

# 空調用冷凍サイクル設計技術の高度化

羽下誠司\* 玉木章吾†  
 山下浩司\*\* 竹中直史††  
 鳩村 傑\*\*\*

Advancement of Refrigeration Cycle Design for Air Conditioning

Seiji Haga, Koji Yamashita, Takeshi Hatomura, Shogo Tamaki, Naofumi Takenaka

## 要 旨

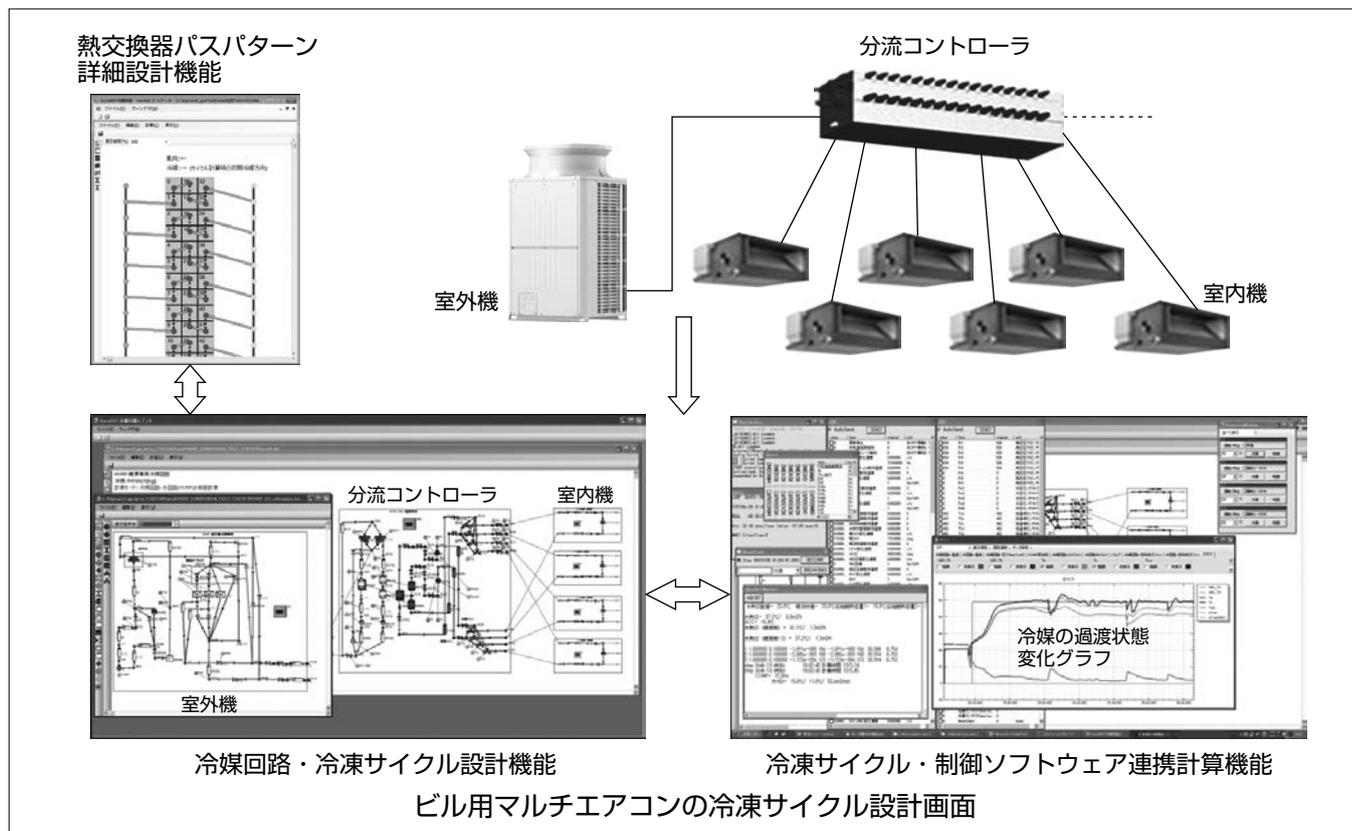
三菱電機では、家庭用エアコン霧ヶ峰を始め、ビル用マルチエアコンなど、冷凍サイクル(ヒートポンプ)を利用した空調機を全世界に向けて製造・販売している。空調機は、今までは日本などの温暖地域を中心に普及していたが、近年の世界的なCO<sub>2</sub>排出量の削減の動向や、新興国の経済成長を背景に、北米、北欧、ロシアなどの極寒地域や、インド、中東などのトロピカル(熱帯)地域へのニーズが高まっている。

