

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

Development of an integrated Energy Simulation Tool for Buildings and MEP Systems, the BEST (Part16)

Simulation Method of HVAC systems

正会員 ○長井 達夫（東京理科大学） 特別会員 村上 周三（慶応義塾大学）
 正会員 石野 久彌（首都大学東京） 正会員 野原 文男（日建設計）
 正会員 二宮 博史（日建設計） 正会員 助飛羅 力（三機工業）
 正会員 柳井 崇（日本設計）

Tatsuo NAGAI*¹ Shuzo MURAKAMI*² Hisaya ISHINO*³ Fumio NOHARA*⁴

Hiroshi NINOMIYA*⁴ Chikara SUKEHIRA*⁵ Takashi YANAI*⁶

*¹ Tokyo University of Science *² Keio University *³ Tokyo Metropolitan University

*⁴ Nikken Sekkei Ltd *⁵ Sanki Engineering Co.,Ltd. *⁶ Nihon Sekkei Inc.

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 can be modeled as a module class that implements formatted common functions. Execution procedures, especially calculation order of modules, and data structures of appliance characteristics are presented.

はじめに

本報では、空調システムのシミュレーション法について説明する。最初に、拡張性、メンテナンス性を重視する BEST にとって好ましいプログラム構造のあり方について述べ、機器等を表現する要素モジュールの基本形についての方針を説明する。更に空調システム全体の解法、特に要素モジュールの計算順序の考え方について述べた後、機器特性データの構築方針について説明する。

1. BEST に望まれるプログラム構造・機能について

(1) 機器のモジュール化

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る。これにより、多様なシステム構成（モジュールの連結のされ方の多様性）やユーザーによるモジュール追加に対応するとともに、メンテナンス性の向上に寄与できると考えられる。BEST は Java 言語により構築されており、モジュールは1つのクラスとして表現され、抽象度を高めた共通の機能（インターフェース）を実装することで、モジュール外部からは内部の詳細を隠蔽することが可能である。

(2) 部分システムの計算

空調システムの成立には、最低限、室と熱源が必要で

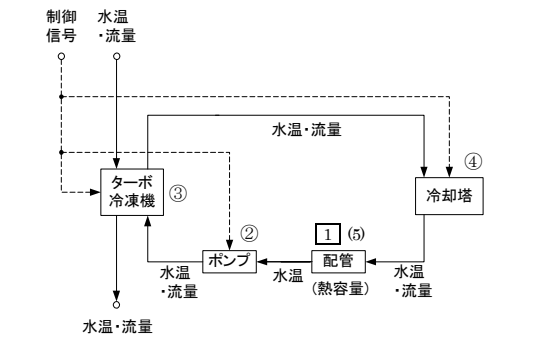
あるが、シミュレーションによる検討では、例えば熱源周りのみを対象としたい場合もある（図-1(a) 参照）。このように、完結した空調システム全体だけでなく、その一部のみを対象とした部分システムの計算についても対応できるようにする。部分システムの場合に「断絶」された入力情報（図-1(a) の例では熱源冷水入口温度・流量、制御信号）については、固定値の他、ケーススタディのための種々の値、BEMS で得られた時系列データ等を用いることが想定される。

(3) 部分システムのマクロ化

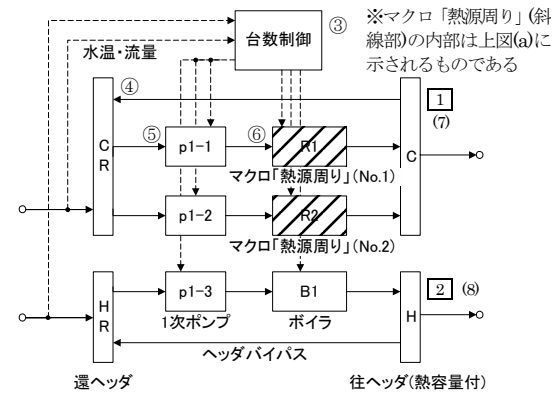
空調システムは、同じ「部分システム」の反復により構成される場合が多い。図-1(b) は、部分システム「熱源周り」（図-1(a)）を2セット包含した熱源群の例である。このような同じモジュール構成からなる部分システムを「マクロ」と呼ぶ部品として登録し、改めてそれら一つのモジュールと同じように使い回せる機能が望まれる。BEST では、1つ1つの機器単体（モジュール）を原子クラス、登録された部分システムをマクロクラスと称して、共通のインターフェースを実装することとしている。

