

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3）

## 建築・空調システムの計算体系

Development of an Integrated Energy Simulation Tool for Buildings and MEP Systems, the BEST (Part 3)

### Outline of the Modeling Method of the Building and HVAC Systems

正会員 石野 久彌（首都大学東京） 特別会員 村上 周三（慶応義塾大学）  
 正会員 赤坂 裕（鹿児島高専） 正会員 郡 公子（宇都宮大学）  
 正会員 長井 達夫（東京理科大学） 正会員 牧村 功（日建設計）  
 正会員 野原 文男（日建設計）

Hisaya ISHINO\*<sup>1</sup> Shuzo MURAKAMI\*<sup>2</sup> Hiroshi AKASAKA \*<sup>3</sup> Kimiko KOHRI\*<sup>4</sup>

Tatsuo NAGAI\*<sup>5</sup> Isao MAKIMURA\*<sup>6</sup> Fumio NOHARA\*<sup>6</sup>

\*<sup>1</sup> Tokyo Metropolitan University \*<sup>2</sup> Keio University \*<sup>3</sup> Kagoshima National College of Technology

\*<sup>4</sup> Utsunomiya University \*<sup>5</sup> Tokyo University of Science \*<sup>6</sup> Nikken Sekkei Ltd

This paper presents the concepts and the features of modeling in BEST for simulation of space thermal conditions and HVAC energy consumption. The heat balance between spaces, air handling systems and primary systems is solved simultaneously. Two solution techniques are provided. One matches with integrated simulation and the other is for simulation of spaces that is independent of systems. They are properly used with a variable time step.

#### 1. 序

現在 BEST プログラムの開発真最中である。当初、そして現在も「現在のプログラムにおいて最も大切なことは、変化、というキーワードに耐えうる柔軟なプログラム作りであって、それには開発者間の密なコミュニケーションかつユーザの要求変化への対応をとりながら、常時動くプログラムをアジャイルに開発することである。」との理念を貫いているが、プログラム作成上、多くの試練に遭遇していることも事実である。本報では、現状での建築・空調プログラムの進展具合と今後の予定を述べることにし、オブジェクト指向、アジャイル開発、プログラムの柔軟性については省略する。特に建築・空調プログラムの新規性のいくつか

をご理解いただけると幸いである。

#### 2. プログラムの計算目的

図1に計算目的をマインドマップの形で表現する。目的は大きく4つに分けられ、年間時刻別計算、設計計算、行政支援計算、特定目的のための計算である。年間時刻別計算は最も標準的な目的であり、年間エネルギー消費、期間消費エネルギー、特別値評価などを検討するものである。設計計算は最大負荷計算であり、機器容量の決定、システム比較計算などを行うことであり、設計実務者としては必要不可欠の要求である。行政支援用としては、国策としての環境負荷削減という大目標に対して、設計作品の省エネ性能を客観的に評価しうるツールとしての信頼性を確保することが重要

