

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 115) 空調およびシステム連成に関する開発状況

Development of an Integrated Energy Simulation Tool for Buildings and MEP Systems, the BEST (Part115) Status of Development of MEP Simulation Environment

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

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

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

This paper reports the status of the development in 2012 of HVAC simulation environment in an energy simulation tool, the BEST. We introduced several new features such as physical model for a cooling tower, multiple heat-source system, and so on. Among those newly introduced functions, we especially focus on description of the outline of a ventilation network module and the detail algorithm of an earth tube module.

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、2012 年度における空調分野の整備・開発状況について報告し、中でも、アースチューブモジュールの計算アルゴリズムについて詳述する。

1. 2012 年度の整備状況

2012 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) 仮設調整モジュール・テンプレートの整備
- 2) 多数室換気回路網計算モジュールの実装
- 3) 物理モデルの冷却塔モジュールの実装
- 4) 熱源・冷却水変流量制御の検討
- 5) 設備運転スケジュール制御モジュールの改良 (送水温度等の月別設定変更など)
- 6) アースチューブモジュールの開発
- 7) 機器特性の適用範囲の確認と範囲外の計算法見直し
- 8) PAC・セントラル・地域熱供給・CGS などの複合熱源システムへの対応
- 9) 複数の熱源グループ、二次ポンプグループのシステムへの対応
- 10) その他、マニュアル整備等

1)の仮設調整モジュール・テンプレートとは、予め機器容量を決定しないで期間計算を実施し、負荷に応じて自らの容量を可変させることによって容量の自動計算を行うもので¹⁾、2012 年度は 4 管式対応の仮設調整熱源の

開発を行った他、それまで、仮設調整用モジュールで容量決定後、通常のコピーに置き換えてエネルギー計算を行う必要があったものを、両者を共通のコピーとし、容量調整を行うかどうかを選択できるようにした。

3)の物理モデルを用いた冷却塔モジュールについて、従来は湿球温度や冷却水入口温度・流量を説明変数とする近似式で出口水温を算出する近似式モデルでありファンの発停、風量変流量には対応していなかった。今回、既報²⁾に示すモデルを用いてコーディング・実装を行った結果、変風量制御にも対応した汎用的なモデルとなった。図-1 に計算例を示す。3 方弁はなく、冷却水変流量 (熱源出口水温=25℃となるようにポンプ INV 制御) かつ変風量 (冷却塔出口水温=20℃となるようにファン INV 制御) である。冷却水流量が下限に張り付かない限り熱源出口水温 (冷却塔入口水温) が設定値に保たれ、また冷却塔出口水温は負荷が小さい日 (6/6) でもファン INV により 20℃に制御できていることが確認できる。

4)の熱源変流量制御では、100%容量運転で熱源送水温度を一定に保つ制御を検討した。3)の冷却塔の場合と同様、熱源の機種ごとに運転可能な冷温水の流量上下限值があり、変流量を適切に行うには PID 制御モジュールの設定に配慮が必要であることを確認した。

5)のスケジュール制御モジュールの改良では、従来、空調・熱源運転スケジュールは年間固定、また室温設定値等は冷暖モード別に固定であったが、3つの期間モードを設け、それぞれ①期間、②モードの選択 (冷、暖、換気等)、③曜日別スケジュール、④月別設定値を定義で

きるように、空調機・熱源制御モジュールおよびPID制御モジュールを修正した。これによって、例えば、月別に熱源送水温度を変更する制御が可能となる。

8),9)では、複合熱源システムや、複数の熱源グループ、二次ポンプグループ（低層と高層とで分ける等）のシステムに対応するよう、モジュールによる構築方法を検討し建物全体システムとして計算できることを確認した。

