

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162) 空調システム関連の整備状況と放射パネルモジュール

Development of an Integrated Energy Simulation Tool for Buildings and MEP Systems, the BEST (Part162) Status of Development of MEP Simulation Environment, and Radiant Panel Module

技術フェロー ○長井 達夫 (東京理科大学) 正会員 二宮 博史 (日建設計)
正会員 飯田 玲香 (日建設計) 技術フェロー 石野 久彌 (首都大学東京名誉教授)
特別会員 村上 周三 (建築環境・省エネルギー機構)

Tatsuo NAGAI*¹ Hiroshi NINOMIYA*² Reika IIDA*² Hisaya ISHINO*³ Shuzo MURAKAMI*⁴

*¹Tokyo University of Science *²Nikken Sekkei Ltd.

*³Emeritus Prof., Tokyo Metropolitan University *⁴Institute for Building Environment and Energy Conservation

This paper reports the status of the development in 2014 of HVAC simulation environment in an energy simulation tool, the BEST. We introduced several new features such as utility module for advanced controls, physical model for a radiant panel, and so on. Among those newly introduced functions, we especially focus on description of the outline of a mathematical model for a radiant panel without thermal inertia installed in a room.

はじめに

BEST 専門版の設備システム計算は、モジュールを基本とした計算フレームワークに従って構築されており、現在でも、種々のシステムに対応すべく拡張が図られつつある。本報では、2014年度における専門版の空調分野における整備・開発状況について報告し、中でも、天井放射パネルモジュールの計算アルゴリズムについて詳述する。

1. 2014年度の整備状況

2014年度の整備・開発項目のうち、主要なものを以下に挙げる。

- 1) 入力データや計算時のチェック機能の強化
- 2) 二次側空調機器(パッケージマルチ式の室内機、PAC、VAVユニットなど)のゾーンとの接続改良
- 3) 二方弁一体型の空調機器モジュールの開発
- 4) 共通スケジュールへの空調制御モジュールの対応
- 5) 二次側制御弁の流量監視モジュール
- 6) デマンドレスポンス制御(DR制御)へのモジュールの対応
- 7) 省エネ基準対応ツール等による作成データのインポート機能
- 8) 放射パネルモジュールの開発
- 9) その他、マニュアル整備等

1) のチェック機能の強化では、入力データや計算時の不具合などのチェックとして、AHUと接続VAVの合計風量の整合性、2次ポンプの送水量と接続AHUの合計水量との整合性等をチェックし、結果をメッセージとして

ログ出力する機能を追加した。

2) の二次側空調機器とゾーンとの接続改良では、これまで、二次側機器のSAやRAのゾーンへの受渡しは、ゾーンへの仲介モジュールをまず登録し、それに二次側機器のSAやRAを別々に接続(シーケンス接続)していた。これらの設定作業の負荷を軽減し、媒体ノードの接続もれや接続間違いを回避する目的で、二次側空調機器とゾーンとの関連付けを、二次側空調機器が対象とする「ゾーン」名を指定するだけで完了となる機能を新たに追加した。なお、空調機器設定画面においてゾーン名を指定しなかった場合には、従来の設定方法を有効と判断し、SAとRAをそれぞれ接続する方法により情報をゾーンへ受け渡すことになる。

3) の二方弁一体型モジュールについて、加湿器、冷温水コイル、FCUや熱交換器などの制御は基本的に、①PID制御モジュール、②二方弁モジュール、③加湿器・熱交換器等のモジュール、の3つのモジュールで構成し制御を行っていた。今回、二方弁モジュールの機能を機器モジュールに組込んだ「制御弁付き機器モジュール」を開発し、重複した入力項目の入力箇所を統一するとともに、制御弁と機器とのノード接続作業を無くすなど、入力作業の軽減を図った。また、モジュール数が減ることにより計算時間も若干短くなっている。

図1に加湿器周りの制御の例を示す。従来は、PIDモジュールからの操作量を受け取った二方弁モジュールは、最大・最小水量の範囲内で加湿器に給水量という情報を受け渡し、加湿器は与えられた給水量と加湿前のSA

状態のもと、成り行き加湿後の SA 状態を算出し、給気側へ出力するようになっていた。今回追加した二方弁付加湿器モジュール（図右）では、二方弁と加湿器の両方の機能を持たせた 1 つのモジュールに統合化することにより、モジュール数および接続の手間の低減を図った。ただし、複数のモジュールの統合化はシステムの自由度を損なう一面もあるため、従来の二方弁モジュール、加湿器モジュールも使用可能としている。

