

Advance/FrontNet/TPによる冷凍機器シミュレーション

森田 秀利* 吉岡 逸夫*

Simulation of Refrigerating Equipment Using Advance/FrontNet/TP

Hidotoshi Morita* and Itsuo Yoshioka*

近年、大型の冷熱機器の設計やコストダウンのために、自然冷媒を利用した冷凍システム全体の動特性を把握するニーズが高まっている。アドバンスソフト株式会社では、気液二相管路系非定常解析シミュレータ Advance/FrontNet/TP を用いて、冷凍機器シミュレータを開発した。本シミュレータは、1次元のネットワークモデルに基づく解法を基本とし、冷凍サイクルに沿った熱流動挙動を模擬するものである。後半では、自然冷媒として CO₂ を対象とした解析事例について紹介する。

Key word: フロン、HFC、ノンフロン冷媒、Advance/FrontNet/TP、冷凍サイクル、Mollier 線図、R290、均質モデル、ドリフトフラックスモデル、NIST、REFPROP

1. はじめに

近年、冷凍・空調分野では地球環境の悪化から冷媒の使用が制限されつつある。なかでもフロン（フルオロカーボン）は成層圏オゾン層を破壊する原因物質として製造・使用制限を受けている。このフロンの代わりに登場した代替フロンと呼ばれるものがある。これは同じフルオロカーボン系である HFC（ハイドロフルオロカーボン）も使用されるようになってきているが、オゾン層を破壊しないものの温室効果ガスの指定を受けており回収・廃棄の際には注意が必要とされている物質である。

このようにフルオロカーボン系冷媒以外の冷媒を使用する動きがある。この冷媒はノンフロン冷媒（自然冷媒）と呼ばれアンモニア、炭化水素（プロパンやイソブタンなど）、二酸化炭素、空気、水など自然界に存在する物質を指している。

ノンフロン冷媒等の新規の冷媒を用いて冷凍・空調機開発を行うには、一般に何通りもの組合せの実験を繰り返す必要がある。そこで管路系シミュレーションを導入することによって、時間とコスト削減を図ることが可能になる。冷凍・空調機において管路系シミュレーションでは熱を効率よく輸送する

ため相変化を利用するので冷媒の液と蒸気の混合した気液二相流が重要な役割を果たしている。図 1 の熱サイクルの圧縮、凝縮、膨張、蒸発の各過程のうち、圧縮を除く過程に気液二相流が関わっている。

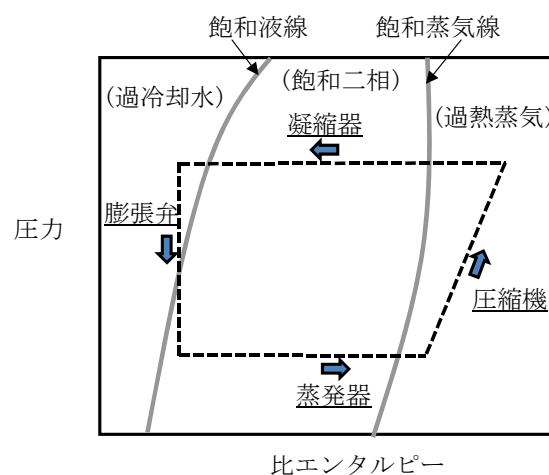


図 1 圧縮冷凍サイクル

冷凍・空調機シミュレーションには気液二相流を扱う管路系流体解析パッケージ Advance/FrontNet/TP を適用できる。冷凍機シミュレーションの解析例を以下に示す。

*アドバンスソフト株式会社 技術第 4 部

4th Technical Division, AdvanceSoft Corporation

2. 理論

2.1. 冷凍サイクル

冷凍機シミュレーションの基礎となる、冷凍サイクルの概略を図 2 に示した。冷凍サイクルは図に示したように、以下の主要な 4 種類の流体機器から成り立っている。

- ・圧縮器 (Compressor)
- ・凝縮器 (Condenser)
- ・膨張弁 (Expansion valve)
- ・蒸発器 (Evaporator)

