軸の冷媒の比エンタルピーは熱や仕事のやり取りにより、そのエネルギー量に応じて変化するため、周囲とのエネルギーのやり取りが視覚的にわかりやすい。伝熱量 Φ [W] が作用すると比エンタルピーの変化 Δh [J/kg] は次のように表される。 G [kg/s] は冷媒の質量流量である。

$$\Phi = G\Delta h$$

縦軸の圧力 P が大きいほど圧縮機で必要な仕事は大きくなる。

$T-s$ 線図は縦軸に温度 T を、横軸に比エントロピー s を取ったグラフである。横軸の比エントロピーの変化で不可逆性が読みとれる。圧縮機が理想的な可逆圧縮となっていれば、横軸の比エントロピーの変化量は 0 J/K となる。また、膨張弁では不可逆変化をしているため、比エントロピーは増加する。また、温度と比エントロピー

の変化量から冷媒の質量流量あたりの伝わった熱の大きさを求めることができる。

$$\Phi = T\Delta sG$$

右向きが比エントロピーが増加する熱を受け取る過程、左向きが熱を放出する過程である。右回りのサイクルは高温で熱を受け取る量が低温で熱を放出する量よりも多いため熱機関でありサイクル内の面積が実質取り出せる仕事となる。左回りは低温で熱を受け取り、高温で熱を放出するためヒートポンプサイクルである。同様に面積が必要な仕事となる。

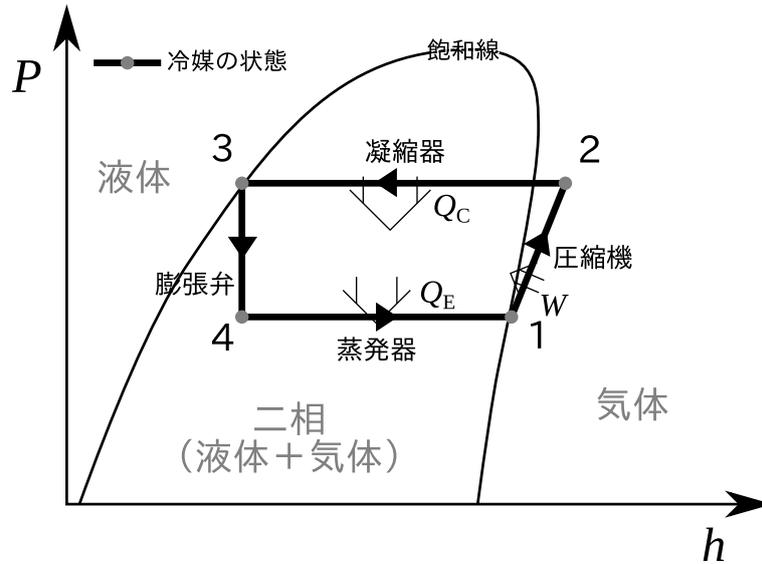


図 5 P-h 線図

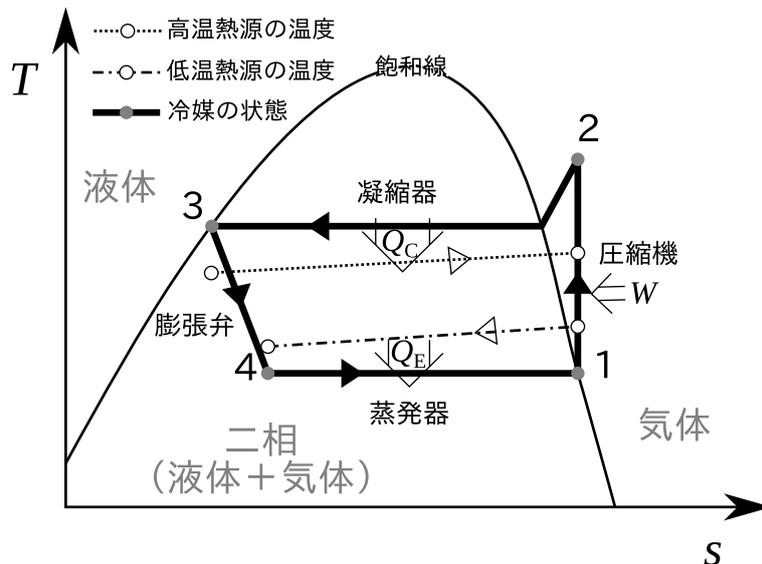


図 6 T-s 線図

圧縮機 (1 → 2) の変化は、理想的には可逆断熱過程であり、図 3.4.4 の T-s 線図、図 3.4.5 の P-h 線図に示すようにエントロピー s は変化せずエンタルピー h ・温度 T ・圧力 P が上昇する。凝縮器 (2 → 3) では、管摩擦損失などで冷媒の圧力 P は低下するが、蒸発器との圧力差に比べれば小さいので近似的に等圧過程と見なす。ほぼ

