

外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発（その182）
 中央式熱源機器の新規機器特性と動特性

Development of an Integrated Energy Simulation Tool for Buildings and MEP Systems, the BEST (Part 182)
 Equipment Characteristics of New Central Plant Components for HVAC and Dynamic Performance Model

正会員 ○品川 浩一（日本設計） 特別会員 村上 周三（建築環境・省エネルギー機構）
 技術フェロー 石野 久彌（首都大学東京名誉教授） 正会員 澤田 佳也（中部電力）
 正会員 川津 行弘（日本設計）

Koichi SHINAGAWA *¹ Shuzo MURAKAMI *² Hisaya ISHINO *³

Yoshinari SAWADA*⁴ Yukihiro KAWAZU *¹

*¹ Nihon Sekkei, Inc. *² Institute for Building Environment and Energy Conservation

*³ Tokyo Metropolitan University *⁴ Chubu Electric Power Co., Inc.

In this part 182, heat recovery unit (modular water to water heat pump with scroll compressor controlled by variable-frequency-drive) is investigated and formulated as additional equipment. And dynamic performance model of central plant equipment using the single time constant regressive approximation is proposed. Sequential order and the time steps of central plant components is used to represent single time constant regressive approximation, because equipment for which dynamic performance must be considered is that with a large thermal load.

はじめに

BEST では設計・シミュレーションで求められる空調機器のニーズに配慮し、2006 年より機器特性 SWG にて一連の標準的な機器の特性を調査、定式化やマップデータ化を行っており、その結果は BEST 機器特性マニュアルや平成25年度省エネ基準対応ツールのマニュアルとして公開している。機器特性データベースは、定格性能・中間性能といった静特性に関して、汎用的に使われている機器・システム、省エネルギー性能に優れたものを優先的に調査・データベース化を行ってきた。また、動特性に関しては機器の最低負荷率以下の ON/OFF 運転を繰り返す低負荷域の特性について検討・整備した。¹⁾

本報では、新規調査した空冷ヒートポンプチラー（スクロール圧縮方式、インバータ+モジュール制御）の機器特性と、中央式熱源の代表的な機器（ターボ冷凍機、空冷・水冷ヒートポンプチラー・吸収式冷凍機）に関して、機器

起動および機器停止シーケンスを調査し、動特性としての利用法についての検討結果を報告する。

1. 機器特性データ構造

表-1 に BEST における機器特性データの分類を示す。BEST では、機器特性を表現するために、3つのデータセットを組み合わせる考えに従い、特性モデルを構築している。静特性としては、「定格性能特性データ」および「中間性能特性データ」、動特性としては「動性能特性データ」である。²⁾

図-2 に、BEST における機器特性データの表現方法のイメージを示す。中間特性性能は、グルーピングされたパターン別（例えば、電動圧縮機形式、高効率・高期間効率型など）の特性データである。動特性性能も代表的な機器について調査し、特性のパターン化について検討した。

表-1 機器特性データの分類

分類	特徴	適用する
定格性能特性データ	負荷率100%時やJIS条件下での特定条件下での機器性能を示すデータ。	メーカーカタログ、機器表に記載された機器仕様など
中間性能特性データ	定格時以外の様々な条件下での機器性能を示すデータ。	中間負荷や中間期での機器性能、過負荷時やレンジ外での機器性能を含む（機種毎の代表値）
動特性データ	比較的短時間に限定された機器の特性を示したデータ。	大型冷凍機の起動時及び停止時の能力特性など（機種毎の代表値）

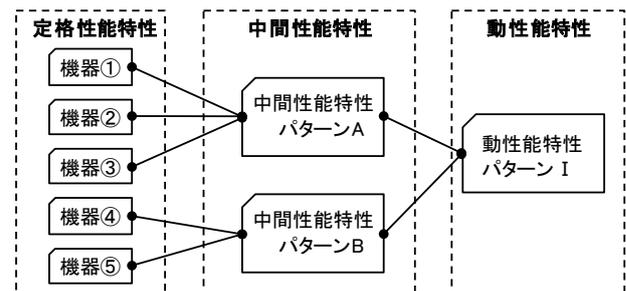


図-1 機器特性データの組み合わせのイメージ

2. 空冷ヒートポンプチラーの新規機器特性

近年普及が進んでいる空冷ヒートポンプチラー（スクロール圧縮方式、インバータ+モジュール制御）は、他熱源で汎用的に利用していた定式化による機器特性整備ではなく、外気条件、出口温度設定、部分負荷に関するマップ格子点データを用いて機器特性を整理した。表-2に定格能力時の冷温水出入口水温および外気条件を、図-2に入出力モデルを、図-3に空冷ヒートポンプチラーの計算フロー、図-4にマップ格子点データの適用範囲を、図-5にマップ格子点データを示す。