図中の矢印が配管を示しており、矢印の向きが配管内に挿入されている自然冷媒（以下、冷媒）の移動の向きに相当する。また、破線の矢印は気相を表し、線の矢印は液相を表している。クーラーの場合蒸発器は室内機、凝縮器は室外機に相当する。ヒーターの場合にはクーラーと逆のことが起こっていることになる。

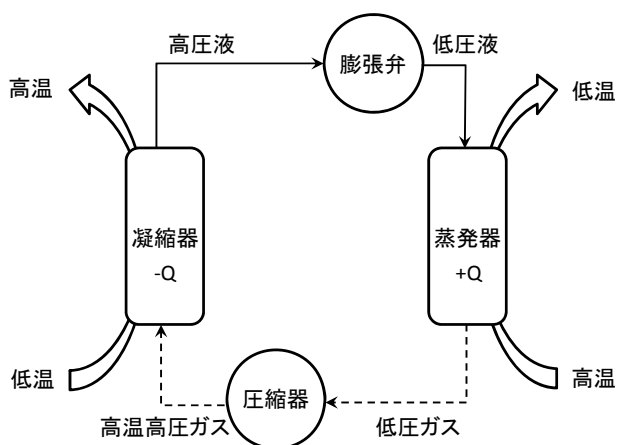


図 2 冷凍サイクル

今クーラーの場合を例にすると、配管内の冷媒は低圧ガス状態から圧縮器で圧縮される。気体を圧縮すると気体分子は衝突し摩擦熱により高温高圧ガスになる。この高温高圧ガスを凝縮器に通すことによって低温の気体（または液体）が熱を奪い高温の気体になる。凝縮器では熱を奪われる(-Q)ので高温の液体になる。高圧液は膨張弁により圧力を下げられる（低圧液）。圧力が低くなると液体はより簡単に気化するので、これを熱交換器に通してやると蒸発して気体になる。この低圧液を蒸発器に通してやると気化熱を奪い(+Q)低圧ガスになる。蒸発器中を

高温の空気（または液体）が通過することによって熱を奪われ低温の空気（または液体）になる。このよう室内機（蒸発器）を部屋の中に置くと部屋の温度を下げるができる。

冷凍サイクルというのは以上のように「冷媒」の気体と液体の相変化の時の熱エネルギーの移動を利用するものである。



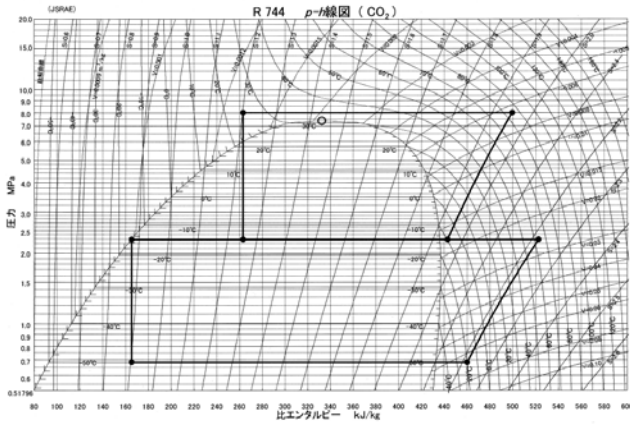
図 3 室内器（蒸発器）



図 4 室外器（凝縮器）

冷凍サイクルは p - h 線図（Mollier 線図）と呼ばれる図に沿ってサイクルが行われる（図 5）。図の横軸が比エンタルピー、縦軸が圧力で表されている。山型の曲線が示されているが頂点部は臨界点で、臨界点から左側の曲線が飽和液線、一方の右側が乾き飽和蒸気線と呼ばれている。この曲線で 3 つの領域に分割される。冷媒はそれぞれ左側から過冷却液、湿り蒸気、過熱蒸気の状態になっている。

冷凍機で使用されている冷媒の状態変化はこの p - h 線図に沿って変化する。この状態変化は圧縮冷凍サイクルと呼ばれ、 CO_2 の例を示すと図 5 で表される。

図 5 CO₂の p-h 線図[1]