従来極寒地域では、ストーブなど化石燃料を使用する暖房機器が普及していたが、最近のAPF(Annual Performance Factor: 通年エネルギー消費効率)が6以上の冷凍サイクル機器に置き換えることで、CO<sub>2</sub>排出量を削減できる。一方、日本などの温暖地域向けに設計した製品を、極寒地域やトロピカル地域へ出荷することはできない

ため、地域に特化した冷凍サイクルの再設計が必要となる。そこで課題となるのが、温度範囲の拡大・開発機種数の増大に対応した冷凍サイクル設計技術の高度化、効率化である。

この課題を解決するため、室外機、分流コントローラ、室内機などの冷媒回路をモジュール化し効率的に冷凍サイクルを設計するツール“dynaREF”を開発した。dynaREFは冷凍サイクルシミュレーションと制御ソフトウェアをパソコン上で連携させ、様々な外気温度、負荷条件での性能や冷媒制御をパソコン上で検討できる。

今後、dynaREFを活用することで試験の代替や設計手戻り削減が期待できる。さらに、ZEB(Zero Energy Building), ZEH(Zero Energy House), AI(Artificial Intelligence)など最新制御技術の早期検証ツールとして展開予定である。



## 空調機冷凍サイクル・冷媒制御設計ツール“dynaREF”の画面イメージ

ビル用マルチエアコンは、1つの室外機に分流コントローラを介して複数の室内機が接続されている。dynaREFでは、GUI(Graphical User Interface)ベースのエディタによって、室外機、分流コントローラ、室内機などの冷媒回路を部分的にモジュール化できる。それぞれのモジュールを再利用し、任意に組み合わせることで、様々な機種の冷媒回路モデルを構築できる。このGUIエディタをベースに、COP(Coefficient Of Performance: エネルギー消費効率)最大化設計、冷媒制御設計などが可能である。

## 1. ま え が き

当社では、家庭用エアコンの霧ヶ峰を始め、ビル用マルチエアコンなど、冷凍サイクル(ヒートポンプ)を利用した空調機を全世界に向けて製造・販売している。空調機は、今までは日本などの温暖地域を中心に普及していたが、近年の世界的なCO<sub>2</sub>排出量の削減の動向や、新興国の経済成長を背景に、北米、北欧、ロシアなどの極寒地域や、インド、中東などのトロピカル(熱帯)地域へのニーズが高まっている。

従来極寒地域では、ストーブなど化石燃料を使用する暖房機器が普及していたが、最近のAPFが6以上の冷凍サイクル機器に置き換えることで、CO<sub>2</sub>排出量を削減できる。一方、日本などの温暖地域向けに設計した製品を、極寒地域やトロピカル地域へ出荷することはできないため、地域に特化した冷凍サイクルの再設計が必要となる。例えば、高温外気地域では、冷媒をより高温、高圧で、極低温外気地域では、冷媒をより低温、低圧で使用する必要がある。国内仕様の製品よりも冷媒に対する耐圧性を向上させる必要がある。さらに、これらの地域向けの冷凍サイクルは高低圧差が増大するため、圧縮機を能力の高いものに変更したり、圧縮機の吐出温度が高くなりすぎないように、圧縮過程中の冷媒を冷却するインジェクション圧縮機などの高機能部品に変更したりするなどの対応が必要な場合がある。