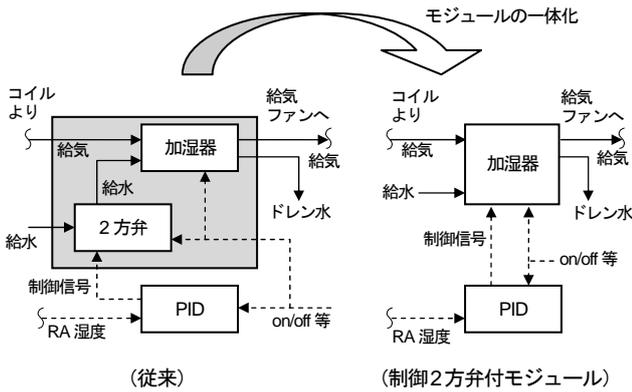


図-1 制御2方弁付モジュールの例（加湿器）

4) の共通スケジュールへの空調制御モジュールの対応では、今まで空調時間の設定等は設備側のモジュール（空調制御モジュール）でその時間帯等を設定していたが、BEST 専門版の入力画面上で設定した共通の時刻変動スケジュール名を指定できるようにした。

5) の二次側制御弁の流量監視モジュールは、VAV 方式の温度補償制御を行う VAVFan 制御モジュール（VAV ユニットの合計風量を算出すると同時に、VAV ユニットの最大・最小風量となっているものがないか判定し、給気温度のリセット値を算出する）と同様の機能をもつ、VAV 方式の制御弁を対象とした流量監視モジュールである。対象の送水系統内の空調機や FCU の冷温水コイルの二方弁の流量情報（開度に相当）を受け取り、送水温度の補償に用いることができる。

6) のデマンドレスポンス（DR）制御への対応について、DR 制御に関する「親」モジュールと、熱源、空調機等の機器からなる「子」モジュールを設定し、「親」モジュールでは、外気温度、受電電力に関する閾値を指定することで何段階かのレベルを定義し、「子」側のモジュールでは、親から受け取ったレベル信号ごとの各種設定値を指定することで、建物全館にわたってレベルごとの環境緩和を模擬できる。図 2 に、受電電力の大きさによって、熱源の送水温度設定値と室温設定値を同時に変化させていく場合の例を示す。熱源制御では、送水温度設定値の他、熱源の発停も制御できる。デマンドレスポンス制御については、その 166, 167 において詳述する。

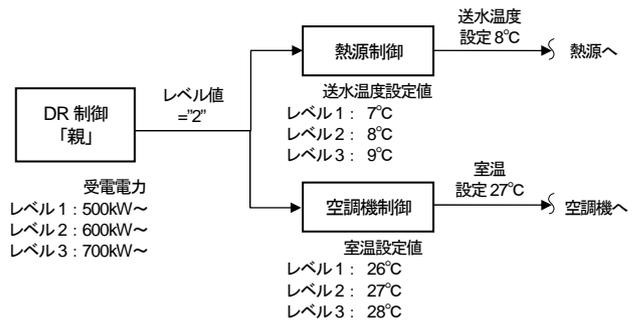


図-2 デマンドレスポンス制御の例
（受電電力が 600~700kW の場合）

7) のインポート機能は、専門版よりも入力が簡易な省エネ基準対応ツール（入力イメージを図 3 に示す）で作成した物件データを専門版に移すことができる機能である。各ゾーンの形状や外皮仕様、設備構成・仕様を省エネ基準対応ツールで作成した後、実行し、出力された計算結果（圧縮データ）を専門版からインポートする。今のところ、パッケージシステムのみでの対応であり、また専門版からはテンプレート（複数のモジュールをパッケージ化したもの）の形では見えない、といった改善点があるものの、使いやすいユーザーインターフェースと汎用性・拡張性の両立という点で、今後も継続して整備を行っていきたい機能である。