状態変化の流れは以下ようになる。

1. 圧縮機：「等エントロピー線」に沿って変化する。「断熱圧縮」または「等エントロピー圧縮」と呼ばれ冷媒は過熱蒸気になる。
2. 凝縮器：圧力一定条件で放熱する。「過熱蒸気」から二相流である「湿り蒸気」を経て「液体」になる。
3. 膨張弁：冷媒液の膨張が行われる。高圧の液を急に減圧するために「等エンタルピー膨張」する。このことによって「液体」から二相流の「湿り蒸気」に変化する。
4. 蒸発器：圧力一定化で熱を与えます。このことによって二相流である「湿り蒸気」から「飽和蒸気」になる。そのあと「過熱蒸気」に変化する。

以上の条件を 1-2-3-4-1 のサイクルで冷凍サイクルが成り立っている。

2.2. 解析手法

気液二相流の数学モデルは、気液速度の関係の取り扱いを中心に、気液が等速とする均質モデル、気液速度差を相関式で与えるドリフトフラックスモデル、気液運動を個別に計算する二流体モデルに分けることができる。ここでは一次元過渡解析で広く用いられているドリフトフラックスモデルを取り上げる。

ドリフトフラックスモデルによる一次元気液二相流の基礎式を以下に示す。

(質量保存則)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

(気相の質量保存式)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha \rho_g) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\alpha \rho_g \frac{G}{\rho_m} \right) \\ = \Gamma_g - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\alpha \rho_g \rho_l}{\rho_m} V_{gj} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

(運動量保存則)

$$\begin{aligned} \frac{\partial G}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{G^2}{\rho_m} + \frac{\rho_g \rho_l}{\rho_m} \frac{\alpha}{1-\alpha} V_{gj}^2 \right\} \\ = -\frac{\partial P}{\partial z} - g \rho_m - F_w \end{aligned} \quad (3)$$

(エネルギー保存則)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_m h_m}{\partial t} + \frac{\partial G h_m}{\partial z} = \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{G}{\rho_m} \frac{\partial P}{\partial z} \\ - \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{\alpha \rho_g \rho_l}{\rho_m} (h_g - h_l) V_{gj} \right\} + q \end{aligned} \quad (4)$$

エネルギー保存則では運動エネルギーを省略した。運動エネルギーは臨界流において重要であるが、1次元解析では臨界流量を理論式で与えることができるため、直接基礎式で計算する必要は少ない。ここで ρ は密度、 G は質量流束、 P は圧力、 e は比内部エネルギー、 h は比エンタルピー、 u は速度、 g は重力加速度、 q は外部との熱交換、 α はボイド率、 θ は配管傾き角、 F_w は壁摩擦力、 t は時間、 z は距離である。添字の g と l は気液、 m は二相流の平均を表す。二相平均密度と質量流束は次のように定義される。

$$\rho_m = \alpha \rho_g + (1-\alpha) \rho_l \quad (5)$$

$$G = \alpha \rho_g u_g + (1-\alpha) \rho_l u_l \quad (6)$$

気液の速度差 u_r は次の通りである。

$$u_r = u_g - u_l \quad (7)$$

3. 冷媒の種類と熱物性の扱い

冷媒は 1800 年後半から 1930 年頃までは、冷凍機の媒体としてアンモニア(NH₃)、塩化メチル(CH₃Cl)、二酸化硫黄(SO₂)が使用されていた。いずれも漏えいした時には毒性があり使用されなくな

ってきた。これに代わるものとしてフロンが使用されるようになってきた。わが国では 1935 年に大阪金属工業（現ダイキン工業）がフロンの製造に成功し、1942 年から量産を始めている。このフロンガスの登場により冷凍・空調関係機器は急速に発展することになった。1990 年代になると地球温暖化を発端として自然破壊に注目が集まり、フロンもオゾン層を破壊するという理由により 1995 年には全廃することになった。代替フロンと呼ばれる HFC はオゾン層を破壊しないものの温室効果ガスとして指定されており、廃棄時の回収が義務付けられている。

これらの経緯から現在ではフロンを用いず、オゾン破壊能力がなく温室効果も小さい“ノンフロン冷媒”に対する期待が高まっている。ちなみにノンフロン冷媒は日本でのみ通用する言葉で、世界的には自然作動媒体(Natural Working Fluids)、あるいは自然冷媒(Natural Refrigerants)と言われている。

