

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28）

空調システムシミュレーションの概要

Development of an integrated Energy Simulation Tool for Buildings and MEP Systems, the BEST (Part28)

Outline of HVAC System Simulation

正会員 ○長井 達夫（東京理科大学） 特別会員 村上 周三（建築研究所）
 正会員 石野 久彌（首都大学東京名誉教授） 正会員 二宮 博史（日建設計）
 正会員 菅長 正光 正会員 菰田 英晴（鹿島建設）

Tatsuo NAGAI*¹ Shuzo MURAKAMI*² Hisaya ISHINO*³

Hiroshi NINOMIYA*⁴ Masamitsu SUGANAGA Hideharu KOMODA*⁵

*¹ Tokyo University of Science *² Building Research Institute *³ Tokyo Metropolitan University

*⁴ Nikken Sekkei Ltd *⁵ Kajima Corporation

This paper describes simulation methodologies of HVAC systems, which are to be implemented in the “BEST” program. To achieve extensibility and ease of maintenance, modular structure is introduced. Any appliance is modeled as a module class that has formatted common functions. One of the new features of the “BEST” program is “template” structure by which effort for making input data is considerably reduced. Applicable HVAC systems and feed-back control concept for energy simulation are also discussed.

はじめに

本報では、空調システムシミュレーションの概要について説明する。最初に、BESTにおける計算法とモジュールの基本構成について述べ、熱源周りの機器を例に挙げてモジュールクラスの構成について概説する。次にBESTで想定している対応システムについて述べた上で、入力の簡易化を図るためのテンプレートの概念やエネルギーシミュレーションにおけるフィードバック制御の位置付けについて説明する。

1. 計算法の概要と要素モジュール

BESTでは、先行する海外のシミュレーションツール（TRNSYS, EnergyPlus等）と同じく、各機器のモデルは統一的なフォーマットに従ったモジュールによって表現し、モジュール相互の接続により全体システムを構築する方法を取っている。設備機器だけでなく、室やコントローラも要素モジュールとして扱う点もTRNSYS等の既往のモジュールベースのプログラムと同様である。モジュールはJava言語で記述されたクラスであり、その基本メソッドの一覧を表-1に示す。

計算はメインルーチン（計算エンジン）が各モジュールのメソッドを順次呼び出すことで行われる。setProfileメソッドとinitializeメソッドは最初に1回だけ呼び出され各モジュールに対するユーザー入力情報などを取得し内部変数の初期化を行う。outputsメソッドはシミュレ-

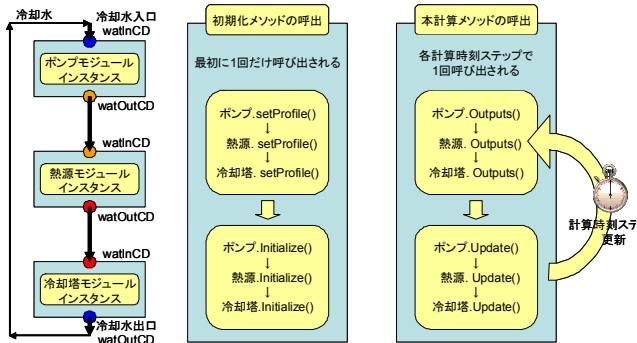
ーションの本計算部分で、入力（当該モジュールの入力ノードに設定された値）および当該モジュールの内部状態を与条件として出力値を計算し、その結果を出力ノードにセットする。「内部状態」は、動的モデルにおける状態変数に相当するものであるが、状態変数のために固有の変数を用意するのではなく、各オブジェクトのprivate変数として情報を保持する。

updateメソッドは、入力値と現在の「内部状態」から、次ステップの「内部状態」を計算するもので、動的なモジュールの場合にのみメソッドの内容を記述する必要がある。outputsメソッドが各モジュールについて1ステップ複数呼び出される可能性があるのに対して、updateメソッドは時刻ステップの最後に1回ずつ呼び出される。

図-1は冷却水系のポンプ、熱源、冷却塔の3個のモジュールの構成例でメソッドの呼出手順を示した例である。

表-1 要素モジュールが実装するメソッド

メソッド	内容
setProfile	・ 機器の定格等、固定値をセットする
initialize	・ 結果を保持する変数の作成等、必要な初期化を行う
outputs	・ 各時刻ステップにおいて、入力と内部の状態から出力を計算する
update	・ 各時刻ステップの最後に内部の状態を更新する



