

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 83) 空調システム関連の開発状況

Development of an Integrated Energy Simulation Tool for Buildings and MEP Systems, the BEST (Part83) Status of Development of HVAC 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)
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 (建築研究所)

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

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

*³ Emeritus Prof., Tokyo Metropolitan University *⁴ Building Research Institute

This paper reports the status of development of HVAC simulation environment in an energy simulation tool, the BEST. We extended “template”, a capsulated macro consisting of included modules, to various parts of HVAC system such as secondary pump unit, heat source group, and zones with terminal units. Especially, the features of zones-with-terminal-units template are discussed in detail. Moreover, we describe automatic parameter tuning method employed in the PID control module.

はじめに

BEST 専門版のうち、衛生や電気設備を含めたシステム連成計算の計算フレームワークについては既に開発が終了しているが、入力の手簡易化、システムの汎用化、機器ラインナップの充実といった観点から、現在もバージョンアップ作業が重ねられている。

本報では、2010 年度の整備概況について報告し、特に大きく機能拡充が図られたゾーン空調テンプレートと PID 制御パラメータ自動調整機能について概説する。

1. 2010 年度の整備概況

2010 年度は主として以下の項目の整備を行った。

- 1) 機器モジュールの拡充 (その 88~90 で詳述)
- 2) テンプレートの拡充
- 3) 仮設調整テンプレートの整備 (その 84 で詳述)
- 4) PID 制御パラメータの自動調整機能の追加
- 5) マニュアルの整備
- 6) 機器特性チェック用テストモジュールの作成

ここで、「モジュール」とは、入出力ノードを有する一定のフォーマットからなる単体の部品を指し、原則として機器の 1 台 1 台に対応するものである。一方、「テンプレート」は、モジュール間の接続が既に完了した状態でパッケージ化された、モジュールの集合体であり、例えば「空調機テンプレート」は、コイル、ファン、加湿機といったモジュールを内包しており、モジュールと同様に外部に対して入出力ポートを有している。表-1 に現在実装されている主なテンプレート一覧を示す。この表では、空調以外の電気・衛生設備についても示している。

上記のうち、2)のテンプレートの拡充では、①対応システムの拡充 (2 次ポンプテンプレート、外気冷房全熱交付空調機テンプレート)、②大規模システムへの対応 (熱源群テンプレートにおける熱源台数の増加)、③モジュールやテンプレート間の接続を容易にするためのゾーン空調テンプレートの導入、を実施した。最後の「ゾーン空調テンプレート」は、空調機テンプレート、室内機 (室外機) テンプレートおよびゾーンテンプレートを入れ子状に包含したマクロなテンプレートであり、従来、システム構築のたびに各テンプレート間をダクト・配管や制御線で接続する必要があったものを、最初から接続された状態 (テンプレート) を元に容易に変更が可能となるようにし、入力の接続手間を省くことを狙いとするものである。

また、3)の仮設調整テンプレートは、機器容量を事前に決定することなく期間計算を実行できるテンプレートであり、前年度実施の中央熱源、空調機部分に加えて、分散型熱源の仮設調整テンプレート対応を実施した (詳細は次報参照)。

以下では、上記の整備項目のうち、2) に関連する「ゾーン空調テンプレート」の概要説明と、4) の PID 制御パラメータの自動調整機能の検討を行う。

2. ゾーン空調テンプレート

前述のように、ゾーン空調テンプレートの導入により、より包括化されたテンプレートを扱えるようになり、テンプレート間の接続手間の削減に繋がる。ゾーン空調テンプレートの Shell (外部との情報のやり取りをするた

表-1 BEST 専門版におけるテンプレート一覧

【テンプレート Shell モジュール】	
名称	実装テンプレート
ゾーン	各種ゾーン
ゾーン空調	各種ゾーン空調
空調システム	各種空調システム
BM 室外機	BM、PAC 等室外機など (セントラル系機器との併用)
BM 室内機	BM、PAC 等室内機など (セントラル系機器との併用)
空調機	空調機、外調機、FCU など
蓄熱槽	水蓄熱槽、氷蓄熱槽など
熱源・搬送	各種熱源、熱源群、2次ポンプなど
換気	換気
昇降機	昇降機
水・油供給	水・油供給
衛生基幹	衛生基幹
電気基幹	電気基幹
建築設備全体	各種建築設備全体例題モデルなど

【単線接続用 テンプレート Shell モジュール】	
名称	実装テンプレート
BM 室外機	EHP ビルマルチ室外機
BM 室内機	EHP、GHP ビルマルチ室内機
BM 室外機 GHP	GHP ビルマルチ室外機