等圧過程であるので圧力 P は一定である。周囲に熱を伝え保有しているエネルギーも低下するためエントロピー s ・エンタルピー h 共に減少する。温度 T の変化については、 T - s 線図の飽和線の右側では過熱蒸気であるため熱を奪われることで温度 T が低下するが、温度 T が沸点まで低下すると（飽和線と交わると）凝縮が始まるため熱源とやり取りするエネルギーには冷媒の潜熱が使われ温度 T は変化しない。温度 T が変化する代わりに気体が液体へ相変化していく。 T - s 線図で点線で表した高温熱源の温度 T は熱を受け取ることで上昇する。膨張弁（3→4）では理想的には等エンタルピー変化であるので、エンタルピー h は変化せず、圧力および温度 T が低下する。膨張弁での変化は不可逆であるのでエントロピー s は増加する。蒸発器（4→1）では凝縮器と同じで等圧変化とみなす。圧力 P は一定で、熱を周囲から受け取り保有するエネルギーが増加するためエントロピー s ・エンタルピー h は増加する。蒸発器では二相域での変化をさせるので受け取った熱は蒸発の潜熱に用いられ常に温度 T は変化しない。 T - s 線図で一点鎖線で表した低温熱源の温度 T は熱を奪われることで低下する。

4 蒸気圧縮式冷凍機の成績係数

冷凍機・ヒートポンプの性能は成績係数で表す。蒸気圧縮式冷凍機で仕事に必要な要素は圧縮機であり、エアコンや冷蔵庫ではモーターで電気エネルギーから仕事に変換している。この圧縮機に必要な仕事小さくなればエアコンや冷蔵庫の消費電力は小さくなるため、仕事はなるべく小さくしたい。この仕事の大きさは冷媒高温部と冷媒低温部での冷媒の圧力差に対応している。圧縮機で変える必要のある圧力差が大きければ大きいほど必要な仕事は大きくなる。圧縮機での必要な仕事は冷媒高温部と冷媒低温部の圧力差に応じて大きくなる、すなわち冷媒高温部と冷媒低温部の温度差による。冷媒高温部と冷媒低温部の温度差はより小さい方が圧縮機での仕事は小さくなる。しかし、低温熱源から高温熱源に熱を伝えるためには熱源の温度に応じた圧力差が最低限必要である。例えば夏の冷房で外気温が $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、室内が $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ であるとき、エアコンによく使われる冷媒 R410a の $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ の蒸気飽和圧力 2.14 MPa であり $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ の蒸気飽和圧力 1.74 MPa である（飽和圧力は CoolProp[1] によった）。冷媒高温部は $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ よりも高い温度が必要であり、冷媒低温部では $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ よりも低い温度が必要であるので、冷媒の圧力は飽和蒸気であれば冷媒高温部で 2.14 MPa よりも高く冷媒低温部で 1.74 MPa よりも低い必要があり、圧力差は最低 0.4 MPa 必要である。

この圧縮機で時間あたりに仕事として必要なエネルギー P [W] はエアコンや冷蔵庫での消費電力となるので小さいほうが成績の良い冷凍機・ヒートポンプである。冷房や冷蔵庫のように冷凍機として低温熱源を冷やすために用いられる場合には冷媒低温部で低温熱源から冷媒が奪う伝熱量 Φ_E [W] が大きい方がよく冷やすことができ、暖房のようにヒートポンプとして高温熱源を加熱するためにもちいる場合には冷媒高温部で冷媒が高温熱源に与える伝熱量 Φ_C [W] が大きい方がよく暖めることができる。よって伝熱量 Φ_E 、 Φ_C は大きい方が成績のよい冷凍機・ヒートポンプである。小さい方が良い仕事率 P を分母に大きい方が良いそれぞれの伝熱量 Φ_E 、 Φ_C を分子にする