(outputs メソッドは1ステップで複数回呼び出されることがある)

図-1 メソッドの呼出し (冷却水系の例)

```

public class AbsRefModule extends ...{
    内部変数の宣言(定格能力等の仕様、入口・出口冷水オブジェクト等)
    public void setProfile(BestSpecs spec) {
        メインルーチンから渡される機器仕様を内部変数にコピーする
        ・名称、定格能力(冷却・加熱), 定格水量(冷温水・冷却水)
        ・出口水温設定値(冷水・温水)
        ・定格ガス消費量(冷却・加熱), 定格消費電力(冷却・加熱)
        ・電力の相数, 電圧, 周波数, 力率
    }
    public void initialize(IBestStateMessage stateNodes,...) {
        メインルーチンから提供されるノードオブジェクトとの接続を確立する
        ・入力ノード ... 入口冷温水, 入口冷却水, 燃焼用給気,on/off,モード
        ・出力ノード ... 出口冷温水, 出口冷却水, 電力・ガス, 排気ガス
    }
    public void outputs() {
        if (停止)
            冷温水出口状態=冷温水入口状態
            冷却水出口状態=冷却水入口状態
            ガス・電力消費量=0, COP=0
        else if (冷房モード)
            冷温水冷却熱量・冷温水出口水温の計算
            ガス消費量=f(冷温水状態,冷却水状態,負荷率)(機器特性)
            冷却水出口水温,消費電力,COPの計算
        else (暖房モード)
            冷温水加熱量・冷温水出口水温の計算
            ガス消費量=定格ガス消費量×負荷率(リニア特性を仮定)
            消費電力,COPの計算
        end if
        出力ノードの設定(出口冷温水・冷却水,燃料ガス,電力,排気ガス)
        記録ノードの設定(メッセージ,入力,出力,エネルギー,内部状態)
    }
    public void update() {
    }
}

```

図-2 要素モジュールのソースイメージ (ガス焚き冷温水発生機の例)

2. モジュールの例

要素モジュールの例として、熱源機器 (冷温水発生機) クラスのソースコードイメージを図 2 に示す。内部変数 (private 変数) の宣言の後、setProfile メソッドにおいて、定格能力、定格ガス消費量等の固定値を内部変数にコピーする。これらの固定値はユーザーが (一般的には GUI を介して) 入力するもので、メインルーチンから引数 (BestSpecs 型) として渡される。initialize メソッドでは、冷温水、冷却水など、モジュール外部と情報のやり取りをするためのノードオブジェクトとの接続を確立する。要素モジュールとノードとの接続関係は原則的にはユーザーが指定し、メインルーチン内に保持された接続情報 (どのノードと接続されているか) は initialize メソッドの引数を介してモジュールクラスに渡される。outputs メソッドでは、機器の on/off 状態や冷暖モード (これらも外部のノードから渡される入力情報である) に応じて、

表-2 対応空調システム

項目	概要
熱源システム	冷温水発生機、温水ボイラー 空気熱源ヒートポンプチラー ターボ冷凍機 開放式冷却塔(定风量、変风量)、補給水計算可 冷却水ポンプ(定水量) 自動制御(スケジューラ・台数制御) PAC方式(一般パッケージ、ビル用マルチ)
蓄熱システム	水蓄熱槽(連結完全混合型、温度成層単層型) 氷蓄熱槽(外融式) 空気熱源プラインヒートポンプチラー 水-ブライン熱交換器、三方弁制御、蓄熱制御
CGS	ガスエンジン発電機 排熱投入型吸収冷温水機
搬送システム	ポンプ(CWV)、ファン(CAV, VAV) 配管・ダクトの分岐・集合、拡大・縮小
空調システム	冷温水コイル、水加湿器(余剰排水計算可) 全熱交換器、外気冷房(顕熱制御・エンタルピ制御) 予冷・予熱時外気カット
換気システム	タイムスケジュール、温度制御
計算範囲	BEMSなど外部データ取り込み、部分システム計算可 ※組込み予定のものを含む