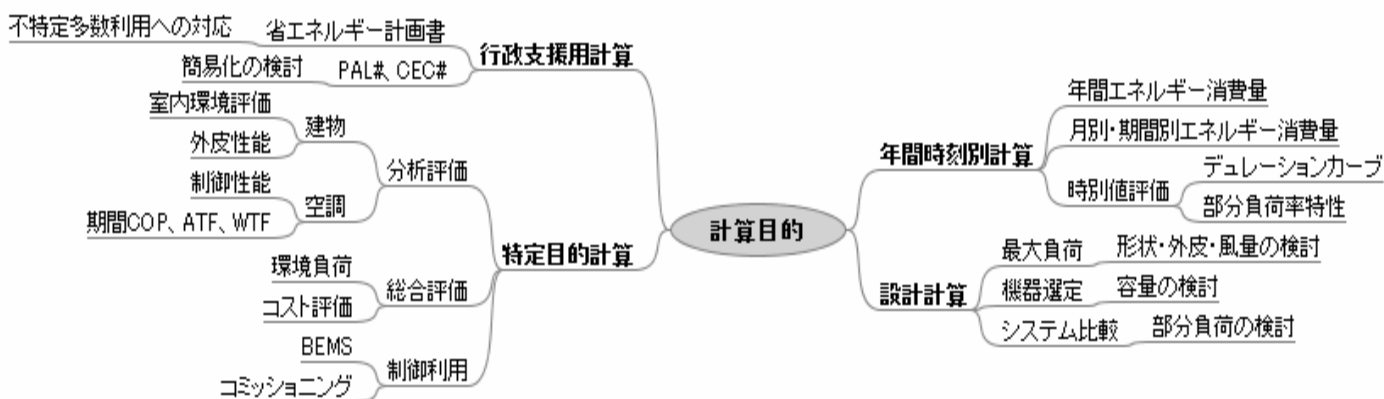


図1 BESTの計算目的

表1 建築・空調システムの連成計算法の比較

解法	概要	長所	短所
直接解法	現象を線形化表現して連立方程式を解く。未知数は、現時間ステップの状態値。収束計算が不要となるように、その都度未知数や方程式を検索選定する。	計算時間間隔 $\Delta t$ は、解法の制約を受けない。収束計算不要	線形化が困難な場合は利用不可。未知数検索のために計算を繰り返す必要がある。計算手順が複雑。
反復解法	非線形の式を含む連立方程式を収束計算で解く。未知数は、現時間ステップの状態値。	$\Delta t$ は、解法の制約を受けない。	不連続な現象に対して、解が収束しない場合がある
前進解法	未知数は次時間ステップの状態値として、連立方程式にしない。PID制御などの制御理論を利用してシステム操作量を決め、平衡状態を求める。	連立方程式を解く必要がなく、収束計算も不要。	$\Delta t$ は短め。適切な $\Delta t$ 設定が必要。制御の安定性のために、non direct-feedthroughとなる要素が必要。

であり、入出力の分かり易さが必須事項である。入力としては住宅、非住宅など多用途の建築に対して確実に簡易な手法をとること、出力項目としては二酸化炭素排出量、エネルギー消費量、資源消費量、建物からの排熱量、室内形成環境のクオリティ評価ならびにライフサイクルの視点での評価などが挙げられる。特定目的計算としては、分析評価、統合評価、制御利用などがある。BEST-Basic としては行政支援用、BEST-Professional としては年間特別計算、設計計算など一般設計技術者用であり、BEST-Extended としては広範な特定目的計算を扱うものであり将来の対応を想定している。

### 3. 建築・空調システム計算法の特徴

3.1 建築・空調システムの連成計算法 BESTでは、空調システムを想定しない建築のみの計算、室熱負荷を与条件とする空調のみの計算、建築と空調システムを統合する計算の3種を可能とすることを基本方針にしている。建築・空調システムの統合計算では、どのように連成計算を行うかが問題となる。主な連成解法として、表1に示すものが考えられる。建築の熱平衡式は線形表現が可能であり、この場合、建築のみの計算では、直接解法を利用でき、計算時間間隔は、従来のように1時間程度で十分な場合が多い。これに対して、空調システム側には非線形不連続な現象が多く、直接的解法を採用するには困難が多く、反復解法や前進解法を利用する方が現実的である。反復解法には、解が収束しないことがあるという問題がある。多様な空調機器に対して支障なく解を得るには、前進解法が最も適していると判断した。この方法では、誤差を抑えるために計算時間間隔を短くする必要がある。また制御の安定性のために、応答に遅れのある構成要素を含ませることが重要であり、水系は水熱媒の熱容量で十分と予想されるが、空気系は空気の熱容量では不足の恐れがあり、室熱容量として、室空気のほか家具類の熱容量も一部考慮するなどの対応が必要である。

3.2 計算法の切換え システムとの連成が不要な場合に、建築側で前進解法をとると、解法の都合から計算時間間隔を短くしなければならないというデメリットが生じる。

そこで、建築側が独立して計算するときには、直接解法を採用できるようにした。BESTで採用した建築側の直接解法を「後退法」、前進解法を「前進法」と呼んで区別する。時間帯によって計算法を切り換えることが可能で、空調時には短い時間間隔で前進法による連成計算を行い、非空調時には従来のように1時間間隔程度の長い時間間隔で後退法による建築側計算を行うことになる。

