

解説4

冷凍サイクルの熱流体的特性と性能

KSエンジニアリング 末藤 和孝*

*すえふじ かずたか：代表 技術士(機械部門)

はじめに

熱サイクルは大きく分けて、エネルギーを与えて低温部から高温部へ熱を輸送するものと、高温源と低温源からエネルギーを取り出すものの2つに分類される。前者はヒートポンプと総称され、冷凍機や空調機などが代表的である。後者は熱機関と総称され、エンジンやランキンサイクルなどが代表的である。理論は教科書に書いてある通りだが、各種の熱流体的損失が発生するために効率は理論値から大きく低下するのが現実である。ここでは冷凍サイクルについて空調機を例に取り、熱流体的特性がどのように性能に影響するか、筆者がシミュレーション計算した結果に基づき解説し、課題についても述べる。

冷凍サイクル

冷凍サイクルは凝縮器の飽和温度を雰囲気温度より高くし、蒸発器の飽和温度を雰囲気温度より低くすることにより、低温雰囲気から高温雰囲気へ熱を輸送する手段であり、ヒートポンプサイクルとも呼ばれる。空調機を例にとると、サイクルは図1に示すような回路で表される。図は冷房時の状態を示しており、室外熱交換器は凝縮器、室内熱交換器は蒸発器として動作する。内部には冷媒が封入されており、冷媒ガスは圧縮機で圧縮さ

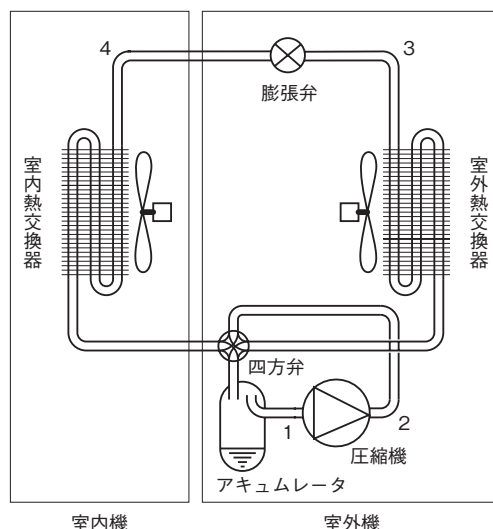


図1 冷凍サイクル

れて高温高圧のガスになり、凝縮器で大気へ熱を放出して液化する。膨張弁で減圧されるとその圧力の飽和温度まで温度が低下し、一部気化して蒸発器に入る。蒸発器で大気から熱を吸収して気化し、圧縮機に戻る。アキュムレータは蒸発器で冷媒が完全に気化できなかった場合に圧縮機に液が吸入されるのを防止するための容器である。四方弁は圧縮機の吸入管路と吐出管路が逆になるように切り替えるための弁で、図の破線の回路に切り替えると暖房に切り替わり、室内熱交換器が凝縮器になり、室外熱交換器が蒸発器になる。

図2に冷凍サイクルのp-h線図を示す。図中の数字は図1中の同じ数字に対応している。2'は圧縮機に損失がなく、断熱圧縮したと仮定したときの吐出ポイントである。主な損失として、1-2で圧縮機の損失、2-3と4-1で配管の圧損および、熱交換器の伝熱損失が発生する。これらの損失は電気入力に対する冷凍能力や暖房能力の倍率である成績係数(COP)を低下させる。いずれの損失も低減するに越したことはないが、影響の大きい損失から低減していくのが効果的である。そこでそれぞれの損失が性能にどのように影響するか、シミュレーション計算により検討を行った。計算条件として、圧縮機の回転速度は一定で、蒸発器出口の過熱度と凝縮器出口の過冷却度が一定になるように制御する。この条件が違えば結果は違ってくることをあらかじめお断りしておく。

