

建築物総合エネルギーシミュレーションツール“BEST”の開発

村上周三 (一財)建築環境・省エネルギー機構 特別会員 牧村 功 名細環境・まちづくり研究室 正会員
石野久彌 首都大学東京 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
長谷川巖 (株)日建設計 正会員 品川浩一 (株)日本設計 正会員

キーワード: BEST, エネルギーシミュレーションツール(Energy Simulation Tool), 建築・設備統合計算(Integrated Simulation of Buildings and MEP Systems), 高性能ファサード(High-Performance Facades), ZEB

BESTは米国のEnergyPlusプログラムを追いかけるように開発された。建築計算の特徴は、多角的評価が可能、拡張性・利便性に配慮したエンジン構成とデータベースであり、設備側は同一フレームワークのモジュールを定義し、それを拡張したテンプレートを用いることにより総合シミュレーションを可能にした。その他、拡張性のある機器特性データベース、汎用性のある省エネルギー設計ツールの構築、プログラムの妥当性・有用性の確認とツールの普及促進と継続性の保持などに力を注いでいる。

はじめに

BESTの開発は2005年秋に始まるが、当初はHASPの陳腐化に対して、日本独自の新しいプログラム開発が必要であるという要請からスタートしたものである。

そもそもシミュレーションの登場は、1971年の本学会からのHASP/ACL Dという動的年間熱負荷計算プログラムであった。HASP開発当時からコンピュータの進歩は目覚ましく、開発当時の最速のコンピュータといわれたCDC 7600の演算速度は36 MFLOPSで、現代の最速の京では10 PFLOPSである。ムーアの法則のとおり5年で10倍のスピードアップが続いている。パソコンにおいても同様であり、今の最速のパソコンのスピードは100 GFLOPS程度である。HASP時代の最速のメインフレームの2800倍である。この高速化を利用しない手はないのである。

1. 開発の特徴

BESTには、BEST 1406 専門版という基準となるプログラムと国策としての省エネ法や実務の省エネルギー設計に利用できるBEST 1409 省エネツールがある(注:現時点2016年4月においては、BEST 1602と進化発展している。)専門版のほうは研究者・開発者向けであり広範な入力が必要とするが、省エネツールのほうはビジュアル入力を基本とした明瞭簡易さが特徴となっている。これらは、UIにこそ相違はあるもののエンジン部は同一である。

建築設計において省エネルギー性能とか熱環境性能について設計要因の効果を見るとき、設計要因間に相互作用が有意となることが多く、単独の設計要因の主効果は意味を

持たなくなる。建築計画、設備計画の設計行為のほとんどは交互作用の影響を受け、交互作用の解明が設計行為ともいえる。そこに建築と設備一切が統合化されたプログラムの必要性、プログラムの大型化が出現する。大型プログラム開発にはコミュニケーションを重視したアジャイルな対応が大切となり、共同開発を容易とするオブジェクト指向プログラミング言語Javaを利用することにした。

2. 建築計算法とデータベースの特徴

2.1 建築・設備の連成、非連成の両計算機能

BESTでは、従来の熱負荷計算を“非連成計算”、具体的な設備システムを想定し建築との熱平衡を解いたうえで、エネルギー消費量を求める計算を“連成計算”と呼んでいる。両計算機能を実現するために、熱平衡式解法の切換え、計算時間間隔の変動設定が可能な計算法を提案した。

熱平衡を解くときに、連成、非連成のそれぞれに適する解法として、エクспリシット法、インプリシット法を採用し、両者を適宜切り換える方法とした。時間帯により解法を切り換え、計算時間間隔も解法に適するよう変動設定できる。これにより、設備の非線形・不連続な現象を扱う連成計算に対して確実に解を得られ、非連成計算に対してはむだのない効率的な計算処理が可能となった。

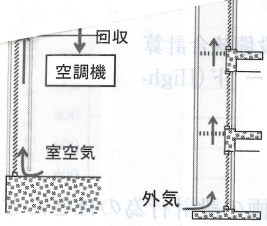
2.2 汎用性の高い放射計算法

室内表面温度を未知数とする対流・放射完全分離の計算法は採用せず、従来の熱負荷計算で利用されてきた対流・放射近似分離の考え方を踏襲し、その計算法を改良した。これにより、三次元情報入力が不要となり、自由な空間形状を計算可能できるよさを保持しつつ、空間に応じた放射熱の遅れ特性を反映する計算が可能となった。さらに、発熱体からの放射熱の室内各面への配分とそれによる表面温度変化を考慮する計算法をつくり、放射冷暖房パネルと室内との放射熱交換を評価できるようにした。