3.3 計算時間間隔 計算目的によって、短い時間間隔の結果が必要な場合とそうでない場合とがある。また、それとは別に、解法によって、そのときどきで適切な計算時間間隔の設定が必要な場合もある。計算時間間隔を可変とする場合、気象データの新たな整備や補間法の開発のほか、壁体の非定常伝熱計算法、最適な計算時間間隔の設定法、計算部位による計算時間間隔の使い分けなどの検討が必要になる。非定常伝熱計算法は、計算時間間隔可変に対応できる項別公比法とした。現段階では、計算時間間隔はスケジュール入力とし時間帯別に設定可能である。今後、前進法利用時の最適計算時間間隔の自動設定法や建築側とシステム側、あるいは壁体貫流熱と吸熱での計算時間間隔の使い分けについて検討する予定である。

3.4 多数ゾーンの相互影響 建築側は、多数ゾーンの相互影響を考慮できる計算とした。隣接ゾーンの影響は、内壁貫流熱やゾーン間換気により考慮する。インテリアゾーンとペリメータゾーンの相互影響を考慮する計算や住宅多数室計算も可能である。

3.5 多様な空調機器構成への対応 空調システムは、多様な機器構成が考えられ、今後新しいシステムや技術も開発される。そのため、自由な機器構成が可能で、将来の拡張性も高い計算体系を構築する必要がある。同時に、機器構成の入力が複雑にならないよう配慮することも重要となる。BESTでは、機器の違いに左右されない汎用性の高い解法の採用のほか、構成要素のモジュール化と入出力の明確化、Java言語を利用したオブジェクト指向のフレームワークの構築、複数の構成要素を接続したものを新たに独立したモジュールとして定義して利用、などの方針をとって開発を進めている。

3.6 室内環境 エネルギー評価のみではなく、室内環境の快適性評価も可能とするため、温熱環境指標

(PMV)の計算も行う。着衣量、代謝量は期間別入力値、気流速度は固定値、MRTは各ゾーンのASTで代用する。今後は、ブロックモデルの導入、さらにはCFDとの連成などの検討を行う予定であり、室内温度分布の評価も可能とする。

#### 4. 建築側計算法の概要

建築側は、既に述べたように、大部屋空間を水平方向に分割した計算を可能とした。上下方向の空間分割については、今後、壁面流・噴流の影響を考慮するブロックモデルの組み込みを検討する予定である。表面温度を未知数とするかどうか、すなわち対流・放射を分離した熱平衡式を解くかどうかについて検討した結果、対流・放射近似分離の方法を採用することにした。対流・放射を完全分離する場合、形態係数や透過日射の室内日照の計算をある程度正確にする必要があり、また3次元空間情報の入力が必要となることから、実用的とはいえないためである。非正常伝熱計算法の検討に当たっては、計算時間間隔可変、基本的に一次元伝熱を対象とすることを基本方針とした。HASP/ACLDで採用されたレスポンスファクター法

は、計算時間間隔可変にはできない。後退差分法はよく利用される計算法であるが、未知数が多くなること、前進差分法は計算時間間隔と壁体分割に制約があるなどの欠点があり、根を減らした上での項別公比法を利用することにした。表2-1に主な計算項目と、BESTでの対応方針を示した。窓に関しては、多様な種類の計算が可能で、今後さらに計算対象を拡大する予定である。換気計算やCFDとの連成も、視野に入れている。

#### 5. 空調システム側計算法の概要

冷凍機、コイルなど機器要素の計算モジュールを連結することで、空調システムのモデルが構築され、計算可能となる。室も1つのモジュールとなる。冷凍機、冷水1次ポンプ、冷却水ポンプ、冷却塔などは、予めモジュールを連結してマクロとして用意することができる。拡張版では、ユーザがモジュールを追加することもできる。空調システム側の計算は、常に前進法である。常微分方程式で表されるモジュールは、4次のルンゲクッタ法を利用して数値積分を行い解を求める。システム側の平衡状態は、PID制御のモジュールを組み込むことで求める。表2-2に空調システム側の計算項目を示す。個別式空調についても計算可能とする。この場合、on-off制御であっても、まずPID制御モジュールをも用いて計算を行い、後からon-off運転を行う場合に換算する。