空冷ヒートポンプチラーは、出口水温設定・外気温湿度条件によって、機器の最大能力が変化する。入口水温、設定水温、冷水量によってもとまる要求能力（装置負荷）が、運転状態における最大能力を超える場合は、計算フローに示すよう、繰返し計算を行い出口温度が設定温度を満足しないことになる。

本調査の空冷ヒートポンプの部分負荷特性カーブは、冷温水温度によって同じ形となっていない。冷却運転時の出口温度15℃の場合は、他のケースと異なり、最もCOPが高い部分負荷効率が変化している。これは、汎用区間を細かくした定式化では再現が困難である。つまり、機器特性データを定式化ではなくマップ格子点データとして整備することで、汎用性・拡張性が高いデータベースとなったといえる。

表-2 空冷ヒートポンプチラーの定格条件(JIS B 8613-1994)

	冷温水(°C)		外気条件(°C)	
	入口水温	出口水温	乾球温度	湿球温度
冷房運転(冷却条件)	12±0.3	7±0.3	35±0.5	24±0.5
暖房運転(加熱条件)	40±0.3	45±0.3	7±0.5	6±0.5

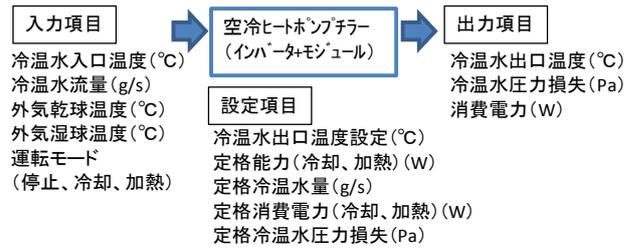


図-2 空冷ヒートポンプチラーの入出力モデル

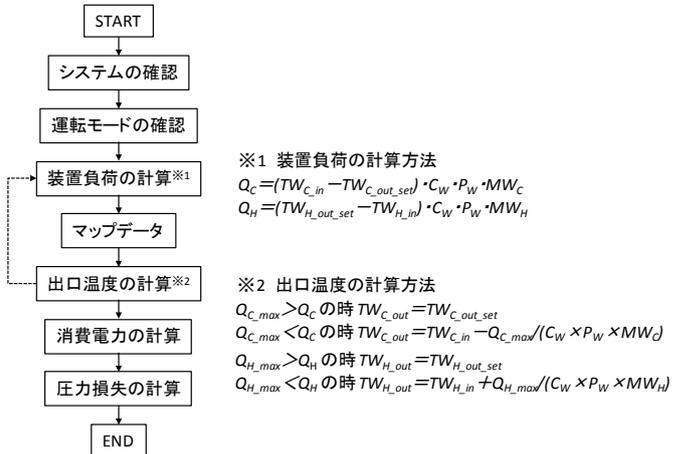


図-3 空冷ヒートポンプチラーの計算フロー

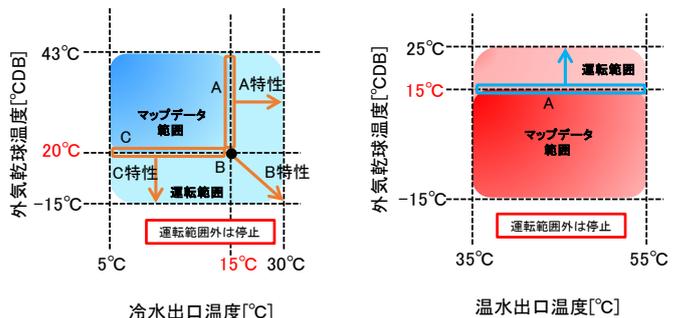


図-4 マップ格子点データ適用範囲

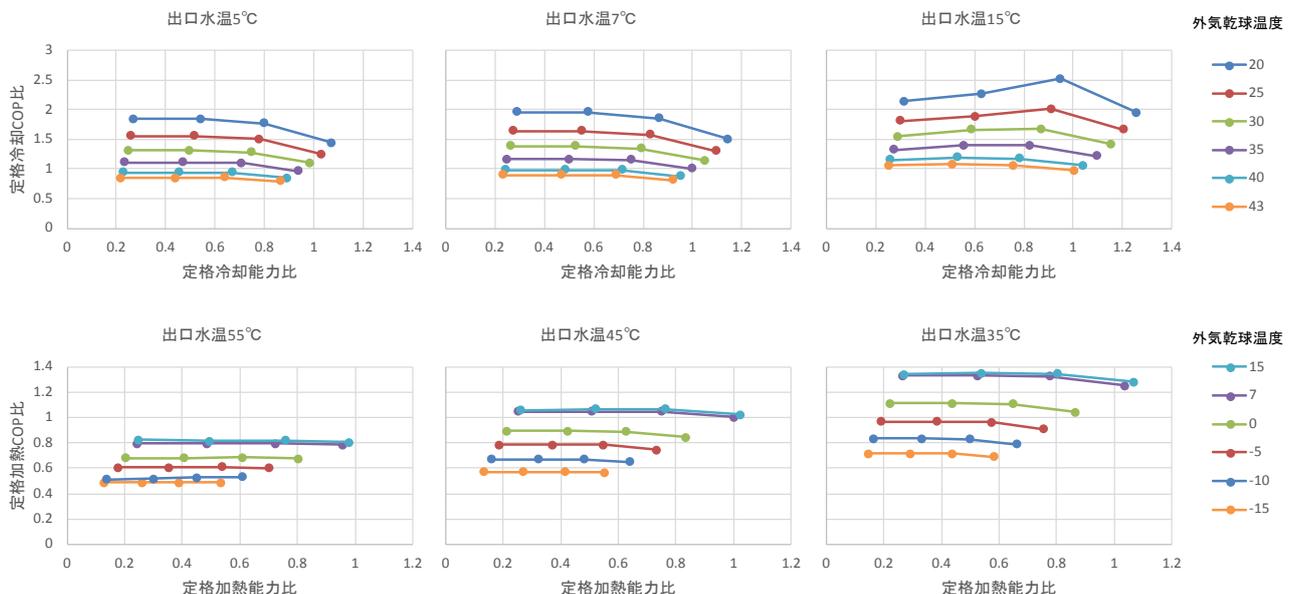