2.3 最大熱負荷計算機能

無償公開された国内842地点の拡張アメダス設計用気象データを利用する最大熱負荷計算を可能とした。複数用意されている気象タイプの使用方法として、全タイプの日周期定常計算を行い、そのなかからピークを検索する方法を導入した。また、日周期定常計算用の予冷熱計算法を提案

575



(a) AFW (b) ダブルスキン

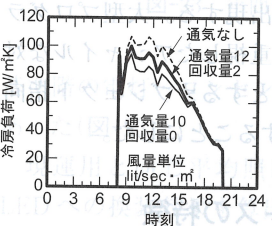


図-1 計算可能な窓システム

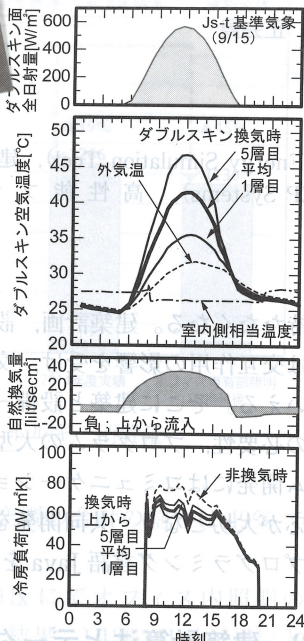


図-2 5層吹抜けダブルスキン

任意時間の予冷熱や住宅のように1日に何度も発停する場合の予冷熱にも適用できるようにした。

2.4 多様な窓の計算機能

ブラインド付き一般窓の日射熱取得について、ガラスの入射角特性を流用する従来の計算法に対して、プロファイル角の影響も考慮する新しい計算法を提案した。さらに、熱性能を簡単に推定することが困難であったダブルスキンについて、熱貫流率、日射熱取得率、ダブルスキン内空気温度を表す実用理論式を誘導し、それに基づく計算法をBESTに組み込んだ。ダブルスキン内空気温度の上下分布と各階室内へのその影響も推定可能となった(図-1, 2, 3)。この熱性能式はエアフローウィンドウ(AFW)にも適用できる。すべて屋外排気する方式のほか、AFWの排気の一部を空調機に戻す場合の計算も可能となった。

2.5 自然換気の計算機能

中性帯位置を仮定するなどの簡易化を導入し、簡単な入力でも自然換気の計算をできるようにした。ハイブリッド空調を含む種々の自然換気許可条件を設定できることが特徴で、自然換気法の検討に有用である(図-4)。

2.6 その他の便利な計算機能

これまで述べたことのほかに、便利な計算機能がいろいろある。BESTは、通常の非定常計算と日周期定常計算の両方の計算機能を持つので、多種の気象データを利用できる。海外用としてEPW標準年、WEADAC設計用、月代表日データを使用できる。無論、隣接ゾーンの相互影響

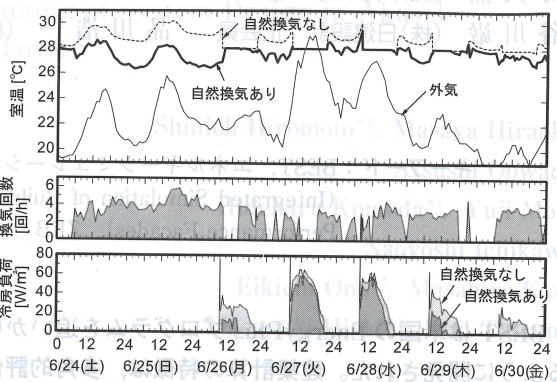


図-4 自然換気併用ハイブリッド空調の効果(東京標準年気象)

を考慮できる。温熱環境指標としてPMV、作用温度の計算機能、最大熱負荷検索機能、省エネルギー技術の詳しい解析のために利用できるダブルスキン、自然換気の状態値集計・出力機能も有している。