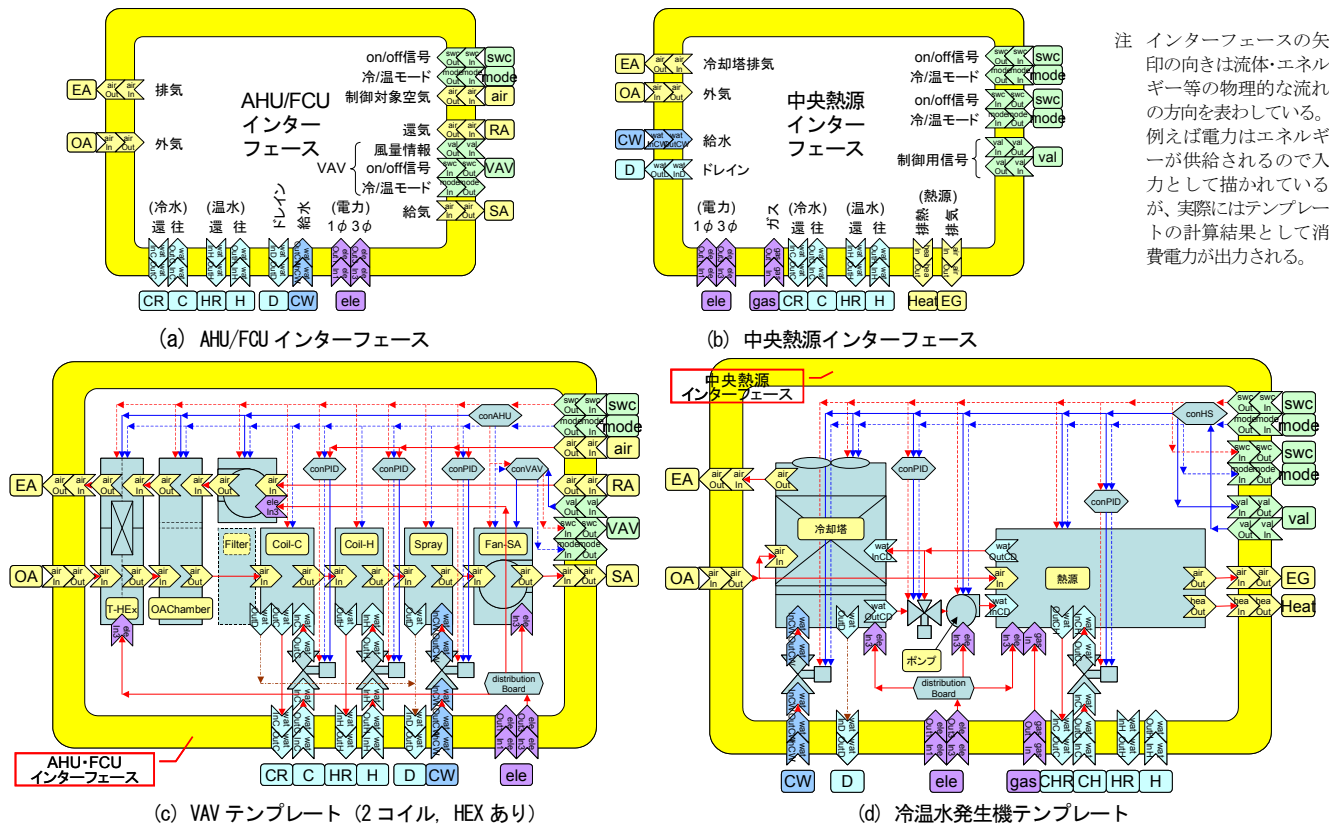
冷温水・冷却水の入口状態から出口状態および消費ガス量等を計算し、該当する出力ノードに値をセットする。図-2 の冷温水発生機の場合、現状では機器起動時の過渡的な能力変化など動的なモデル化はなされていないので、update メソッドでは何も行っていない。動的モデルの場合には、update メソッドにおいて、次の時刻ステップのための内部状態の更新を記述することになる。

3. 対応システム

表-2 に、BEST で対応している空調システムの一覧を示す。BEST に標準添付されたモジュールをユーザーが接続することによってシステム全体を構築することができる。実際には、モジュールの一つ一つをユーザーが接続してシステム全体を構築することは手間が掛かるため、典型的な例題システム (パッケージ主体、セントラル主体等) をプログラムに添付し、この例題システムをもとに必要なモジュールの追加・リンク接続を行う入力方法を想定している。なお、BEST は新規モジュールをプログラムに追加した上で、接続情報を指定すれば任意のシステムを構築できるので、表に記載していないシステムに対応することも比較的簡単である。