8) の放射パネルモジュールについては次節で詳しく述べる。

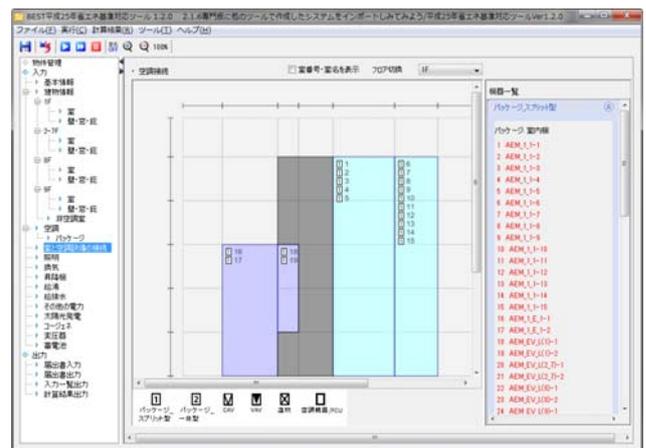


図-3 省エネ基準対応ツールによるパッケージ入力画面例

2. 放射パネルモジュール

2.1 概要

ここで対象としている放射パネルは、躯体埋め込み式ではない、熱容量の小さな放射パネルで、かつ両側が空気に接している場合を対象としている。住宅用の床暖房

用温水パネルのように床等の部位に接して設けられる場合には、その部位の熱容量が無視できるときには、部位全体を熱抵抗を有するパネルと見なすことにより適用できるが、部位の熱容量が無視できない場合には適用できない。一方、室内に独立して設けられる放射パネルも対象としている。

放射パネルのモデル化の方法として、配管やパネルの材質・形状から演繹的に伝熱量を計算する方法もあるが(文献¹⁾等)、ここで採用した方法は、パネルの放熱特性を示した試験結果から帰納的にマクロな伝熱係数を算出するものである(文献²⁾等)。この方法によつたのは、パネルの詳細仕様を計算者が知ることは難しく、パネルメーカーから入手できる特性データから入力値を決定できる方が実用的と考えたためである。

パネルと隣接空気および他表面との間の伝熱モデルを図4に示す。隣接する2つのゾーンから室温、パネル用平均表面温度 AST_p を受け取り、また、冷温水入口温度・流量を与条件として、各ゾーンへの対流・放射熱量と冷温水出口水温を算出する。

前処理において、特性データ(実測値)をもとに冷温水からパネルに至る実質的な熱抵抗値 R_{w-p} を推定した後、その熱抵抗値を用いて時々刻々の計算を行う。なお、パネルの断面方向・平面方向の温度分布、及び流速の変化によるパネル熱コンダクタンスの変化は無視できるものとする。

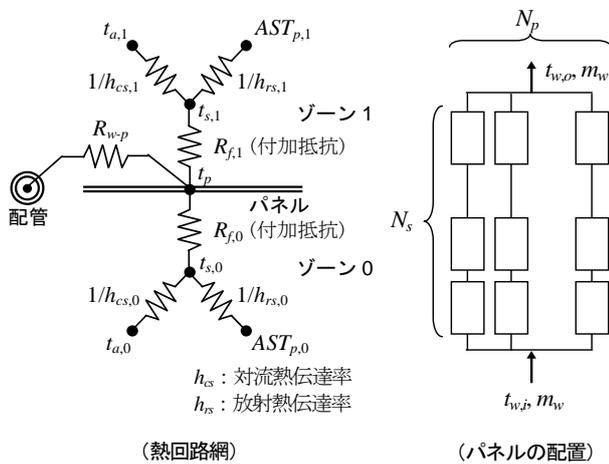


図-4 放射パネルの伝熱モデルと配置 (記号は表1参照)

2.2 放射パネルの熱交換モデル

放射パネル1直列系統あたりの放熱量 q_p は下式で表わされる。

$$q_p = N_s A_p / R_{w-otp} \cdot \Delta t_{w-otp} = c_w (t_{w,i} - t_{w,o}) \quad [\text{W}] \quad (1)$$

ここで、

$$R_{w-otp} = R_{w-p} + \frac{1}{1/R_0 + 1/R_1} \quad [(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}] \quad (2)$$

$$\Delta t_{w-otp} = \frac{t_{w,i} - t_{w,o}}{\ln \left\{ \frac{t_{w,i} - ot_{p,2}}{t_{w,o} - ot_{p,2}} \right\}} \quad [\text{K}] \quad (3)$$

$$c_w = c_{pw} m_w / N_p \quad [\text{W}/\text{K}] \quad (4)$$

$$R_0 = R_{f,0} + \frac{1}{h_{cs,0} + h_{rs,0}} \quad [(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}] \quad (5)$$

$$ot_{p,2} = \frac{1/R_0 \cdot ot_{p,0} + 1/R_1 \cdot ot_{p,1}}{1/R_0 + 1/R_1} \quad [^\circ\text{C}] \quad (6)$$

$$ot_{p,0} = \frac{h_{cs,0} t_{a,0} + h_{rs,0} AST_{p,0}}{h_{cs,0} + h_{rs,0}} \quad [^\circ\text{C}] \quad (7)$$