図-5 空冷ヒートポンプチラーのマップ格子点データ

3. 動特性について

BESTにおける熱源機器特性は、機器の負荷率、入口温度、水量（風量）等を引数として、エネルギー消費、能力等を求める近似式やマップ格子点データによる静特性を中心に調査をおこなってきた。連続運転中の熱容量による動特性は影響がないと仮定すれば、影響の大きな動特性としては、容量制御以下の低負荷時における ON/OFF 運転と、コールドスタート時の起動時・停止時の遅れ特性である。この起動・停止・再起動の特性が機種タイプ毎に出来れば共通の関数で表現することが可能となる。そこで、中央熱源を対象とした起動・停止・再起動の経過時間をパラメータとした動特性調査をおこなった。

3.1 動特性調査概要

日本冷凍空調工業会の製品委員会（ターボ冷凍機、チリングユニット・吸収式冷凍機）に対して、熱源機器および熱源補機に関する起動時・停止時における運転シーケンスを調査した。表-3に運転シーケンスと動特性のイメージを示す。機器起動特性として、各機器の起動シーケンス、立ち上がり時間、整定時間、むだ時間を、安全装置による保護措置として、再起動防止タイマー、停止後の残運転などの調査を行った。また、クランクケースヒーター等の停止時における消費電力についても調査をおこなった。ただし、計装電源など冷温熱製造に直接係らない電源は対象外とした。なお、電動系冷凍機における圧縮機、吸収式冷凍機における加熱源消費といった主たるエネルギー消費に加え、ターボ冷凍機における油ポンプ、吸収式冷凍機における燃焼用ファンといった熱源機内の補機電気消