4. テンプレート

BEST では要素モジュールの接続によりシステムを構築するが、空調システムの場合、その構成要素の数が膨大となる。これらモジュールの配置・接続の手間を軽減するために、「AHU/FCU」、「中央熱源」および「熱源群」について、予めテンプレートを用意しておき、テンプレート内部の個々のモジュールを意識せずに全体システムを構築できるようにプログラム整備を行っているところである。「AHU/FCU」、「中央熱源」について、テンプレートの共通インターフェース (外部との接続ノード) およびテンプレートの例を図-3 に示す。図-3(c) に示す「VAV (2 コイル, HEX あり)」テンプレートの場合、予



注 インターフェースの矢印の向きは流体・エネルギー等の物理的な流れの方向を表わしている。例えば電力はエネルギーが供給されるので入力として描かれているが、実際にはテンプレートの計算結果として消費電力が出力される。

図-3 AHU/FCU テンプレートと中央熱源テンプレートの例

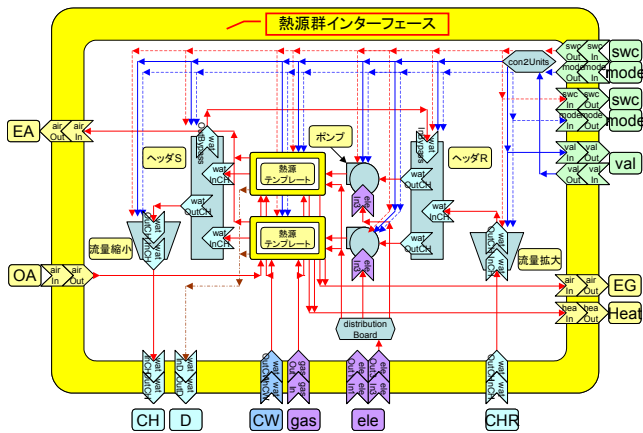


図-4 熱源群テンプレートの例 (熱源 2 台)

め「コイル」、「加湿器」、「ファン」といった要素モジュールの配置・接続が完了しているため、ユーザーはテンプレート内部のモジュール仕様 (送风量やコイル能力など) とテンプレート外部との接続を設定するだけでよい。「AHU/FCU」テンプレートとしては、図-3(c) に示す「VAV (2 コイル, HEX あり)」テンプレート以外に、「VAV (1 コイル, HEX なし)」、「CAV (1 コイル, HEX なし)」、「FCU」等の種々のテンプレートが用意されるが、いずれも外部との間に図-3(a) に示す共通の接続ノード (インターフェース) を有している。ユーザーは、これら同一のインターフェースを有するテンプレートを外部の接続

を保ったまま相互に入れ替えることが可能になる。すなわち、「コイル」、「ファン」といった要素モジュールを意識することなく、一つのまとまりとして接続済みの「空調機」を「FCU」へ入れ替えるといったことが可能となる。

「中央熱源」(図-3(b)および(d))についても同様である。冷却水システムも「中央熱源」テンプレートに内包されるため、空冷・水冷を問わず、接続済みの熱源を他の熱源に入れ替えることが可能である。「熱源群」テンプレート(図-4)は、複数の熱源、1次ポンプ、ヘッダ、台数制御モジュール等からなるテンプレートで、インターフェースは「中央熱源」テンプレートの場合と同様である。

以上の3種類のテンプレートが整備されれば、システム全体の構築 (モジュールの配置と接続) は比較的簡便になると考えられる。また、各テンプレート内部の要素モジュールを削除したり追加することが可能なため、システム構築の自由度・拡張性は維持される。

5. 媒体クラス

モジュール間を接続する媒体としては、空気 (給排気、外気)、水 (冷温水、冷却水、給排水)、制御信号 (on/off、冷暖モード、制御量、観測値) などがある。BEST では、これらの媒体のクラスを作成して、媒体の各種状態値をセットで取扱い確実に伝達ができる仕組みとした。表-3 に媒体クラスの例を示す。例えば空気 (BestAir) クラス

表-3 媒体クラスの例

媒体クラス	フィールド変数	メソッドの例	接続ノード名
空気 BestAir	乾球温度[°C] 絶対湿度[g/g(DA)] 質量流量[g/s]	getTempWB() getEnthalpy() getHumiR() getTempDP()	airIn airOut
水 BestWater	温度[°C] 質量流量[g/s]	getTemp() getFlowRate()	watIn watOut
ブライン BestBrine	温度[°C] 質量流量[g/s] 濃度[-] 種類[-]	getTemp() getFlowRate() getConcentration() getType()	briIn briOut
電力 BestElectricity	有効電力[W] 無効電力[Var] 電圧[V] 相数[-] 周波数[Hz]	getActivePower() getReactivePower() getVoltage() getPhase() getFrequency()	eleIn eleOut
ガス BestGas	消費量[W]		gasIn gasOut
(制御信号) swcIn, swcOut, modeIn, modeOut, valIn, valOut *媒体のフィールド変数は機能追加に応じて変更がある。			