#### 6. 結

建築・空調システムの計算体系を述べた。現在計算可能な項目と今後組み込みを検討している項目を説明した。

表2-1 建築側計算項目と対応方針

項目	内容	対応
各種スケジュール	スケジュール入力値をもとに、折れ線変動あるいはステップ変動を仮定して計算	
隣棟	隣棟高さから隣棟までの距離から計算より現実的な隣棟影響の考慮	B
外部日除け	垂直ルーバ・水平ルーバ 多様な形状のルーバ	拡張版
壁体	熱・湿気物性値の見直し、整備	A
家具類	一次元伝熱計算(項別公比法) むら家具類は、実験に基づく吸熱応答利用	
	屋上緑化、地中壁への対応	C
	二次元、三次元伝熱計算、吸放湿計算	拡張版
窓	各種窓の熱性能データ整備	
	各種窓の可視光性能データ整備	A
	ブラインド内側・内蔵一般窓、AFW	
	日射熱取得率と熱貫流率を利用。入射角特性は代表ガラスの特性を使用。	
	より正確な入射角・プロファイル角の影響考慮	A
	スラット角制御、PPW	B
	ダブルスキン(換気計算との統合)	C
	熱・光の詳細計算	拡張版
隙間風	換気回数法 中性帯高さ、外部風圧分布を仮定した基準階外壁面積法、窓面積法	A
	エントランス開口(換気計算との統合)	C
在室者	Two-Nodeモデルを応用した方法	
照明	ワット数入力、対流・放熱比率を仮定 放熱特性データの整備	A
	調光制御(光・電気設備との統合)	B
機器	発熱機器データの整備	A
空間分割	水平方向のゾーン分割 上下方向分割(ブロックモデル)	A
熱的快適性	各ゾーンASTを利用した作用温度、PMV計算	
光・電気計算との統合	簡易な昼光照度分布計算・調光制御の計算	B
換気・気流計算との統合	自然換気の計算(空調・換気システムの影響は無視)	C
	ダブルスキン	C
	CFDとの統合	C

: 対応済み、A、B、C: 優先順位(A、B、Cの順に高い)

表2-2 空調システム側計算項目と対応方針

項目	内容	対応
(個別式)マルチユニット	EHP、GHPの冷房or暖房計算 外気温、吸込空気温、配管長さ、配管高低差による能力補正。On-off制御に対しては、室温一定制御を想定した計算結果からon比率を求める	
	機器特性データの整備	A
	冷暖熱回収運転	B
(中央式)熱源基本要素	冷水水発生機 ボイラ、電動ヒートポンプチラー 開放式冷却塔	A
	密閉型冷却塔、ヒーティングタワー	B
	各種機器特性データの整備	A
	各種台数制御法	A
拡張システム	蓄熱システム コジェネレーションシステム	B
搬送基本要素	ポンプ(CWV)、ファン(CAV) ポンプ(VWV)、ファン(VAV)	A
	配管・ダクトの合流・分岐 圧力バランス	拡張版
二次側要素	冷水水コイル(濡れ面係数法) 水加湿器 蒸気コイル、その他加湿器	A
	全熱交換器、外気冷房、その他外気制御	A
	各種制御方法	B
BEMS	実データを利用した詳細計算	拡張版