費についても調査をおこなった。それらの結果から、熱源起動および停止時の動特性として整備すべき項目を検討した。

3.2 起動時および停止時シーケンス

表4にターボ冷凍機、チリングユニット・吸収式冷凍機における起動時および停止時シーケンスの調査結果を

表-3 運転シーケンスと動特性のイメージ

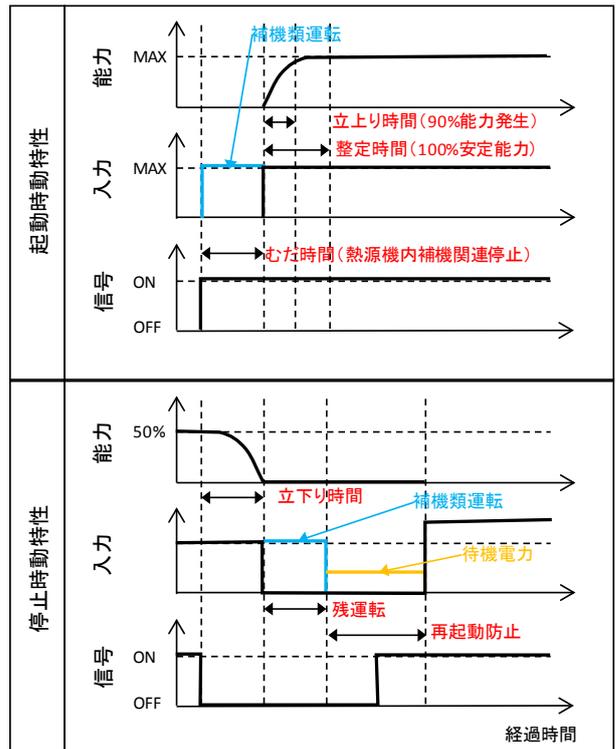


表-4 起動時・停止時の運転シーケンス

起動時シーケンス			停止時シーケンス		
チリングユニット	ターボ冷凍機	吸収式冷凍機	チリングユニット	ターボ冷凍機	吸収式冷凍機
運転指令ON	運転指令ON	運転指令ON	停止指令OFF	停止指令OFF	停止指令OFF
↓	↓	↓	↓	↓	↓
一次P起動	一次P起動	一次P起動	停止準備	停止準備	停止準備
↓	↓	↓	↓	↓	↓
冷却水P起動	冷却水P起動	冷却水P起動	圧縮機停止	圧縮機停止	バーナー停止
↓	↓	↓	↓	↓	↓
圧縮機起動	油P起動	吸収/冷媒P起動	冷却水P停止	冷却水P停止	吸収/冷媒P停止
↓	↓	↓	↓	↓	↓
100%能力	圧縮機起動	バーナー起動	一次P停止	一次P停止	CDP停止
	↓	↓	↓	↓	↓
	100%能力	100%能力	冷凍機停止	油P停止	一次P停止
			↑※待機電力	↑※待機電力	↑※再起動防止は不要 ※待機電力は無し
			再起動防止	再起動防止	

示す。チリングユニットは、空冷・水冷共にほぼ同じシーケンスであり、一次ポンプと同時に起動/停止する冷却水ポンプが追加となっているだけである。なお、起動時シーケンスにかかる時間間隔に関するヒアリングは、機器が周囲温度とほぼ同じであるコールドスタート、停止時シーケンスは50%の部分負荷運転時からの停止のための時間間隔を対象とした。

待機電力に関するヒアリング結果では、電動系熱源における冷却能力に比例したクランクケースヒーターが影響が大きく、待機電力原単位について整理した。

3.3 起動時・停止時の能力変化の定式化

圧縮機起動または吸収式冷凍機の加熱源入熱開始後の動特性を詳細にシミュレートすることは、HVACSIM や MATLAB にあげられるよう、機器の各構成要素の運転シーケンス・制御を考慮した物理モデルで考えるべきである。しかし、BESTの主たる目的は、建物全体のエネルギー消費量を算出することであり、熱源機器などの部分的なシステムを詳細に再現することではない。よって、モデル化による簡易な動特性を考慮した計算方法を導入することで、種々の影響が検討することが重要である。そこで、各熱源機器の圧縮機起動または入熱開始後の能力変化の動特性を、時定数を用いてモデル化するものとする。また、停止時の能力変化も同様に時定数を用いた。表-5に能力変化をモデル化した動特性を示す。

図-6に時定数による起動時および停止時の能力変化の動特性を示す。ヒアリング結果から、冷凍機内部の熱容量に応じたグルーピングを想定し、時定数をそのグルーピング毎に変更することで、熱源種の動特性を再現することが出来る。