また、 $R_1, ot_{p,1}$ は、それぞれ式(5)、(7)と同様である。

式(1)、(2)の R_{w-otp} は、水から2ゾーン全体の環境温度 $ot_{p,2}$ に至る熱抵抗であり、 R_0, R_1 は、パネルから各ゾーンの環境温度 $ot_{p,0}, ot_{p,1}$ に至る熱抵抗である。式(1)、(3)の Δt_{w-otp} は、水温と2ゾーン全体の環境温度 $ot_{p,2}$ との間の対数平均温度差である。パネルを横断する方向のパネル自体の熱抵抗は無視し、 $R_{f,0}, R_{f,1}$ によってパネルの付加熱抵抗を考慮する(断熱材で裏打ちされた放射パネル等に対応)。

2.3 放射パネルモジュールの入出力

放射パネルの計算モデルをモジュール化した場合の入出力を表1に示す。ここで、「パラメータ」とは、パネルの仕様等、時間とともに変化しない固定値であり、一方、「入力」とは一般には時々刻々変化するものである。

また、パラメータ中の試験時の熱コンダクタンス $K_{w-otp,t}$ とは、図5に示すような性能線図から読み取って設定することを想定している。性能線図の中に、両側空間(居室側と天井裏等)の平均温度を「室温」としている特性がある場合は、そちらの特性を採用する。図5の例では実線の特性を採用し、パラメータ中の $inc_{f,0}, inc_{r,1}$ というフラグをともに「True」に設定することによって、試験時の「室温」が式(6)の $ot_{p,2}$ に相当することを指示する。もし、「室温」が片側のみの温度の場合には、例えば

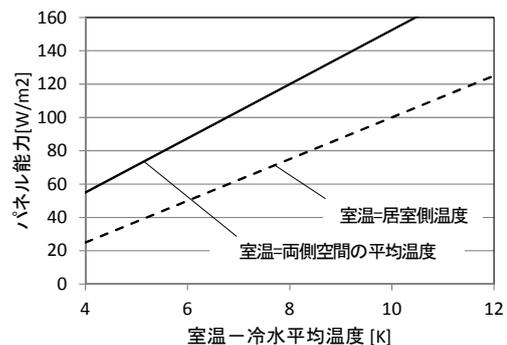


図-5 放射パネルの特性データ(例)

表-1 放射パネルモジュールの入出力変数一覧

パラメータ:	入力:
A_p : パネル 1 枚あたり面積 [m ²]	$t_{w,i}$: パネルシステム全体の入口水温 [°C]
N_p : パネル並列系統数	m_w : パネルシステム全体の入口流量 [g/s]
N_s : パネル直列接続数	$t_{a,0}, t_{a,1}$: 室内空気温度 (ゾーン 0, 1) [°C]
c_{pw} : 水の比熱 [J/(g·K)]	$AST_{p,0}, AST_{p,1}$: パネル用平均表面温度 (ゾーン 0, 1) [°C]
$R_{p,0}, R_{p,1}$: 固定付加熱抵抗値 [m ² K/W]	$mode$: 運転時の冷暖モード ('cooling': 冷房、'heating': 暖房)
ϵ_0, ϵ_1 : パネル両面の長波放射率 [-]	出力:
h_{cs} : パネル面の熱伝達率 [W/(m ² ·K)] (冷却、加熱に対する、上向面、下向面、垂直面の計 6 つの値)	$t_{w,o}$: パネルシステム全体の出口水温 [°C]
$face_0, face_1$: 両面の向き ('up': 上向き、'down': 下向き、'vertical': 垂直)	m_w : パネルシステム全体の出口流量 [g/s]
K_{w-opp} : 試験時の熱コンダクタンス (パネル単位面積あたり) [W/(m ² ·K)]	$q_{cs,0}, q_{cs,1}$: パネルシステム全体からの対流放射熱量 (ゾーン 0, 1) [W]
$inc_{r,0}, inc_{r,1}$: 両側の温度が、性能線図の横軸 (室温-水温) の「室温」に含まれるか否かのフラグ	$q_{rs,0}, q_{rs,1}$: パネルシステム全体からの放射量 (ゾーン 0, 1) [W]
$mode_t$: 試験時の冷暖モード	$t_{s,0}, t_{s,1}$: パネル表面温度 (ゾーン 0, 1、断熱材等がある場合その室内側表面) [°C]