(4) 動的なシステム計算への対応

従来、室および蓄熱槽のみを動的要素と考えるシミュレーションツールも多かったが、制御性の良否が室内環境・エネルギー消費に与える影響を検討したい場合など、一般機器の動特性をモデルに組み込みたいケースも考えられる。このため、原子クラス、マクロクラスが実装す



(a) 部分システム「熱源周り」(ターボ冷凍機)の例



(b) マクロクラスを包含する熱源群(冷房時)の例

図-1 部分システムとマクロ (凡例は図-3 参照)

るインターフェースの一つとして数値積分を行わせるメソッド (derivative) を用意し、動特性を記述できるようにする。

(5) 不連続、非線形な要素モデルへの対応

各モジュールのモデルとして、線形方程式や微分代数方程式といったクラスに限定することによって、システム全体を効率的に解くことも選択肢として考えられるが、一般の機器は非線形な挙動を示すばかりでなく、ある状態まで変化すると別のモードに離散的に遷移する、といった不連続な動作を起こすことが多い。BEST では、機器モデル内における場合分け、それに伴うモード変更等の不連続なモデル化を許容し、物理的プロセスに従って入出力を区別することとした。

2. 要素モジュールの基本形

要素モジュール (原子クラスおよびマクロクラス) の基本形の案を図-2 に、実装を検討している機能の一覧を表-1 に示す。各モジュールは、水・空気の物理的流れの方向に従って、時々刻々変化する機器入口条件(u)から出口条件(y)を計算することを基本とする。パラメータ(p)は、計算中変化しない、モジュール固有の特性値であり、時刻ループに入る前にメソッド「initialize」によってモジュール内部の変数にセットされる。「状態」(x)は、動的なモジュールの場合にのみ必要である。例えば、躯体の熱容量が無視できない室モジュールや、動

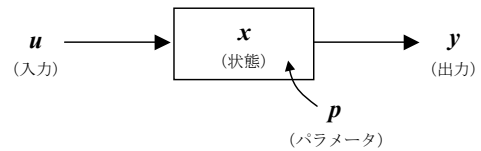


図-2 要素モジュールの基本形

表-1 要素モジュールが実装する機能 (メソッド) の案

メソッド	内容
initialize	・ 機器の定格等、固定値をセットする。 ・ 結果を保持する変数の作成等、必要な初期化を行う。
input	・ 運転スケジュールを受け取る。 ・ 流出入する熱媒クラスを受け取る。
output	・ このクラスを制御するクラスを受け取る。 ・ シミュレーション結果 (消費電力等) を返す。
update	・ 場合分けに必要な指定等を受け取る。 ・ 出力側の熱媒クラスを更新して返す。
derivative	・ 数値積分を行なう状態変数の微分値を返す。
setParameter	・ 外部から内部状態を更新する。
getState	・ 現在の内部状態を返す。
start	・ 起動に必要な処理を記述する。
terminate	・ 停止に必要な処理を記述する。

特性まで表現されたコイルモデル等である。ただし、TRNSYS や Simulink¹⁾のように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しておく方針である。状態変数はメソッド「derivative」によってその微分値が数値積分ソルバーに渡され、次ステップのために更新される。

流出入する熱媒クラスをメソッド「input」で一旦受け取ると、他のモジュールによって変更された時々刻々の熱媒の状態は、常時、当該モジュール内の熱媒オブジェクトにも反映される (参照渡しのため)。同様に、「update」メソッドで更新した熱媒の状態は、その熱媒クラスを引用する他のモジュールにも反映される。