このように空調機を様々な地域に特化するとすると、開発機種数を増大させ、今まで想定していなかった外気温度帯の設計に対応する必要がある。そのため、冷凍サイクル設計技術の高度化、効率化が課題となる。この課題を解決するため、室外機、分流コントローラ、室内機などの冷媒回路をモジュール化して効率的に冷凍サイクルを設計する機能や、冷凍サイクルシミュレーションと制御ソフトウェアをパソコン上で連携させ、様々な外気温度・負荷条件での性能や冷媒制御をパソコン上で検討する機能を実現した空調機冷凍サイクル・冷媒制御設計ツールdynaREFを開発した。

dynaREFの冷凍サイクル計算アルゴリズムは、当社で開発したものを使用しており、冷凍サイクルの静特性、動特性をシミュレーションすることができる<sup>(1)</sup>。また、今回開発した冷媒回路のモジュール化・再利用の機能によって、機種数が増大しても、同じモジュールを再利用したり、モジュール単位で組合せを選択したりすることで、一から回路モデルを作成することなく、効率的に冷媒回路の構築と冷凍サイクル設計計算を実施できるようになった(2章)。さらに、冷凍サイクルと制御ソフトウェアをパソコン上で連携させることで、実機試験前に制御ソフトウェアの検証・最適化ができるようになった(3章)。

## 2. 冷媒回路モデルのモジュール化と再利用性向上

### 2.1 GUIベースの冷媒回路エディタ

冷媒回路設計は、今までは研究部門又は機能設計部門の限られた専任者が担当していた。しかし、開発機種数が増大すると、限られた専任者の数では設計リソースが不足するため、一般の機能設計者でも容易に冷媒回路設計をできるようにし、設計リソース不足を解消する必要がある。そこで、一般の機能設計者でも容易に冷媒回路設計ができる環境として、図1に示すGUIベースの冷媒回路エディタを開発した。冷媒回路エディタによって、使い慣れている表計算ソフトウェアやプレゼンテーションソフトウェアと同様の操作性で冷媒回路の作図と編集が可能となり、一般の機能設計者でも容易かつ直感的に冷媒回路の作図と編集を行い、冷媒回路の改善検討ができるようになった。

さらに、冷媒回路データのモジュール化機能によって、冷媒回路を室外機、分流コントローラ、室内機などの単位でデータベース(又はひな形)を構築することが可能となり、冷媒回路の再利用性を向上させた。図2に、冷媒回路の室外機部分、室内機部分をモジュール化した例を示す。また、熱交換器、圧縮機、LEV(Linear Expansion Valve :