めのテンプレートの外枠に相当するモジュール) は、図-1の左下図に示すように、複数システムの給気・還気、電力消費等のノードを有している。図の例では、ゾーン空調テンプレートの中にゾーンテンプレートのみを内包しているが、その他種々のバリエーションがあり、一般に内包できるテンプレート・モジュールとしては、ゾーンテンプレートの他に、室内機・室外機テンプレート、空調機テンプレート、および分岐・合流ダクト等がある。

図-2にゾーン空調テンプレートの別の例として、室内機+室外機+ゾーン1室の場合を示す。ゾーン空調テンプレート内の接続は終了しているので、各機器の仕様を入力する必要はあるものの、ユーザーはテンプレート内部の接続状況を意識することなく、ゾーンテンプレート外部との接続に注力すればよいことになる。

現状でゾーン空調テンプレートとして用意されているのは、前述の2つのテンプレートを含めて、①単室ゾーンのみ(図-1左下)、②複数ゾーンのみ、②室内機1+ゾーン1、③室外機1+室内機1+ゾーン1(図-2)、④室外機1+複数の(室内機1+ゾーン1)の組み合わせ、⑤空調機1+複数ゾーン(図-3左)、等がある。

ゾーン空調テンプレート内部の構成テンプレートを入替えることで、更に様々な別のシステムを簡単に構築することができる。例えば図-3に示すように、前記⑤の「空調機1+複数ゾーン」からなるゾーン空調テンプレートのうち、一部のゾーン(正確には前記①で示されるゾーン空調テンプレート)を、前記④の「室外機1+複数の(室内機1+ゾーン1)の組み合わせ」に入替えることによって空調機+パッケージマルチ方式の併用システム

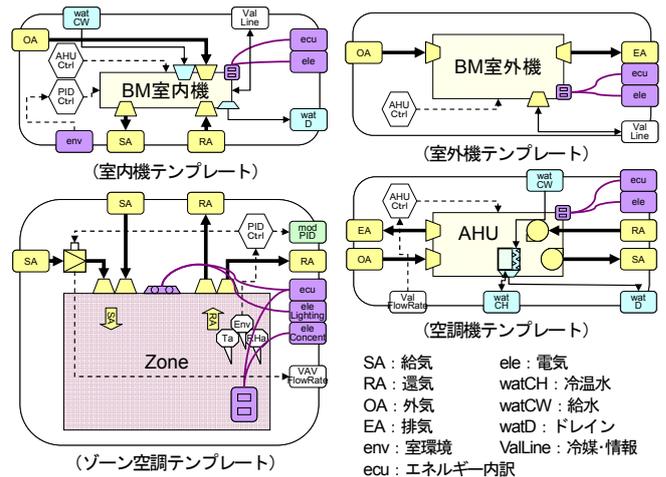


図-1 ゾーン空調テンプレートと主要構成テンプレート

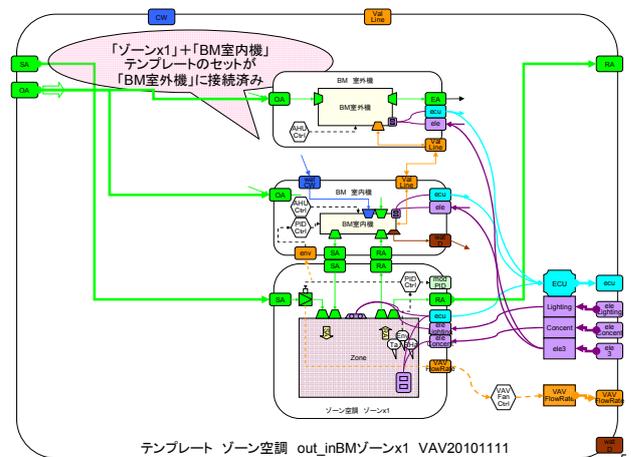


図-2 ゾーン空調テンプレートの例(室内外機+ゾーン)

が構築できる。また、別のゾーンを前記②の「複数ゾーン」に入替えることで空調系統の対象ゾーン数を簡単に増やすことができる(図-3右図)。

3. PID 制御パラメータの自動調整機能²⁾

3.1 概要

BEST のシステムシミュレーションでは、時刻ステップ内の繰り返し計算は行わず、機器等の計算モジュール間でデータを順次受け渡したら次の時刻ステップに進むエクスプリシット法を採用している。エクスプリシット法では、動特性を有する空調システムの制御性を評価する目的ではなく、期間エネルギー評価が主目的な場合であっても、室温制御や給気温度制御等を行うために、実システム同様フィードバック制御を組み込むことが必要であり、BEST ではPID 制御モジュールを用いている。