制御ロジックも要素モジュールによって表現する。その場合、「入力」(u)、「出力」(y)は、発停信号、測定値、制御出力等の制御信号である。これら、熱媒以外の情報の受け渡しは、メソッド「input」、「update」の引数として、あるいは「output」メソッドの戻り値として、上位クラス (マクロクラス等) と受け渡しが行われる。

3. 部分・全体システムの処理手順

3.1 解法の概要

空調分野で用いられる既往のシミュレーションツールを大きく分類すると、①Simulink¹⁾等の汎用シミュレータ、②空調シミュレーションに特化したプログラム、に分けられる。計算の効率という点で後者のメリットもあるものの、BEST では極力前者を指向することとした。これにより、空調モデルの固有性は要素モジュール内のアルゴリズムと、モジュールの接続関係によってのみ表現され、全体を解くソルバーのアルゴリズムが分からなくても機器の追加等の拡張が行えることになる。

また、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。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、時間計算を短く取ることにより動的な変化を経時的に計算する（以下、前進法）こととする。

3.2 計算順序と処理手順¹⁾

前進法により全体システムを計算する場合、計算順序が重要となる。モジュールの入力のうち、その値の変化が、同時刻・同モジュールのいずれかの出力値に影響を及ぼすものが存在する場合（このような入力を direct-feedthrough port¹⁾、以下 d.f.p.、と呼ぶ）、当該 d.f.p. に接続された別のモジュールを先に計算しておかなければならない。図-3 に全体システムの構成例を挙げる。最初に、マクロクラスごとに d.f.p. の影響を受けない出力を計算し（図中四角数字）、次に信号の流れに従って順次モジュールの計算を行う（図中丸数字。この場合「計算」とは、表-1 のメソッド「update」、「getState」等に記述された手続きのことである）。最後に、「derivative」メソッドによる数値積分等により、次ステップの状態値を計算する（図中カッコ付き数字）。

前進法の場合、d.f.p. を持つモジュールのみが環状に接

続されると、適正な解が求まらない。物理的に配管・ダクトがループを形成していても、このような「代数ループ」の発生を避けるために、①ダクトループについては室の空気に熱・湿気容量を持たせる、②配管ループについては配管やヘッダの「熱容量体」を持たせる、③流量についてはループを形成させない、等を方針とする。③について、図-3 の例では、PID コントローラの出力から流量計算を開始することとし、熱源からの水量、空調機からの給気風量は、それぞれ、コイル、VAV に渡さないようにしてループを断ち切っている。

4. BEST の機器特性

4.1 考え方

機器特性データは基本的に静特性で作成する。作成・収集に関しては、BEST で独自に主要機器についてアンケート調査を行い定式化を行っている。機器の動特性については製造者の特性データが入手できない場合が多いので、無駄時間・熱容量を与えるなどの代替手法を検討する。

BEST はオブジェクト指向のプログラムのため、オブジェクトに格納される機器特性を表現する手続き（メソッド）は基本的に自由で、出力に影響する変数と入力との関係が定義どおりであれば、オブジェクトとして使うこ