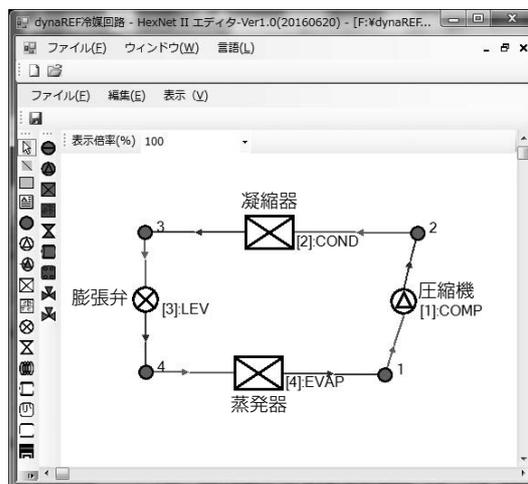


図1. GUIベースの冷媒回路エディタ画面

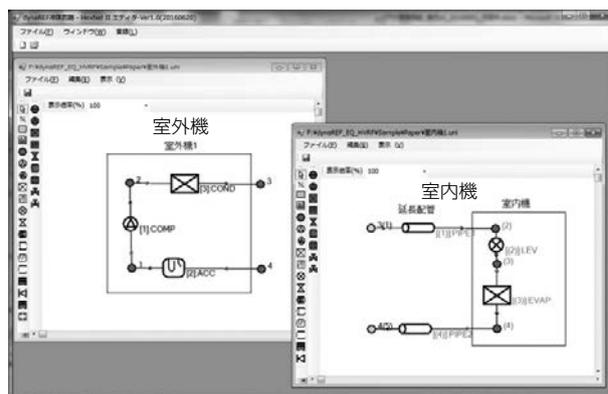


図2. 室外機と室内機の冷媒回路のモジュール化

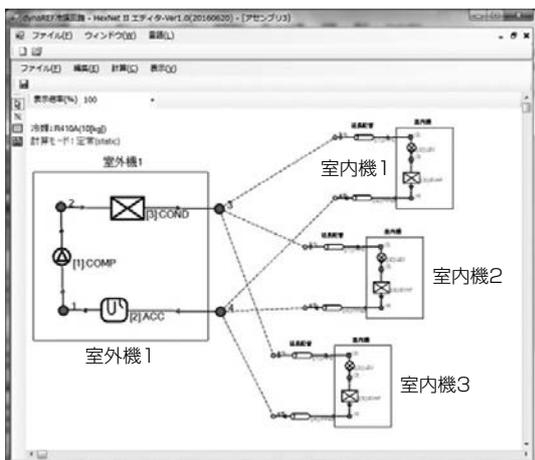


図3. モジュールを組み合わせた冷媒回路モデル例

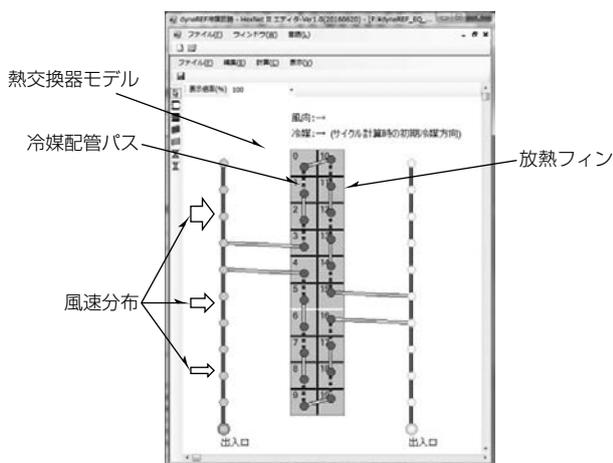


図4. 熱交換器の冷媒配管バス設計画面

電子膨張弁)などの性能データも型名ごとにデータベース化しており、冷媒回路図上で、容易に熱交換器、圧縮機、LEVの型名を変更して性能への影響を検討することができる。一方、ビル用マルチエアコンでは、室外機、室内機を任意に組み合わせることが可能となるため、客先の特定の物件に対応した構成を事前に性能評価することが容易に実現可能となった。図3に、1つの室外機モジュールに、複数の室内機モジュールを組み合わせたマルチエアコンの冷媒回路モデル例を示す。

さらに、熱交換器の冷媒配管バス設計と冷凍サイクルの連携シミュレーションも可能であり、熱交換器の冷媒配管バスや熱交換器前面の風速分布の違いが冷凍サイクルに与える影響も検討することができる(図4)。

### 2.2 COP自動最大化計算機能

冷凍サイクル設計の目的の1つは、COPを最大化する省エネルギー設計である。従来は多数の設計変数を手動で変化させ、パラメータサーベイによってCOPが最大となる設計変数の組合せを導出していた。この方法は、人によって変化させた設計変数、範囲、刻みが異なると、得られる設計解も異なる問題があった。