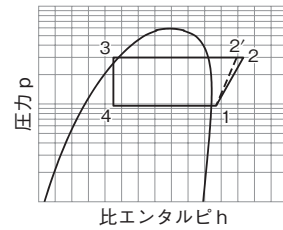


図2 p-h線図

1. 外気温度と冷暖房性能

まず基本的なところから、外気温度が冷暖房性能に及ぼす影響について調べる。冷媒としてR32を使い、室温は25℃一定とし、外気温度を変化させたときの冷房時と暖房時の性能変化を図3および図4に示す。冷房時は30℃、暖房時は15℃のときの値を100としている。冷房時は外気温度の上昇と共に能力は徐々に低下するが、COPの低下度は大きい。これは室温一定なので圧縮機の吸入圧力はあまり変化せず、冷媒流量が保たれるのに対して外気温度の上昇により吐出圧力が上昇するため、圧縮機の入力が増加するからである。一方、暖房時は外気温度の低下とともに能力は大きく低下していくが、COPの低下はそれほどでもない。これは外気温度が低下すると膨張弁による過熱度制御により吸入圧力が低下して冷媒流量が低下するとともに吐出圧力も低下するので、圧縮機の入力も低下するからである。冷房時と暖房時を比較すると暖房時の方が温度による能力の変化が大きく、冷房時の能力変化はあまり気にならないが暖房時には外気温度が下がるとエアコンの効きが悪くなると感じる人が多いと思われる。ただし、最近のエアコンのようにインバータ制御で能力を保とうとする場合は能力があまり変化せず、COPだけが低下することになる。

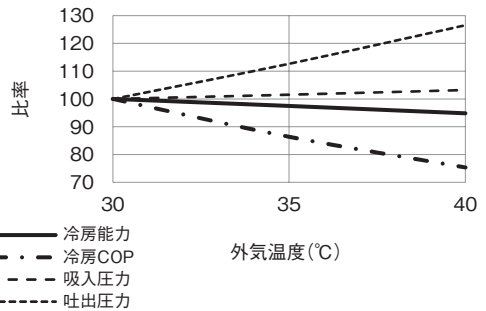


図3 外気温度と冷房性能

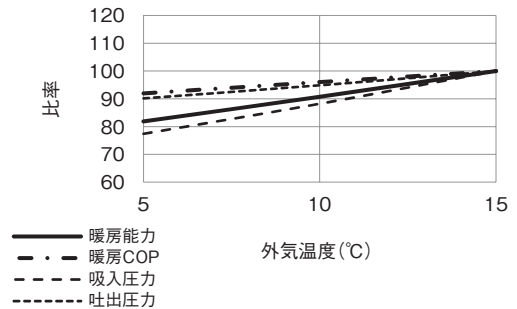


図4 外気温度と暖房性能

2. 熱交換機の性能と冷暖房性能

熱交換機の性能が異なる場合にサイクル性能がどのように変化するか、サイクル内の圧損が0で一定の温度条件という仮定の上で比較する。熱交換器の交換熱量 Q は熱通過率 K を用いて次式で表される。

$$Q = KA\Delta T \quad (1)$$

ここに、 A : 伝熱面積、 ΔT : 温度差(冷媒温度は飽和温度、空気温度は入口と出口の平均温度と定義した。)