以上の検討・整備項目のうち、3),4)および8),9)は、BEST専門版を計算エンジンとしている改正省エネルギー基準対応ツールの機能としても使われている。

以下では上記の整備項目のうち、2)の換気計算モジュールの概要および6)のアースチューブモジュールについて述べる。

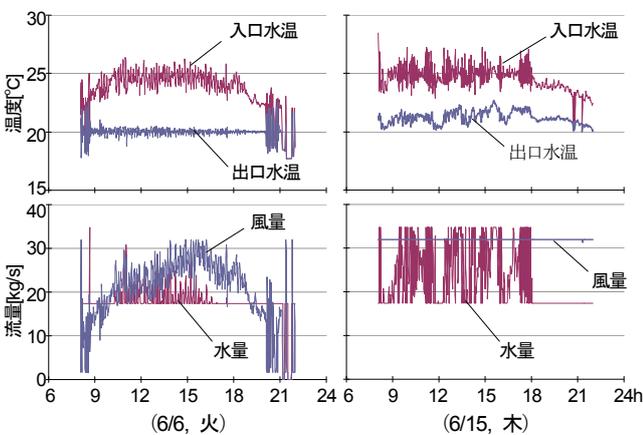


図-1 冷却水変流量+風量変流量 (INV) 冷却塔動作例

2. 換気回路網計算モジュール

換気計算モジュールの計算アルゴリズムは、既報¹⁾に示すように室（節点）の圧力を未知数とおき、各節点に流入する風量の合計が0であることより非線形の連立方程式を立てて圧力を解くもので、2012年度実装を行った。

この計算モジュールのパラメータ（固定値）、入出力変数のうち主要なものを表-1に示す。節点の指定は、建築入力画面で入力済みのゾーンの中から選択することにより行う。枝（開口）に関する仕様としては、開口面積、開口の高さ、流量係数等があり、単純開口を仮定した通過流量を計算する。この他、枝の両端のゾーンを指定するようになっており、これにより換気回路網の構成が決定する。外気に面した開口に対しては開口制御に関する指定が可能で、指定された判断基準に従って、全ての外気に面した開口が同時に開閉される。ただし、外気条件>室内条件の場合の開閉については、条件として乾球温度、エンタルピのいずれかあるいは両方を選択することができ、かつ室ごとに開閉を判断する。

以上の入力データは固定値（パラメータ）であるが、時々刻々変化する入出力変数のうち主なものは、気象条件、各室の温湿度（以上入力）および各ゾーンへの風量

（出力）である。室との情報のやり取りは、室計算部との間で直接的に行われる（一般のシステム計算のように、モジュール間のシーケンス接続によるわけではない）。このデータのやり取りは、空調機と室との間に用いられるゾーン接続モジュールにおける方法と同様である。各時刻ステップにおいて、熱計算（室側の計算）と換気計算部それぞれ1回ずつ計算し、収束計算は行わない（BESTのシステム計算の考え方に従う）。

表-1 換気回路網計算モジュール主要入出力一覧

Parameter :	<ul style="list-style-type: none"> 降雨時閉鎖の有無 外気条件>室内条件の場合の閉鎖の有無 外気条件の下限 再オープン遅延時間
[一般]	
・外部風速観測高さ（風速の高さ補正用）	
・収束判定用風量残差 [節点(室)の指定]	
・室/ゾーンの選択 [枝(開口)の指定]	Input :
・両側ゾーンの選択	<ul style="list-style-type: none"> 換気計算 on-off 信号 外部温湿度、風向・風速、降雨量 各ゾーンの室温湿度
・開口面積、下端高さ、開口高さ、流量係数、方位(外皮開口)	Output :
[外皮開口制御]	<ul style="list-style-type: none"> 各ゾーンへの風量
・外部風速の上限	

現在のモジュールでも、建物全体の自然換気量を熱計算と連成して求めることは可能であるが、以下の改良により更に汎用性を持たせることが可能と考えられる。

- ・ゾーン以外の節点の設定（システム側の圧力計算）
- ・風圧係数の設定自由度の向上（現在は風向毎に固定）
- ・開口面積の入力変数化（開閉ロジックを別モジュールとすることが可能）