そこで、dynaREFでは、COPを自動最大化する機能を

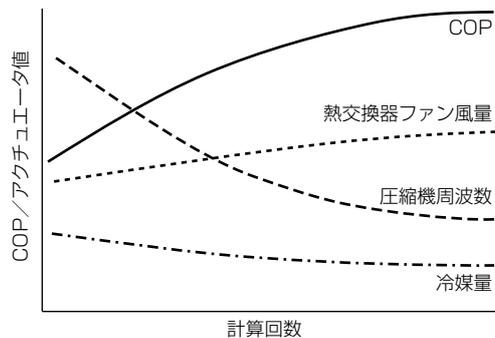


図5. COP自動最大化計算結果のイメージ図

開発した。冷媒回路のアクチュエータ(圧縮機周波数、熱交換器ファン風量、LEVパルス(キャピラリチューブ長さ)、冷媒量を設計変数として、COPに対する感度を計算してCOPが最大となるアクチュエータの数値の組合せを自動的に最適化することが可能となった。図5にCOP自動最大化計算結果のグラフのイメージ図を示す。このグラフから、COPを増加させるには、どのアクチュエータの値を増減させればよいか把握できる。

### 3. 冷凍サイクル動特性シミュレーション機能と制御ソフトウェアの連携

#### 3.1 背景

環境試験室による性能実験及び制御検証は、環境試験室の能力、サイズ(高低差)の制約によって、客先での設置状況・負荷を十分に模擬できず、出荷前の検証や客先での不具合再現が困難な場合がある。また、動作限界を見極めるために、実際よりも過酷な外気温度条件の検証も必要である。しかし、環境試験室によっては、そのような温度帯に対応していないものもある。

そこで、実機と同じ制御ソフトウェア(各機器の故障保護機能を含む)とdynaREFの冷凍サイクル動特性シミュレーション機能をパソコン上で連携させ、実機と同じ冷媒状態の過渡的な挙動をパソコン上で再現するシミュレーション環境を構築した。今まではパソコンの性能が低く、このようなシミュレーション環境を構築しても、実機による実験の方が早く結果を得ることができた。しかし、最近のパソコンの高性能化やCPUの並列化を背景に、パソコン上でのシミュレーションの方が、実機による実験より早く結果を得ることができるようになってきた。これによって、様々な外気温度・負荷条件や、様々な室外機、室内機などのユニットを組み合わせ、最適な制御定数の設計を実機試作前にパソコン上でバーチャルに検討できるようになった。