基準とした K を1として熱通過率比を変化させた場合について調べた。 K を変化させると圧力条

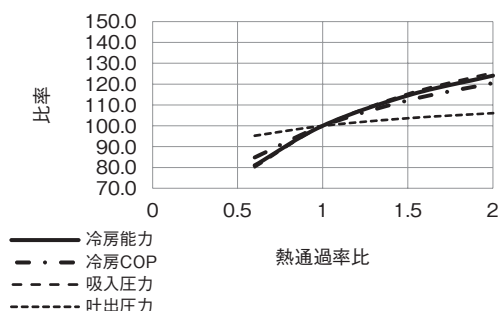


図5 室内熱交換器性能と冷房性能

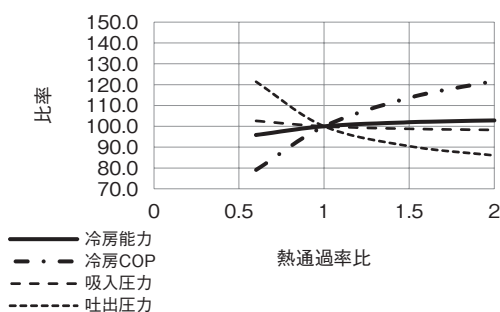


図6 室外熱交換器性能と冷房性能

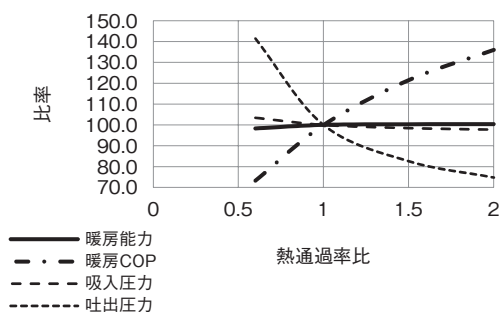


図7 室内熱交換器性能と暖房性能

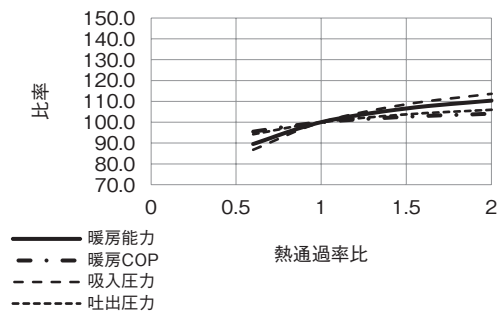


図8 室外熱交換器性能と暖房性能

件のバランス点が変化し、流量も変化して温度差 ΔT も変化するので現象は単純ではない。冷房で室内熱交換器の K を変化させた場合と室外熱交換器の K を変化させた結果を図5、図6に示す。室内熱交換器の K が低下すると圧縮機の吸入圧力も吐出圧力も低下していき、冷房能力も COP も単調に低下する。熱通過率比が小さくなるほど低下度合いが大きくなる。室外熱交換器の K が低下すると吸入圧力も吐出圧力も上昇し、冷房能力はあまり変化しない。一方、圧縮機の入力が増加するため COP の低下度合いは大きい。

次に暖房で K を変化させた場合について比較した結果を図7、図8に示す。室内熱交換器の K が低下すると吸入圧力も吐出圧力も上昇し、暖房能力はあまり変化しない。一方、圧縮機の入力が増加するため、COP の低下度合いは大きい。室外熱交換器の K が低下すると吸入圧力も吐出圧力も低下していき、暖房能力も COP も単調に低下する。熱通過率比が小さくなるほど低下度合いは大きくなる。

この結果によると、冷房能力は室内熱交換器性能の影響が大きく、COP に対しては室外熱交換器性能の影響も大きい。一方、暖房能力は室外熱交換器性能の影響が大きく、COP に対しては室内熱交換器性能の影響が大きい。

3. 圧損と冷暖房性能

管路に発生する圧損が性能に及ぼす影響について考察する。冷凍サイクル内の管路内は液の部分とガスの部分および二相流の部分が存在する。液の部分は流速が遅いのであまり圧損は生じない。二相流でボイド率(ガスの体積比率)が多くなると流速も速くなり圧損が増大する¹⁾。したがって蒸発器の出口付近～圧縮機入口と圧縮機出口～凝縮器の入口付近の圧損が最も大きくなる。そこで圧縮機の入口管路と出口管路に圧損が生じた場合の性能との関連を調べた。

図9に結果を示す。冷房時に入口圧損が増加すると吸入圧力が低下し、冷房能力と COP は同じ傾向で低下する。出口圧損が増加すると吐出圧力が上昇するが吸入圧力はあまり変化せず、冷房能力はあまり変化しない。しかし、圧縮機の入力が増