ことにより、冷凍機・ヒートポンプのそれぞれの成績の良さを表す成績係数 ϵ [1] は次のように定義されている。

$$\epsilon_R = \frac{\Phi_E}{P}$$
$$\epsilon_H = \frac{\Phi_C}{P}$$

ここで ϵ_R は冷凍機としての成績係数、 ϵ_H はヒートポンプとしての成績係数である。

5 熱源と冷媒の熱交換

冷媒高温部と冷媒低温部では冷媒と熱源で熱交換する。冷媒高温部では冷媒が高温熱源よりも温度が高く、冷媒から高温熱源へ熱が伝わる。エアコンの冷房では室外機にあり冷媒から外気に熱を伝える。冷媒低温部では低温熱源よりも冷媒の温度が低く、低温熱源から冷媒へ熱が伝わる。エアコンの冷房では室内機にあり室内の空気を冷やし冷媒が熱を受け取る。冷媒高温部ではエネルギー輸送に冷媒の潜熱を利用するため冷媒が凝縮（気体から液体へと相変化）し、高温熱源と熱交換をするため、高温側の熱交換器は凝縮器と呼ばれる。冷媒低温部では冷媒が蒸発（液体から気体へと相変化）し、低温熱源と熱交換をするため、熱交換器は蒸発器と呼ばれる。

熱交換器で冷媒を相変化（沸騰・凝縮）させることで三つの利点が得られる。高い熱伝達率が得られることと、大きな内部エネルギーの変化（潜熱）により大量のエネルギーが輸送できること、冷媒の温度変化が小さいため大きな温度差を維持できることである。

少ない温度差で熱源と冷媒の間で熱を伝えるためには、冷媒と熱源で熱伝達率を高くするとよい。相変化を伴う伝熱（沸騰・凝縮）は熱伝達率が非常に高いため、冷媒は加熱される冷媒低温部では沸騰（蒸発）し、冷却される冷媒高温部では凝縮するように用いられる。空気が受け取る伝熱量 Φ [W] は伝熱面積 A [m²] を一定とすれば、冷媒側の熱伝達率 $h_{冷媒}$ [W/(m K)]、空気側の熱伝達率 $h_{空気}$ [W/(m K)]、熱交換器で空気と冷媒を隔てている素材の厚さ l [m] と熱伝導率 k [W/(m² K)] により次式のように求められる。

$$\Phi = \frac{A}{\frac{1}{h_{冷媒}} + \frac{l}{k} + \frac{1}{h_{空気}}} (T_{冷媒} - T_{空気}) \quad (1)$$

6 冷凍機・ヒートポンプを効率よく運転するには

冷凍機・ヒートポンプでの消費エネルギーを減らす為には、圧縮機での仕事を減らせばよい。低温熱源と高温熱源の温度差に応じて最低限必要な圧力差が決まり、必要な仕事が決まる。そのため、空調機器では熱源の温度を変えることにより消費エネルギーを減らすことが出来る。冷房であれば、低温熱源は室内の空気、高温熱源は大気である。大気温度は変えることが難しいが、室内温度は空調機器の設定温度で容易に変えることが出来る。冷房であれば設定温度を高くすることで低温熱源温度が高くなり必要な仕事、すなわち消費エネルギーを減らすことが出来る。

冷媒高温部と冷媒低温部ではそれぞれ熱源と冷媒で熱をやり取りする。熱を伝えるには必ず温度差が必要となる。冷媒高温部では高温熱源よりも冷媒の温度を高く、冷媒低温部では低温熱源よりも冷媒の温度を低くしなくてはならないため、冷媒高温部と冷媒低温部での冷媒の温度差は熱源の温度差よりも大きくなる。冷媒高温部と冷媒低温部でのそれぞれの熱源と冷媒の温度差が大きければ、冷媒高温部と冷媒低温部での冷媒の温度差も大きくなり圧力差も大きくなるため圧縮機で大きな仕事が必要となる。

参考文献

- [1] Ian H. Bell, Jorrit Wronski, Sylvain Quoilin, and Vincent Lemort. Pure and pseudo-pure fluid thermophysical property evaluation and the open-source thermophysical property library coolprop. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 53, No. 6, pp. 2498–2508, 2014.