今までは、このPIDパラメータとしてデフォルト値を用意していたものの、条件によってはPIDパラメータの調整を行わないとハンチング等の発生が見られた¹⁾。そこで、ユーザーにチューニングをさせる必要がなく、かつ容易に導入可能な自動チューニング機能を組み込んだ。

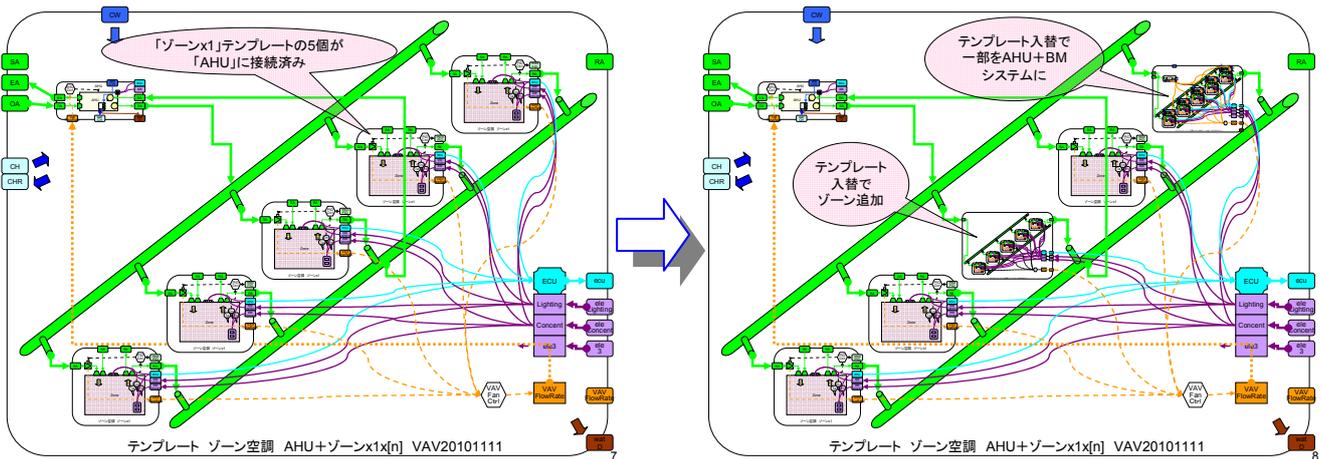


図-3 内部構成の入替による複雑なシステムへの展開

ここではそのアルゴリズムの概要と効果を検証する(詳細は文献²⁾参照)。

3.2 PIパラメータの自動調整法

次のような方針によりPIパラメータの自動調整を試みた(D動作は行わないものとする)。
 ①制御結果の偏差の積分値を減らす、
 ②整定時間の短縮を目指す、
 ③PID制御モジュールで得られる情報のみで調整する。

①については、PI制御による制御量は目標値の上下を振動して偏差が減衰する形(図-4において制御Bではなく制御Aの制御性)を目指し、速応性の観点からもオーバーシュートを許し、減衰特性として1/4減衰となるように比例ゲインを調整することとした。②については、①に対する比例ゲインの調整による整定時間(ここでは制御量がパラメータの自動調整非適用幅以内となるまでの時間とする)の短縮効果の期待に加え、再起動時の初回操作量を年間固定値ではなく前日の状況を加味して決定することでオーバーシュートの加減を調整し整定時間短縮を目指すこととした。図-5に比例ゲインの調整方法について示す。パラメータの自動調整非適用幅はユーザーが決定できるようにした。例えば、室温制御として目標値の上下0.1℃を目指す場合、この0.1℃をパラメータの自動調整非適用幅とする。微分時間は0秒とした。積分時間は、時間を変動させた別途試算の結果から制御誤差が小さかった計算時間間隔 ΔT の1/2とした。

3.3 PIパラメータの自動調整による効果

PIパラメータの自動調整の効果を検証するために、既報¹⁾と同じサブシステム(空調機+室)を対象にシミュレーションを行った。室はインテリアとペリメータからなり、インテリアはVAV、ペリメータはCAV空調機である。計算は、計算時間間隔 ΔT を変えるたびにPIパラメータのチューニングを行うケース(Case1)、および上記の自動調整機能を適用したケース(Case2)について行う。なおCase1の手動によるパラメータチューニングは既報¹⁾に従っており、7月のデータを対象としてい