では、フィールド変数として乾球温度[°C]、絶対湿度[g/g(DA)]、質量流量[g/s]の3つの状態値を規定したオブジェクト単位で情報の受渡しを行う。さらに、getTempWB()、getEnthalpy()、getHumiR()、getTempDP()などの空気線図関数に相当するメソッドを用意し、湿球温度、比エンタルピー、相対湿度、露点温度を簡単に取得出来るようにした。

6. 全体システムの解法

モジュールを基本としたシミュレーションの場合、Newton 法等を用いてシステム全体の非線形方程式を解く方法と、単純にモジュールを順次計算する方法があるが、BEST では後者を採用し、さらに収束計算を行って方程式の解に到達することを期待するのではなく、計算時間間隔を短く取るにより動的な変化を経時的に計算する方法 (BEST では「陽解法」と呼んでいる) を採用している。

この場合、モジュール (Outputs メソッド) の計算順序が問題となるが、現在のバージョンでは、モジュールを空調機側、熱源側等のグループに分類した上でデフォルトの計算順序を設定しておく方法を取っている (詳細は次報²⁾ 参照)。

7. フィードバック制御

また、BEST では、各機器モジュールの入出力について、物理的な入出力と整合するように設定することを原則としている。例えば、空調機コイルについて、物理的な入力 (入口空気状態・風量、入口水状態・水量) をそのままモジュールの入力とし、物理的な出力 (出口空気状態・風量、出口水状態・水量) をモジュールの出力としている。室モジュールについても同様で、設定温湿度を保つのに必要な負荷を出力するのではなく、給気温湿度・風量を入力として、なりゆきの室温・湿度が計算・出力されるようになっている。

そこで、例えば定風量空調システムのコイル流量を制御しようとする場合、実システムと同様に、室温を設定値に近づけるようにコイル二方弁をフィードバック制御する必要が生じる。BEST は動作シミュレータというよりは、エネルギーシミュレーションツールとして用いられることを想定しているが、モジュールの入出力を物理的な入出力と整合させるという方針のため、不可避免的にフィードバック制御を導入する必要がある。

現バージョンの BEST では、そのための制御モジュールとして PID モジュールを用意している。PID パラメータの設定については、ユーザーが問題ごとに調整しなくても済むようにデフォルトパラメータを提供する方針であるが、それでも制御が安定しない、目標値になかなか達しない、という場合にはこれらのパラメータをユーザーが調整する必要がある。

8. まとめ

BEST における空調システムシミュレーション手法について、基本的なプログラム構造と解法、および入力の手間を軽減する「テンプレート」の概念について説明した。収束計算を伴わない「前進」計算の妥当性とモジュールの計算順序、また計算時間間隔の自動決定法について今後継続して検討を行う必要がある。

【謝辞】

本報は、(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 開発普及事業研究会 (村上周三委員長)」ならびにアーキテクチャ検討部会 (坂本雄三部会長)、建築・空調設備作業部会 (石野久彌部会長)、クラス構想 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ものである。クラス構想 WG 名簿 (順不同) 主査: 石野久彌 (首都大学東京名誉教授)、委員: 一ノ瀬雅之 (東京理科大学)、内海康雄 (宮城高専)、郡公子 (宇都宮大学)、長井達夫 (東京理科大)、羽山広文 (北海道大学)、上田博嗣 (大林組)、木下泰斗 (日本板硝子)、後藤裕 (三機工業)、菰田英晴 (鹿島建設)、芝原崇慶 (竹中工務店)、平林啓介 (新日本空調)、松村一誠 (清水建設)、渡邊剛 (NTT ファシリティーズ)、協力委員: 瀧澤博 (元鹿島建設)、菅長正光 (自営)、二宮博史、國吉敬司、篠原奈緒子 (以上、日建設計)、オブザーバー: 野原文男 (日建設計)、事務局: 生稲清久 (建築環境・省エネルギー機構)

【参考文献】

- 1) 長井達夫他: 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 16) 空調システムのシミュレーション手法, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.2029-2032, 2007
- 2) 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 29) モジュールおよび計算法 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 (投稿中), 2008