3. アースチューブモジュール

3.1 概要

ここで対象とするアースチューブとは、地中に埋設された円管内に流体を通すことによって、土壌との間で熱交換を行うもので、導入外気の子冷・予熱のために用いられることを想定している。今回開発したアースチューブモジュールは、永田の計算法^{3),4)}をもとに、固定公比法による応答係数を算出し、地盤との熱交換量を求めつつ、流体の空間的温度変化を算出するものである。このモデルの適用条件・仮定を以下に挙げる。

- ・埋設管は十分な深さに設置され、地表面温度の影響は定常成分のみとする（地表面温度は基準温度＝平均地中温度で年間固定）
- ・地中の熱移動は埋設管の径方向のみとする
- ・管材の熱抵抗は無視する
- ・隣接する別の埋設管の影響は無視する

これらの仮定のもと、土壌および埋設管を図-2のような均質な材料からなる円筒形固体に置き換え、さらに管長方向を適当な数で区分することにより、区分ごとの管内流体温度を求める。

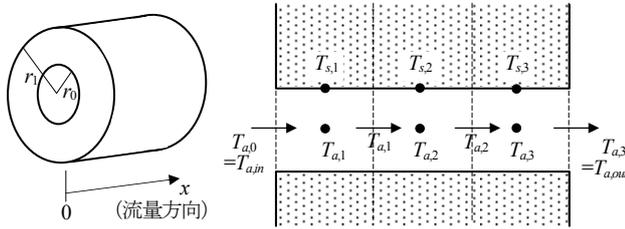


図-2 アースチューブ・土壌の解析対象モデル

具体的には、各区分の固体部分は2次元伝熱（回転体固体として考えれば1次元伝熱）を仮定し、区分ごとの管内表面熱流励振に対する管内表面温度の応答係数を求める（応答係数は異なる区分で共通）。畳み込みにおける状態変数は区分ごとに保存し、流体温度（ $T_{a,1}, T_{a,2}, \dots$ ）および表面温度（ $T_{s,1}, T_{s,2}, \dots$ ）を未知数とし、区分ごとに固体・管内表面・流体に関する熱収支式を立て、順次空気温度を求める。各区分の応答係数は、永田の示す吸熱伝達関数 G_a （ラプラス領域）から固定公比法により求める。

アースチューブモジュールのパラメータ（固定値）、入出力変数一覧を表-2に示す。

表-2 アースチューブモジュール入出力一覧

Parameter :	
λ : 土壌の熱伝導率 [W/(m·K)]	(その他、助走計算用に地域選択と定各風量をparameterとして入力)
$c\rho$: 土壌の容積比熱 [J/(m ³ ·K)]	
r_0 : 内径(半径) [m]	Input :
D : 埋設深さ[m]	$T_{a,in}$: 入口空気温度[°C]
$c\rho_a$: 空気の容積比熱 [J/(m ³ ·K)]	V : 流量[m ³ /s]
L : 配管の長さ[m]	Output :
T_{ref} : 平均地中温度 (基準温度) [°C]	$T_{a,out}$: 出口空気温度[°C]
	V : 流量[m ³ /s]

3.2 前処理計算

(1) ステップ応答の係数の算出

永田^{3,4)}によれば、円筒形固体の内表面熱流[W/m]（単位配管長あたり）を励振とし、内表面温度変化を応答とする周波数伝達関数は、

$$H_A(\omega) = (X + iY)/2\pi\lambda \quad (1)$$

と近似できる。ただし、外表面（地表面）の温度は0（=基準温度）とする。また、

$$X = \frac{1}{2} \log \left[1 + \left(1 + \sqrt{2(\zeta + \xi)} \right) / \zeta \right] \quad (2)$$

$$Y = -\tan^{-1} \left(\sqrt{\zeta - \xi} / (\sqrt{2\zeta} + \sqrt{\zeta + \xi}) \right) \quad (3)$$

さらに、 $\xi = (r_0/(r_1 - r_0))^2$, $\zeta = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}$, $\eta = \omega r_0^2/a$, $a = \lambda/c\rho$ 。ここで、 r_1 は、円筒形固体の外径（半径）[m]であるが、管の埋設深さを D [m]として $r_1 = 2D$ とする³⁾。