#### 3.2 冷凍サイクル動特性シミュレーション機能と制御ソフトウェアの連携の仕組み

冷凍サイクルの動特性シミュレーションは、1章で述べたように当社で開発したものをベースとして、冷房・暖房・停止モード切替え時の冷媒流れの停止・逆流に対応し

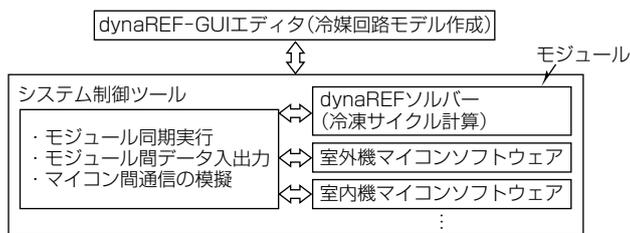


図6. dynaREFとシステム制御ツールの関係

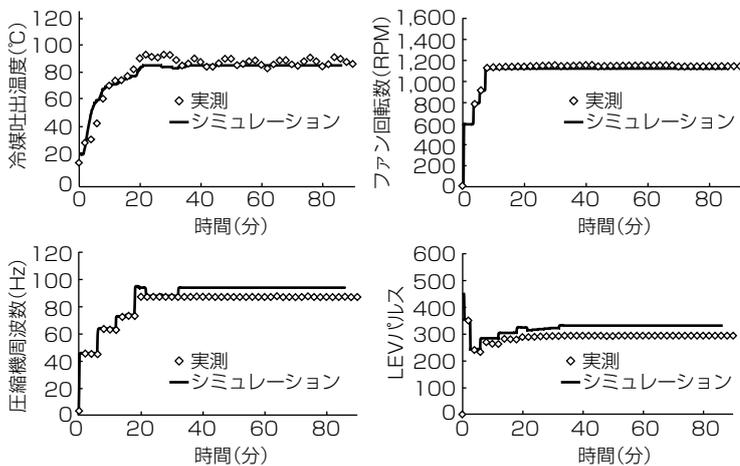


図7. 冷凍サイクル動特性シミュレーションと実測比較

た機能強化や計算速度の高速化を図るとともに、制御ソフトウェアと連携させるためのインタフェースを開発した。制御ソフトウェアでは、ROM化するソースコードそのものをパソコン上で設計検証できるように、制御基板をエミュレートする環境を構築した。さらに、冷凍サイクルの動特性シミュレーション機能と制御ソフトウェアの動作の同期及び室外機と室内機間のネットワーク通信を模擬する上位の“システム制御ツール”を開発した(図6)。この仕組みによって、制御マイコンソフトウェアを変更して、冷凍サイクルの動特性への影響を容易に確認することができるようになった。シミュレーション上で最適化した制御ソフトウェアは、ソースコードに手を加えなくても、そのままROM化することができるため、バグの作り込みを抑制することができるようになった。

また、システム制御ツールは、dynaREFのGUIエディタからシームレスにバックグラウンドで実行できるため、一般の機能設計者は、複雑な仕組みを理解しなくても、この機能を利用できる。

### 3.3 実測とシミュレーション結果の比較

圧縮機起動後の冷媒吐出温度、圧縮機周波数、ファン回転数、LEVパルスなどのアクチュエータの実測結果と解析結果の一例を図7に示す。

試験では、境界条件である外気温度(試験室温度)が周期的に変動しているのに対し、シミュレーションでは外気温度は理想的に一定としているため、冷媒吐出温度の過渡変化に若干の差異がみられるものの、冷凍能力に大きく影響

する冷媒吐出温度の立ち上がりや一定となる時間(時定数)、消費電力に大きく影響する圧縮機周波数とファン回転数の過渡変化がほぼ一致しており、COPの過渡変化を5%程度の精度で再現することを確認した。有効数字が二桁程度求められるCOPの計算では十分な精度である。

一方、シミュレーションの計算時間は、使用するパソコンのスペックにもよるが、例えばCPUとしてIntel社のXeon(注1) E5-2690 2.6GHz(2CPU, 12コア)を使用した場合、小規模の構成(室外機1台+室内機4台)では実際の試験時間の1/10、中規模の構成(室外機1台+分流コントローラ1台+室内機10台)であれば1/2、大規模の構成(室外機2台+分流コントローラ1台+室内機30台)であれば、同等の時間で計算できる。パソコンの性能が向上すれば、計算時間は更に短縮できる。今後は、このような単一系統(1つの閉じた冷媒回路で構成される系統)の製品が複数連携するような超大規模モデルに対応し、ビル丸ごとの空調の計算ができるように開発を継続している。

(注1) Xeonは、Intel Corp.の登録商標である。

## 4. む す び

今後の空調機の市場拡大が予想される極寒地域及びトロピカル地域の機種開発の高度化・効率化に対応した空調機冷凍サイクル・冷媒制御設計ツールdynaREFの開発について述べた。このツールは、国内設計者だけではなく、海外拠点の設計者へも展開して既に地域に特化した製品設計に適用を始めている。

今後、更に冷凍サイクルシミュレーションの高精度化・高速化を図り、試験検証項目をシミュレーションへ置き換えることによる開発工数削減も検討していく。また、ビル空調機全体のシミュレーションを可能とし、ZEB・ZEHの検証やIoT(Internet of Things)、AIによる新制御方式の早期検証ツールとしても活用していく予定である。世界的な低GWP(Global Warming Potential: 地球温暖化係数)化が加速しており、次世代冷媒の早期検証や水回路とのハイブリッド空調(Air To Water)の設計・検証ツールとしても展開予定である。

今後も更なる空調設計技術の高度化を継続し、地域に特化した省エネルギー性、快適性、品質が高い空調製品を迅速に市場に提供していく。

## 参 考 文 献

- (1) 畝崎史武, ほか: 非共沸混合冷媒を用いた蒸気圧縮式冷凍サイクルの動特性計算モデル第1報: 非共沸混合冷媒に対応した汎用計算モデル, 日本冷凍空調学会論文集, 18, No.3, 321~330 (2001)