4. 今後の課題

BESTで行っている中央式熱源機器特性の整備状況に関して報告した。現在、定式化した機器特性のプログラム化および計算方法の整理を進めている状況である。以下、機器特性に関する今後の課題を示す。

①他の動特性データの整備

冷温水の外部空間への放熱ロスについては、蓄熱槽・貯湯槽といったモジュールにとどまっている。建物内外の配管における放熱ロスも熱源起動時における影響が高いことから、調査や定式化が重要である。ただし、ユーザーが配管全てを入力することは、設計検討ツールとしては困難であるため、建物全体の配管水容量のモデル化を含め検討が必要である。

②新規機器の特性調査と定式化

省エネルギー性能の高い、新しい機器やシステムに関しては、継続的に特性調査や定式化を行っていくことが必要である。

表-5 起動時および停止時の能力変化の動特性

1) 起動時の動特性
$R_{ON} = 1 - \exp(-t_{ON}/T_{ON})$
ここで、 R_{ON} : 起動時能力比率、 t_{ON} : 入熱開始後の経過時間、 T_{ON} : 起動停止動特性のための時定数
2) 停止時の動特性
$R_{OFF} = PLF_{OFF} \times \exp(-t_{OFF}/T_{OFF})$
ここで、 R_{OFF} : 停止時能力比率、 PLF_{OFF} : 停止時機器負荷率、 t_{OFF} : 圧縮機停止、入熱停止後の経過時間、 T_{OFF} : 起動停止動特性のための時定数

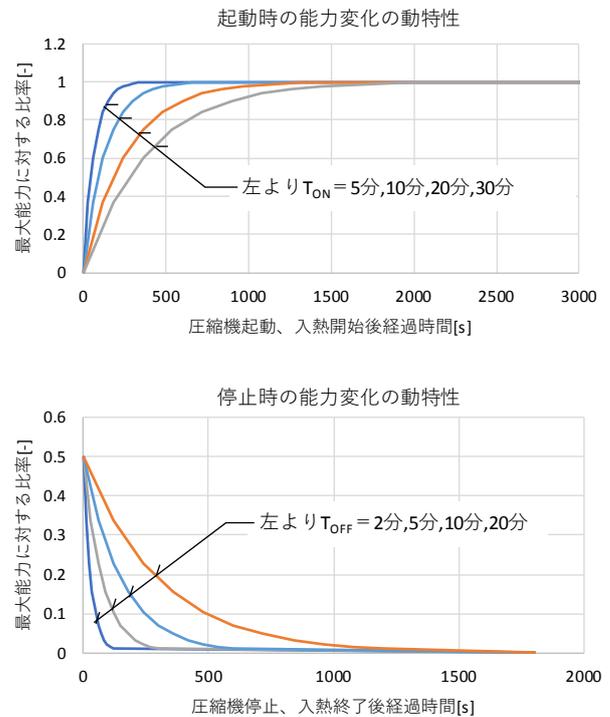


図-6 起動時および停止時の熱源機器動特性

【謝辞】

本研究は、一般財団法人建築環境・省エネルギー機構内に設置した産官学連携による環境負荷削減のための建築物の総合的なエネルギー消費量算出ツール開発に関する「BEST コンソーシアム」・「企画開発委員会(村上周三委員長)」および専門版開発委員会(石野久彌委員長)、統合化WG(石野久彌主査)、機器特性SWG(品川浩一主査)の活動成果の一部である。また、本研究の機器特性を整理するに当たり、特に、一般財団法人日本冷凍空調工業会には多大なるご助力を賜った。関係各位に謝意を表す。

機器特性 SWG 名簿(順不同) 主査: 品川 浩一 (日本設計)、幹事: 藤居 達郎(日立製作所) 委員: 阿部 裕司(竹中工務店)、石野 久彌 (首都大学東京名誉教授)、工月 良太、吉田 拓也 (東京ガス)、澤田 佳也、鈴木 正和 (中部電力)、野原 文男、丹羽 勝巳、大浦 理路 (日建設計)、比嘉 盛嗣 (東邦ガス)、柳井 崇、川津 行弘 (日本設計)、事務局: 生稲 清久 (建築環境・省エネルギー機構)

参考文献

- 品川ほか、外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その139) 空調熱源の低負荷機器特性のエネルギー解析、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、2014.9
- 柳井ほか、外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その88) 機器特性の整備状況と今後の課題、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、2011.9