一方、この応答のステップ応答 $h(t)$ （実時間）を以下で近似する。

$$h(t) = A_0 + \sum_{k=1}^N A_k e^{-\alpha_k t} \quad (4)$$

上式のラプラス変換は、

$$\tilde{h}(s) = \frac{A_0}{s} + \sum_{k=1}^N \frac{A_k}{s + \alpha_k} \quad (5)$$

よって、この応答の伝達関数（インパルス応答のラプラス変換）は、

$$H(s) = s\tilde{h}(s) = A_0 + \sum_{k=1}^N \frac{sA_k}{s + \alpha_k} \quad (6)$$

周波数伝達関数は、式(6)の s を $i\omega$ に置き換えたものとなる（ i は虚数単位）。

$$H(\omega) = A_0 + \sum_{k=1}^N \frac{i\omega A_k}{i\omega + \alpha_k} \quad (7)$$

式(7)のうち、右辺の Σ 内の各項は、

$$\frac{i\omega A_k}{i\omega + \alpha_k} = \frac{i(i\omega - \alpha_k)\omega A_k}{(i\omega + \alpha_k)(i\omega - \alpha_k)} = \frac{(\omega + i\alpha_k)\omega A_k}{\omega^2 + \alpha_k^2} \quad (8)$$

となるので、式(1)と式(7)を等しく置き、また $X' = X/2\pi\lambda - A_0$, $Y' = Y/2\pi\lambda$ と置き換えると、式(8)を参照して、

$$X' = \sum_{k=1}^N \left(\frac{\omega^2}{\omega^2 + \alpha_k^2} \right) A_k \quad (9)$$

$$Y' = \sum_{k=1}^N \left(\frac{\omega\alpha_k}{\omega^2 + \alpha_k^2} \right) A_k \quad (10)$$

となる。 α_k として、適当な数値を仮定して固定すれば（固定公比法）、式(9), (10)は、 A_k ($k=1, 2, \dots, N$) を未知数とする線形回帰式と見なすことができる。適当な数の角周波数 ω に対して、「観測値」 X', Y' を式(2), (3)を用いて算出し、また A_k に掛かる各係数を算出すれば、線形最小二乗法により未知パラメータ A_k を決定することができる。

α_k および ω の値として、BESTでは、周期 T_k ($k=1, 2, \dots, N$) を、0.09375hを初項とし、公比4、項数 $N=10$ の等比数列として設定し ($T_N=24576h$)、 $\alpha_k=1/T_k$, $\omega_k=2\pi/T_k$ ($k=1, 2, \dots, N$)とした。なお、 X' の算出において必要となる A_0 の値は、この応答の定常成分なので、式(1)において $\omega=0$ とおくことで以下となる。

$$A_0 = \frac{\log(r_i/r_0)}{2\pi\lambda} \quad (11)$$

(2) 応答係数の算出

前項の手順で、吸熱ステップ応答 (式4) の係数、 α_k, A_k ($k=1, 2, \dots, N$) が求められた。これらの係数をもとに応答係数を求めることになるが、BESTでは、以下の手順により四角波の場合の応答係数 (図-3) を用いて畳み込み演算を行う (応答係数の求め方については例えば文献⁵⁾を参照)。

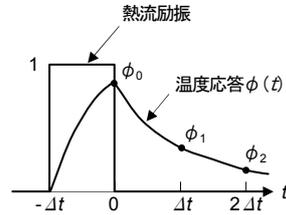


図-3 励振形状と応答係数

時刻ステップを n として、内表面熱流 $q_{l,n}$ [W/m] を励振とし、内表面温度 $T_{s,n}$ を応答とする畳み込み演算は、

$$T_{s,n} = \phi_0 q_{l,n} + \sum_{k=1}^N T'_{s,n,k} \quad (12)$$

$$T'_{s,n,k} = \phi_{1,k} q_{l,n-1} + \rho_k T'_{s,n-1,k} \quad (13)$$

ただし、

$$\phi_0 = \sum_{k=1}^N A_k (e^{-\alpha_k \Delta t} - 1) \quad (14)$$

$$\phi_{1,k} = A_k (e^{-\alpha_k 2\Delta t} - e^{-\alpha_k \Delta t}), \quad \rho_k = e^{-\alpha_k \Delta t} \quad (15)$$