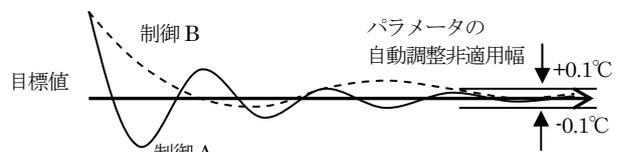


図-4 比例ゲインの自動調整時の制御方針

比例ゲインの調整法のロジック
 あるPID制御モジュールの対象において下図のように時刻 $n-1$ における制御量 y_{n-1} 偏差 e_{n-1} が時刻 n に y_n, e_n に変化したとする。①~③の自動調整の方針により、時刻 n の制御量の理想値(1/4減衰)を $y_{n,exp}$ として比例ゲインの補正係数 B_n を次の式で求める。

$$B_n = 1.25 / (| (y_n - y_0) / (y_{n-1} - y_0) - 1 |) = 1.25 / (| \xi - 1 |) \quad (\xi < 0) \quad \dots (1)$$

$$B_n = 1.25 / (| (y_n - y_0) / (y_{n-1} - y_0) + 1 |) = 1.25 / (| \xi + 1 |) \quad (0 < \xi < 0.5) \quad \dots (2)$$

ここで ξ : 減衰率 $\xi = e_n / e_{n-1}$

ただし、補正係数の適用には次の条件を満たす場合とする

- 1) 偏差 e_n と e_{n-1} がパラメータの自動調整非適用幅を超えていること
- 2) 制御停止後の再起動の初回には適用しない
- 3) 係数 B_n の最大値は4、最小値は0.25とする

過剰な補正を避けるため式(3)の A_n を補正係数として適用し式(4)にて時刻 n の比例ゲイン K_{pn} を求める。

$$A_n = (1 + B_n) / 2 \quad \dots (3)$$

$$K_{pn} = K_{pn-1} \times A_n \quad \dots (4)$$

図-5 比例ゲインの調整法

る。図-6に自動調整を適用した場合のインテリア系統(VAV)のシミュレーション結果を示す。 $\Delta T=10$ 分の室温では若干のハンチングが発生しているものの設定温度からの顕著な偏りはみられない。

図-7に ΔT が5分のCase1とCase2について予冷時

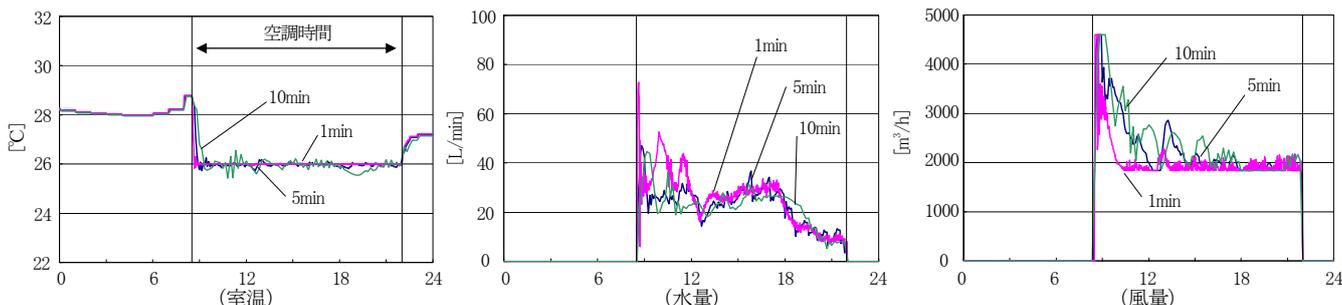


図-6 計算時間間隔の時刻変動への影響 (Case2, インテリア・空調機 VAV, 7/3)

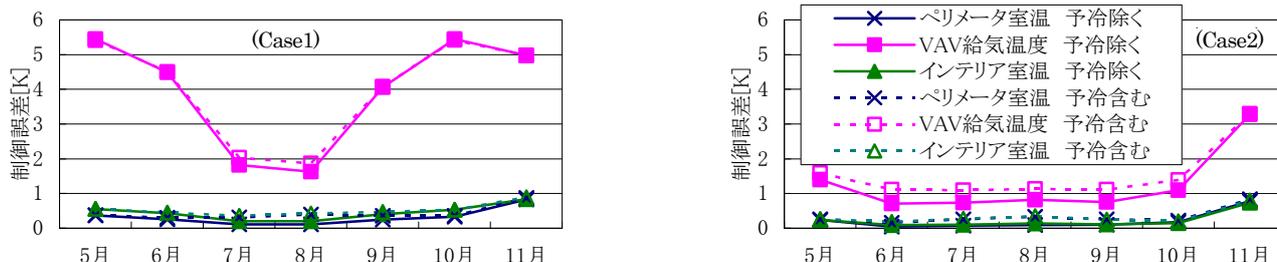


図-7 予冷時間帯を除いた場合、含む場合の室温と給気温度の制御誤差の月平均値の変動比較 (Case1, Case2 $\Delta T=5$ 分の RMSE)