冷媒に要求される一般的な性質として以下の項目が挙げられる[2]。

- 臨界温度が利用する温度より十分高いこと。
- 圧力が高すぎないこと。
- 最低圧力が大気圧以上であること。
- 圧縮機押しのけ体積当たりの冷凍能力が大きいこと。
- 圧縮機吐出ガス温度が低いこと。
- 化学的安定性が高いこと。
- 可燃性がないこと。
- 毒性がないこと。
- 大気へ放出した時の環境に悪影響を及ぼさないこと。
- 安価であること。

自然冷媒の熱物性に関する研究は従来から数多く行われており、そのうち大半が実績値の報告である。この実測値をもとに相関式を作成し、相関式を組み込んだプログラムが開発されている。熱物性値ソフトウェアに関しては米国国立標準技術研究所（NIST : National Institute of Standards and Technology, USA)から REFPROP 9.0 が開発されている[3]。以下に REFPROP で採用されている冷

媒の種類と状態方程式の相関式の一覧を示した。

表 1 REFPROP 9.0 で採用されている相関式

冷媒	状態式
二酸化炭素	Span(1996)
アンモニア	Tillner-Roth(1993)
プロパン	Miyamoto(2000)
ブタン	Miyamoto(2001)
イソブタン	Miyamoto(2002)
プロピレン	Angus(1980)
水	Wagner(2002) IAPWS-95(1995)

Advance/FrontNet シリーズプログラムではこの NIST の REFPROP プログラムを用いて流体の物性値を算出し、解析に利用している。

冷凍機器の運転効率を表す指標に COP

(Coefficient of Performance、成績係数)がある。

例えば CO₂ 冷媒を COP の観点から見ると、高温差加熱時には効率が低いのにに対し、高温水を加熱する場合には給湯熱交換器出口の冷媒温度が高くなり、COP が低下する。その対策として、冷凍サイクルそのものの高効率化や運転制御方式の工夫が必要となる。Advance/FrontNet/TP を用いることで、それらの対策の効果を定量的に評価することが可能になる。

4. 解析事例

自然冷媒を用いた冷凍システムの開発においては、長期にわたって蓄積された従来型の冷媒と比較すると、熱流動データやシステム・機器の設計経験とノウハウは十分とはいえない。自然冷媒を利用した冷熱システムの設計・施工のノウハウを蓄積し、機器の設計や制御仕様の検討、および現場施工の事前検討に役立てるため、Advance/FrontNet/TP をベースに冷凍システムシミュレータを開発した。このシミュレータによるテスト解析の結果を紹介する。

解析対象である CO₂ を冷媒とする系統図を図 6 に示す。圧縮器、凝縮器、液溜まり、膨張弁、蒸発器およびそれらを接続する配管から構成されている。

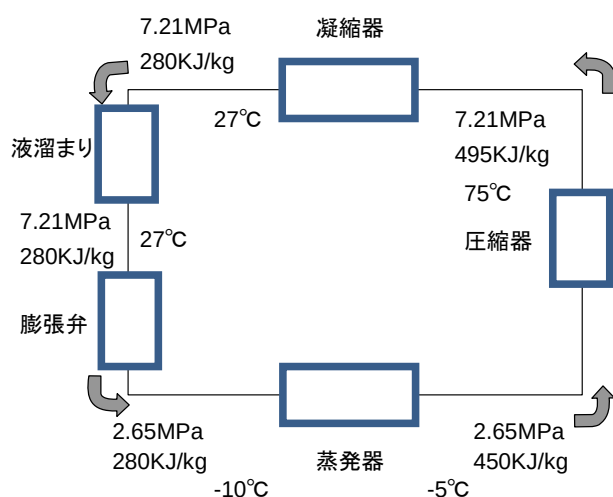


図 6 一次元管路系解析の系統図

5. 解析結果

凝縮器と蒸発器は屋外空気および室内空気と冷媒の間の熱交換器であるが、分岐や並列伝熱管を含めて熱水力的に等価な一次元配管として扱う。図 7 のように 300 秒から凝縮器の外気温を徐々に 600 秒かけて 1°C 上昇させ、その後 3,600 秒にて蒸発器側空気の温度をステップ状に 1°C 上昇させる温度の外乱があった場合のシステム応答を計算した。解析時間は 7,200 秒である。