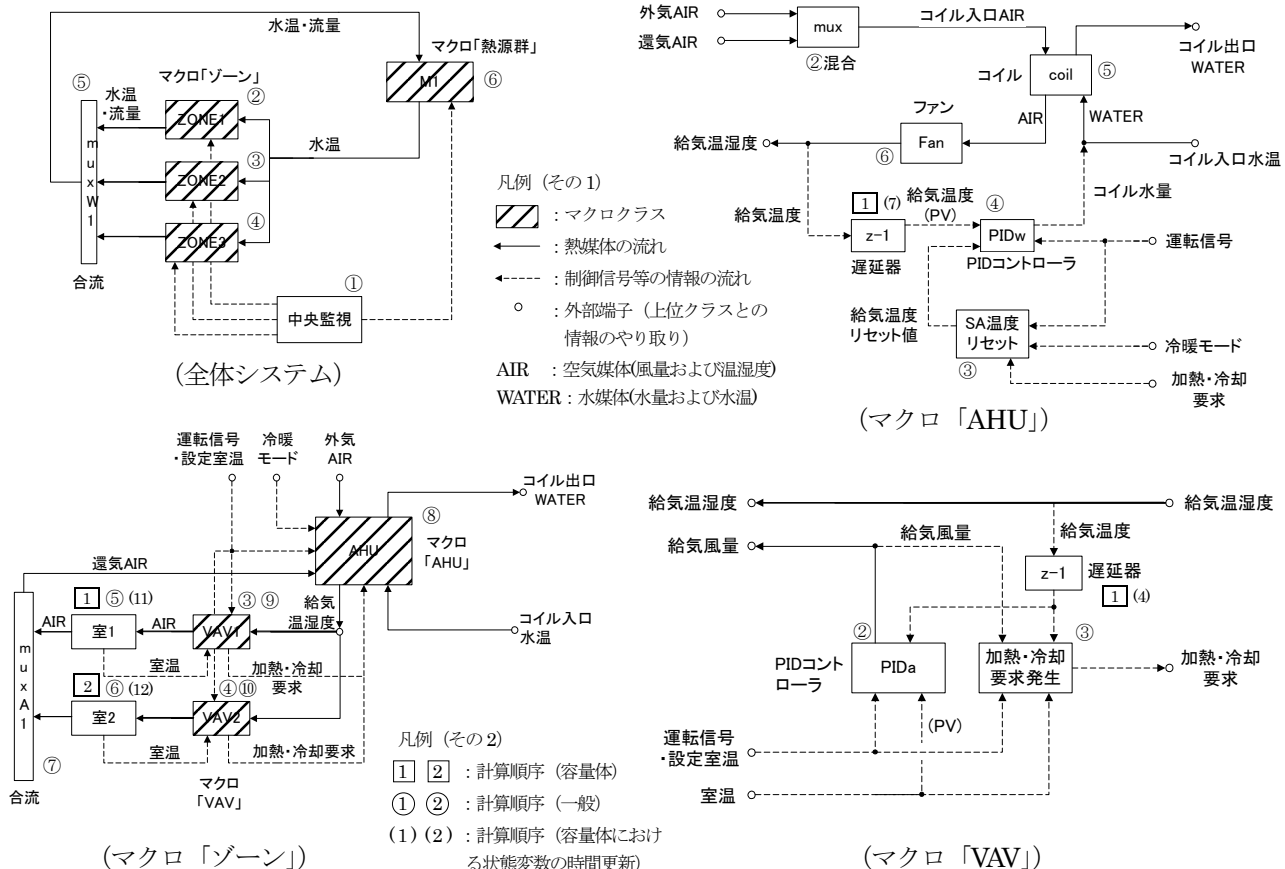


図-3 システムの階層構造と計算順序の例（マクロ「熱源群」の内容は図-1(b)参照）

とを可能とする。

4.2 静特性

機器特性としては機器の負荷率、入口温度、水量（流量）等を引数として、消費エネルギー、能力比等を求める近似式を作成する。近似式はBEST完成後のメンテナンスを考慮して、基本的に機種毎のタイプ毎に共通な式とし、容量別・メーカー別の個別の近似式は極力避ける方向で進める。例えば空調機のコイル伝熱係数(K_f)のように、物理的に式の予想が可能な機器に対しては下記の近似式を用いる。

$$K_f(U_f, V_w) = 1 / (a * \exp(b * U_f) + c * \exp(d * V_w))$$

K_f : 伝熱係数、 U_f : コイル正面風速、

V_w : コイル内水速、 a, b, c, d : 係数

冷凍機のように物理的な表現が煩雑な機種に対しては、各変数を影響関数として多項式で近似し、各近似式を乗ずることによって表現する。例えば、ターボ冷凍機の電力消費量 (P_e) は

$$P_e(X_u, G_{cd}, T_{cdi}, G_c, T_{ci}) = P_{e0} * C_{Xu}(X_u) * C_{Gcd}(G_{cd}) * C_{Tcdi}(T_{cdi}) * C_{Gc}(G_c) * C_{Tci}(T_{ci})$$