それが居室側 (ゾーン 0 とする) として、 $inc_{r,0}="True"$, $inc_{r,1}="False"$ とすることによって、「室温」が式(7)の $ot_{p,0}$ であることを指示する。この場合、「False」側 (天井裏側) 空間との熱流は試験時 (性能線図取得時) には生じていないものと仮定する。

対流熱伝達率については、収束計算を避けるため、冷暖モードとパネル面の向きから、熱流方向に応じた固定値 (パラメータとして指定) を用いることとした。

2.4 計算手順

(1) 前処理計算

式(2)において $R_{w-opp} = 1/K_{w-opp,t}$ とおき、水からパネルに至る等価熱抵抗値 R_{w-p} を算出し記憶する。

$$R_{w-p} = \frac{1}{K_{w-opp,t}} - \frac{1}{1/R_0 + 1/R_1} \quad (8)$$

R_0, R_1 については、試験時の $h_{cs,0}, h_{cs,1}$ を用いて式(5)等から求める。パネル性能線図の横軸 (室温) が片側の温度 (ここでは $ot_{p,0}$ とする) の場合、もう一方の側との熱交換はない ($R_1 \rightarrow \infty$ と同等) として R_{w-p} を算出する。

(2) 時間ループ計算

① 水から環境温度に至る熱抵抗 R_{w-opp} の算出

式(2)より算出する。 R_0, R_1 については、運転時の $h_{cs,0}, h_{cs,1}$ を用いて式(5)等から求める。

② パネル 1 直列系統あたり放射熱量 q_p の算出

式(1)の第二式=第三式が成り立つように収束計算を実施し、出口水温 $t_{w,o}$ を求める。求めた $t_{w,o}$ をもとに式(1)より q_p を算出する。

③ 等価パネル温度 t_p 、パネル両側表面温度 $t_{s,0}, t_{s,1}$ の算出

式(9), (10)より算出する。 $t_{s,1}$ の算出は式(10)と同様である。

$$t_p = ot_{p,2} + \frac{q_p}{N_s A_p} \cdot \frac{1}{1/R_0 + 1/R_1} \quad (9)$$

$$t_{s,0} = t_p - \frac{R_{f,0}}{R_0} \cdot (t_p - ot_{p,0}) \quad (10)$$

④ 各ゾーンへの対流・放射熱量の算出

式(11), (12)より各ゾーンへの対流・放射熱量を算出する ($q_{cs,1}, q_{rs,1}$ も同様である)。

$$q_{cs,0} = N_p N_s A_p h_{cs,0} (t_{s,0} - t_{a,0}) \quad (11)$$

$$q_{rs,0} = N_p N_s A_p h_{rs,0} (t_{s,0} - AST_{p,0}) \quad (12)$$

まとめ

空調システム関連の BEST の整備状況について概説し、特に放射パネルモジュールの計算アルゴリズムについて述べた。放射パネルモジュールについては、試験によるパネルの放射特性 (熱コンダクタンス [W/(m²·K)]) が分かっていたら計算できるが、試験時の対流熱伝達率によって特性は大きく変化するため、試験およびその表示方法の統一も本来必要である。また、熱容量体に接した冷温水パネル、あるいは熱容量体埋め込み型の冷温水配管のモデル化については今後の課題である。

【謝辞】

本研究は、(一財)建築環境・省エネルギー機構内に設置され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(9)シラム」・「BEST 企画委員会(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)、行政支援ツール開発委員会(坂本雄三委員長)、統合化 WG(石野久彌主査)の活動成果の一部であり、関係各位に謝意を表するものである。

参考文献

- 1) 塩谷正樹, 郡公子: スリットを有する天井放射パネルユニットの熱性能に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, Vol.78, No.683, pp.31-37, 2013
- 2) TRNSYS17, Volume 5, Multizone Building modeling with Type56 and TRNBuild, Solar Energy Laboratory, TRANSSOLAR, CSTB, TESS, 2012