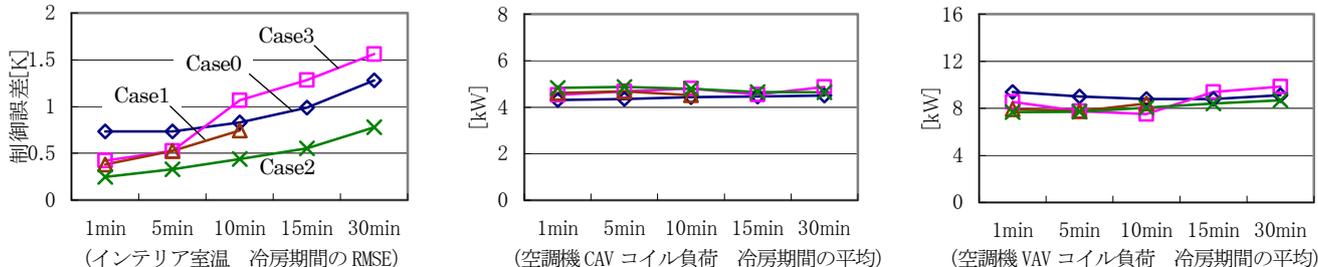


図-8 計算時間の制御誤差へ与える影響 (冷房期間平均値の比較)

間帯を除いた場合、含む場合の室温と給気温度の制御誤差の月平均値の変動の比較を示す。Case1 の制御誤差はチューニング対象月 (7月) 以外で大きくなっているが、Case2 の予冷時間帯を除いた場合の制御誤差は月によらず安定しており、自動調整による季節追従が有効であるといえる。

図-8 に各 ΔT に対する制御誤差の比較を示す。Case1, 2 に加えて、PI パラメータをデフォルト値 (比例ゲイン=0.05、積分時間=600、微分時間=0) のままで計算した場合 (Case0)、及び $\Delta T=5$ 分でチューニングしたパラメータのまま他の ΔT にも適用した場合 (Case3) についても示す。室温の制御誤差をみると、自動調整機能による場合 (Case2) がいずれの ΔT においても最も小さな RMSE を示している。また、室温制御については ΔT が小さくなるほど制御誤差が小さくなっており、室内環境評価など、室温設定値との乖離が問題となるような場合には、計算時間間隔を短めに設定することが望ましいことが分かる。これに対して、コイル負荷の期間計算結果は ΔT およびチューニングの方法の影響は小さいが、Case2 の場合、 $\Delta T=10$ 分以上では $\Delta T=1$ 分との乖離が多少見られ、可能な限り $\Delta T=5$ 分とすることが無難である。

まとめ

空調システム関連の BEST の整備状況について、特にゾーン空調テンプレートの機能と、PID 制御モジュールのパラメータ自動調整機能について概説を行った。

【参考文献】

- 1) 長井達夫, 二宮博史, 久保木真俊, 石野久彌, 郡公子, 村上周三: 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 70) 空調システム計算における計算時間間隔の影響, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp. 2559-2562 (2010)
- 2) 二宮博史, 長井達夫, 菺田英晴, 菅長正光, 野原文男, 石野久彌, 村上周三: 建築総合エネルギーシミュレーションツール BEST における空調 PID 制御モジュールのパラメータの調整に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 171, pp. 31-40, 2011

【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 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。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。主査: 石野久彌(首都大学東京名誉教授)、委員: 一ノ瀬雅之(首都大学東京)、大西晴史(関電工)、内海康雄(宮城工業高等専門学校)、木下泰斗(日本板硝子)、工月良太(東京ガス)、郡公子(宇都宮大学)、菺田英晴(鹿島建設)、佐藤誠(佐藤 ER)、芝原崇慶(竹中工務店)、新武康(清水建設)、菅長正光(菅長環境設備事務所)、高橋亜璃砂(大林組)、田中拓也(大成建設)、長井達夫(東京理科大学)、二宮秀興(鹿児島大学)、野原文男、長谷川巖、二宮博史、丹羽勝己、久保木真俊(以上、日建設)、保木栄治(東京電力)、柳井崇、品川浩一(以上、日本設計)、事務局: 生稲清久(建築環境・省エネルギー機構)