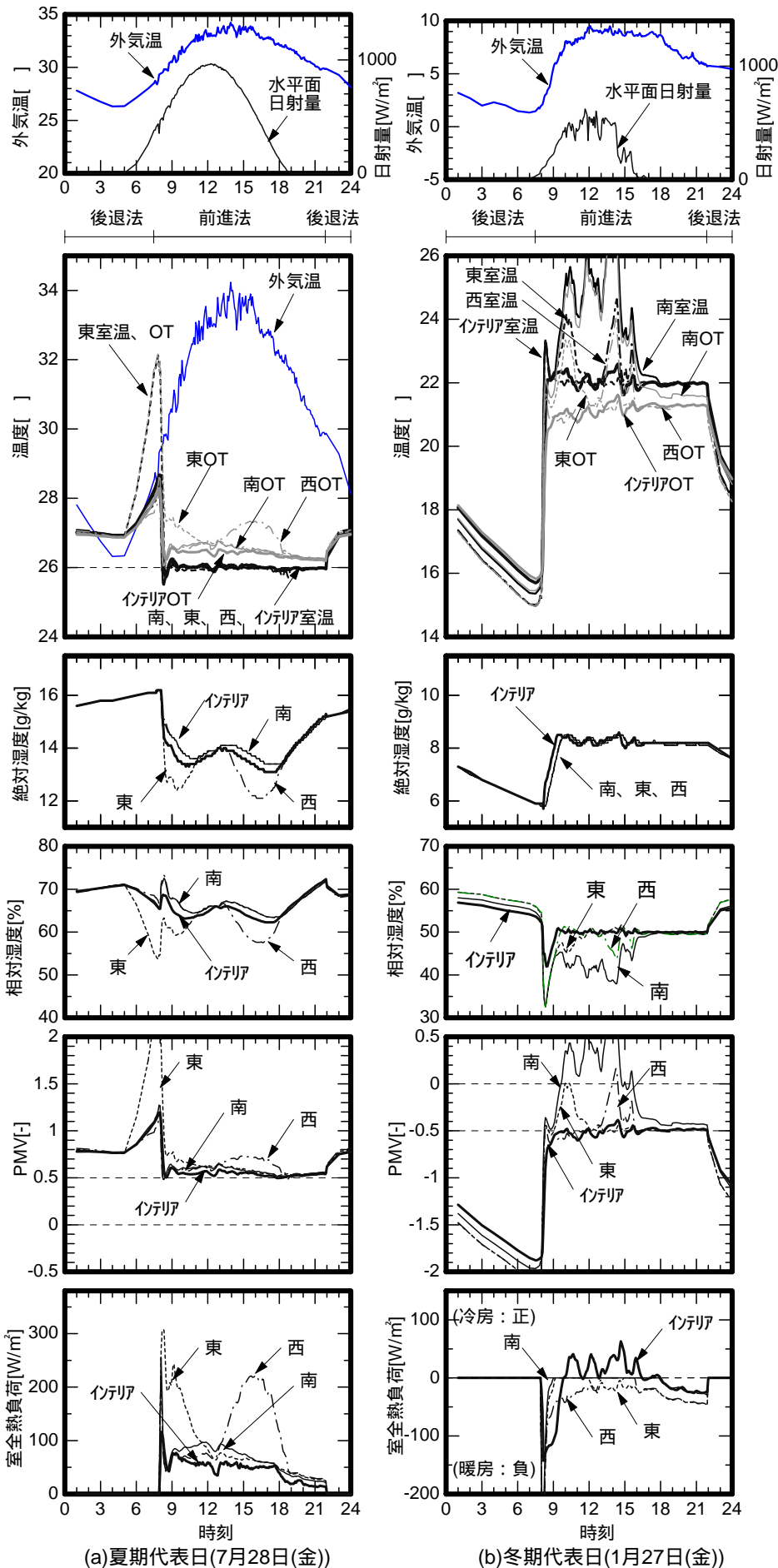


図2 代表日の室内環境・室負荷時刻変動(大阪2006年)

【図2注記】

事務所標準条件(その14参照)での計算結果。気象は大阪1分値データを使用。室内環境と室負荷は、基準階南側半分の南、東、西、インテリアゾーンの結果を示した。窓は、高さ2.6m、low-e 複層ガラス+中間色ブラインド(開閉調整あり)、外部日除けなし、隙間風0.2回/h、ゾーン間換気量:200CMH/m、内部発熱ピーク値:照明20W/m<sup>2</sup>、人員0.15人/m<sup>2</sup>、機器15W/m<sup>2</sup>、空調方式:インテリアAHU(CAV、風量7回/h、取入外気量はペリメータゾーン供給用も含む)、ペリメータFCU、空調時間:8:00~22:00、設定温湿度:冷房期26、暖房期22、50%、熱源:冷房期は冷熱のみ、暖房期は温熱のみ供給、計算時間間隔:7:30~22:00は5分、22:00~7:00は60分、7:00~7:30は30分。

【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)、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)

【文献】

- 1) D. B. Crawley, J. W. Hand etc., M. Kummert and B. T. Griffith, Contrasting the Capabilities of Building Energy Performance Simulation Programs, 15-18, 9th IBPSA Conference, 2005
- 2) Godfried Augenbroe, Trends in Building Simulation, Advanced Building Simulation, Spon Press, 2003
- 3) EnergyPlus Engineering Reference, U.S.Department of Enrgy