過渡解析結果から膨張弁入口圧力に図 8 のような応答が得られた。また、膨張弁出口および圧縮機入口における温度は図 9 のような応答が生じた。境界条件を変更すると振動しながら最終的な定常状態に漸近する妥当な結果が確認された。振動はやや過大評価であるが、配管摩擦が小さく設定されていることが原因であると推定される。

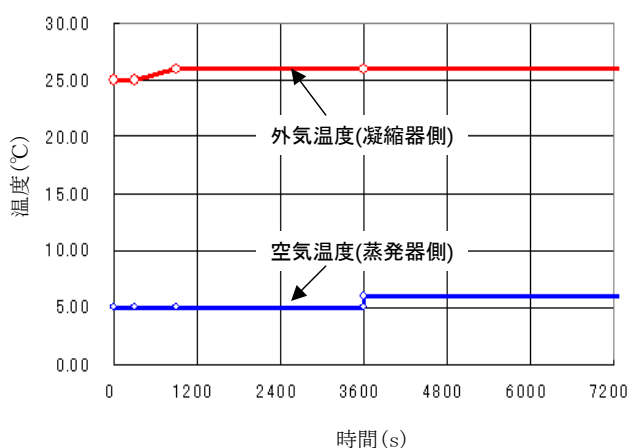


図 7 過渡応答解析の境界条件

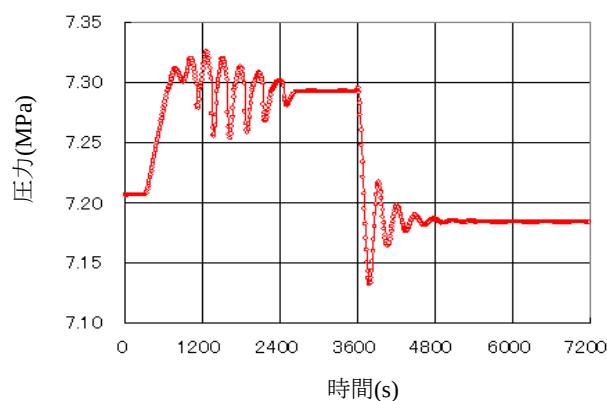


図 8 膨張弁入口圧力の過渡解析結果

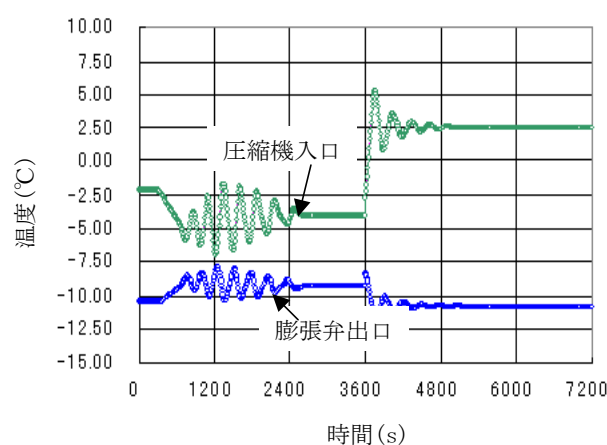


図 9 圧縮機入口と膨張弁出口の温度の過渡解析結果

6. まとめ

本稿では、気液二相流管路系非定常解析シミュレータ Advance/FrontNet/TP を基に開発した冷凍機器シミュレータを用いて行った冷凍機器シミュレーションの解析事例を紹介した。現在、多くの産業分野において数値シミュレーション技術が製品開発における実験に代替されつつあるように、冷凍・空調システム・機器開発の研究開発において気液二相流シミュレーションが重要な役割を果たすようになっている。

今後、機器コンポーネントの充実・高度化および GUI 機能の充実を図り、より使いやすいソフトウェアにしていきたい。

参考文献

- [1] 日本冷凍空調学会：自然冷媒プログラムソフト、
(2006)
- [2] ヒートポンプ・蓄熱センター：“ノンフロン技術
—自然冷媒の新潮流—”、オーム社、(2004)
- [3] <http://www.nist.gov/srd/nist23.cfm>
(2011/2/25 アクセス)
- [4] 日本機械学会：“機械工学便覧、B8 (熱交換器、
空気調和、冷凍)”、(1985)