P_e : 電力消費量、 P_{e0} : 定格電力消費量、 X_u : 負荷率

G_{cd} : 冷却水量比、 T_{cdi} : 冷却水入り口温度、 G_c : 冷水流量比、 T_{ci} : 冷水入り口温度

C_{Xu} : 負荷率に対する影響関数、 C_{Gcd} : 冷却水流量に対する影響関数、 C_{Tcdi} : 冷却水入り口温度に対する影響関数、 C_{Gc} : 冷水流量に対する影響関数、 C_{Tci} : 冷水入り口温度に対する影響関数

各影響関数 C_{**} は、一次あるいは二次の多項式で近似する。

近似式の適応可能範囲を外れる場合は、①近似式をそのまま外挿する、②上限（下限）値で代替する、③運転不能とする、④下限値から原点に向かって直線的に下がる、を機器毎にデータテーブルで定義する。また、下限（上限）値等をユーザが任意に変更可能なものとする。

4.3 動特性

動特性は本来、HVACSIM²⁾ のように、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が、国内で販売されている機器のかかなりの機種をカバーすることを考えると、非常に煩雑であり、しかも新機種が発表されるたびに個別にメンテナンスすることは余り現実的とはいえない。

BEST では機器単体の特性として、静特性としての近似式で表現しているため、動特性としては起動時・停止時の遅れ特性のみ考慮し、連続運転中の動特性は考慮しない。更に、この起動・停止時・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である。BEST では、起動・停止・再起動の経過時間をパラメータとする関数を検討する。

動特性を考慮する必要のある機器は、熱容量の大きい機器であり、冷凍機・ボイラ・冷却塔が考えられる。他の機器については、シミュレーションの時間刻みが分単位であることを考慮すると、静特性で対応可能と考えられる。

更に機器入力値に対しては、実際の運転では起動シーケンスとして複雑な挙動をするが、分単位の時間刻みでは、時間遅れを無視して考えても問題ないと考えられる。

4.4 データベース

データベースとしては、機種数の多いものについては基本的に対応する機種の定格値のテーブルを作成し、入力の機種選定画面で選択する。設計時等具体的な機種が決まっていない段階では、国交省の設計基準³⁾に記載されている機器の定格値を選定することも可能とする。データテーブルとして作成する機器は、冷凍機（ターボ冷凍機、水冷（空冷）チラー、空冷ヒートポンプ、直焚冷温水発生機、蒸気（温水）吸収式冷凍機）とし、他の機器については、理論式を基本にした近似式を考え、機器の種類、定格値より定格を外れる特性を求める。

5. まとめ

BEST における空調システム側の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について説明した。収束計算を行わない「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るものである。クラス構想WG名簿（順不同）主査：石野久彌（首都大学東京）、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）、木下泰斗（日本板硝子）、後藤裕（三機工業）、菰田英晴（鹿島建設）、坂本滋（大林組）、芝原崇慶（竹中工務店）、松村一誠（清水建設）、安友哲志（三晃空調）、渡邊剛（NTTファシリティーズ）、協力委員：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) The Math Works, Inc.: "Using Simulink (Version 5) Model-Based and System-Based Design"(User manual of SimulinkTM), 2002
- 2) 空気調和・衛生工学会蓄熱最適化委員会: 「蓄熱式空調システムの制御と異常診断の最適化に関する研究（平成10年度）研究報告書別冊 HVACSIM+(J) 利用者マニュアル」(1999)
- 3) 国土交通省大臣官房官庁営繕部設備課、公共建築協会: 「建築設備設計基準（平成14年版）」, 全国建設研修センター（2002）