(3) 配管長方向の分割

上記(1), (2)によって決定される応答係数を持つような、長さ Δx [m] の円筒形の断片 N_x 個を考え (図2を参照)、各断片について、式(13)の項別の出力 $T'_{s,n,k}$ [°C] を初期化 (=0) する ($\Delta x = L/N_x$)。

3.3 時間ループ計算

各時刻ステップにおいて、 h : 管内表面熱伝達率 [W/(m²·K)], V : 流量 [m³/s], $T_{a,in}$: 入口空気温度 [°C] を入力とし、 $T_{a,out}$: 出口空気温度 [°C] を出力とするような下記の計算処理を行う。熱伝達率、流量、入口空気温度は、いずれも時刻によって変化して構わない。

(1) 各区分における流体・土壌の熱収支

区分 i ($i=1, 2, \dots, N_x$) における、円筒形固体 (土壌) および管内の流体の間に成り立つ熱収支式は以下となる (式(16)は、式(12)の再掲)。

$$T_{s,n,i} = \phi_0 q_{l,n,i} + T_{st,n,i} \left(T_{st,n,i} \equiv \sum_{k=1}^N T'_{s,n,i,k} \right) \quad (16)$$

$$q_{l,n,i} = 2\pi_0 h (T_{a,i} - T_{s,n,i}) \quad (17)$$

$$q_{l,n,i} \Delta x = c\rho_a V (T_{a,i-1} - T_{a,i}) \quad (18)$$

ただし、 $T_{a,i}$ は現在時刻における区分 i の空気温度 [°C] を表わす。式(16)を式(17)に代入して、 $q_{l,n,i}$ について解くと、

$$q_{l,n,i} = \frac{2\pi_0 h (T_{a,i} - T_{st,n,i})}{1 + 2\pi_0 h \phi_0} \quad (19)$$

式(19)を式(18)に代入して、区分 i の空気温度 (=区分 i の出口温度) $T_{a,i}$ について解くと、

$$T_{a,i} = \frac{aT_{st,n,i} + bT_{a,i-1}}{a+b} \quad (20)$$

ただし、 $a = 2\pi_0 h \Delta x$, $b = c\rho_a V (1 + 2\pi_0 h \phi_0)$

(2) アースチューブ出口温度の計算

最初に、アースチューブ入口温度から基準温度 (平均地中温度) を差し引いたものを区分 1 に対する入力空気温度とする。

$$T_{a,0} = T_{a,in} - T_{ref} \quad (21)$$

次に、各区分 ($i=1, 2, \dots, N_x$) に対して、順次式(20)の計算を行い、区分 N_x の空気温度 T_{a,N_x} に基準温度 T_{ref} を足したものを、アースチューブの出口温度 $T_{a,out}$ とする。また、各区分において、式(18)より表面熱流 $q_{l,n,i}$ を算出した上で、式(13)により項別の温度成分 $T'_{s,n,i,k}$ を更新する。

まとめ

空調システム関連の BEST の整備状況について、特に換気回路網計算モジュールと、アースチューブモジュールの計算アルゴリズムについて解説を行った。

【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 コンソーシアム」・「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) 二宮博史他：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 103) 仮設調整テンプレートの改良と換気計算用モジュールの開発, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.1363-1366, 2012
- 2) 伊藤祥一他：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 72) 冷却塔の機器特性, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.2567-2570, 2010
- 3) 社団法人 日本建築学会「見る・使う・学ぶ 環境建築」pp.70-73, 2011.5
- 4) 永田明寛：地中埋設管の熱応答に関する考察と近似式の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集 環境 II, pp.347-348, 2011.8
- 5) 松尾陽, 横山浩一, 石野久彌, 川元昭吾：「空調設備の動的熱負荷計算入門」, 日本空調衛生設備士協会, 1980