2.7 豊富な窓・壁データベース

豊富な種類の窓・壁データベースを開発した。一般窓用として約4200種のガラス・ブラインドの組合せの熱・光性能データを持ち、ダブルスキン・AFW用には約1700種のデータを持っている。これらは精算により求めたもので、値を公開していて、改正省エネルギー基準に準拠した算定・判断の方法にも利用されている。壁に関しては、本学会HASPEE、便覧のデータ、欧州規格のEN12524-2000など、国内外の熱物性値を収集し、四つのライブラリからなるデータベースとしてまとめた。

2.8 建築計算の検証

BEST建築計算は、国際的なエネルギーシミュレーションツールのテスト手法であるBESTESTによる検証を行い、妥当性を確認している。さらに、各種実測値との照合、国内の他ツールとの結果比較、多様な建築側要因に関する感度解析を幅広く行い、妥当性、有用性を確認するとともに、その結果を公表してきた。

3. システム計算の概要

3.1 モジュール構造のシステム計算

TRNSYSなど、先行する海外のシミュレーションツールと同じく、各機器のモデルを統一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。これにより、多様なシステム構成への対応、プログラムの拡張性・保守性の向上を実現した。

BEST専門版には、空調、衛生、電気に加えて多様な機器などがモジュールとして用意されている(表-1)。モジュールとその接続を基礎とするプログラム群の中でも、多様・多数の機器モジュールを網羅的に整備している点が

表-1 主要モジュール一覧表

分類	項目	主要モジュール
共通	制御	二方弁, 三方弁, PID, バルブ2位置制御, ポンプ台数制御, 発停制御, 中央監視(発停)
	媒体・空気・水	外界気象条件(外気, 雨水, 日射, 風) 固定条件(水, 空気などの固定温度・流量) 境界条件(外部ファイルからの読み込み)
	建物接続	ゾーン(システム接続用)
空調・換気	熱源機器	ターボ冷凍機, 空冷ヒートポンプチャラー, 水熱源ヒートポンプチャラー, 吸収式冷凍機, 冷温水発生機, 吸収ヒートポンプ, ボイラ,
	搬送機器	ファン, ポンプ, 電動機
	熱交換器など	冷却塔, 加熱塔, 熱交換器(水-水, 水-プライン), アースチューブ
	空調機	ファン, OA チャンパ, 全熱交換器, 加湿器, 冷温水コイル, FCU, VAV ユニット
	ダクト配管	ヘッダ, 分岐・集合, 流量拡大・流量縮小
	制御	熱源(台数)制御, 空調機制御, 換気装置制御, 外気冷房制御, VAV ファン制御
	デシカント	デシカント空調機, 除湿ロータ, ロータユニット
	蓄熱	水蓄熱槽, 氷蓄熱槽, 蓄熱制御
	分散型空調	マルチ型室内機・室外機, ウォールスルー, GHP, 水熱源 EHP, 氷蓄熱 EHP 等
	受変電	受電遮断器, 変圧器, 配電盤, 蓄電池
電気	機器・盤	太陽電池, エレベータ, 動力盤, 分電盤
	その他	室照明, 照明点滅制御, 境界条件指定
衛生	負荷	給湯使用量, 衛生水温, 給湯・給水負荷
	槽	受水槽, 高置水槽, 貯湯槽
	ボイラー	HP 給湯機, 潜熱回収, 蒸気ボイラ
	ポンプ	給水ポンプユニット, 循環一次・二次ポンプ
	衛生器具	大便器, 小便器, 洗面器(個数などの指定)
	その他	太陽熱集熱器, 発停制御
コージェネレーション・ユーティリティ	機器など	ガスエンジン, 排熱投入型吸収冷温水機
	計算制御	計算開始・停止, 記録
	集計	エネルギー消費量集計(メータ)
	グラフ描画	トレンド, ヒストグラム, 散布図(空気・水・電力などの状態値や積算値)

BEST の大きな特徴となっている。

3.2 “テンプレート”による実用性の向上

BEST では機器の一つ一つをモジュールとして扱っているため拡張性は高いが, システム全体では膨大な量のモジュール数となる。ユーザーの入力の手間の軽減のためにモジュールをパッケージ化した“テンプレート”を種々用意し, テンプレート内部の個々のモジュールを意識せずにシステム全体を構築できるようにした。

“熱源テンプレート”(図-5)の場合, 熱源, 冷却塔などをパッケージ化したものをあたかも一つのモジュールとしてユーザーが扱えるようにしている。熱源テンプレートは熱源の種類に応じて多数用意されているが, テンプレートの外部の接続口(インターフェース)はいずれも同一であり,

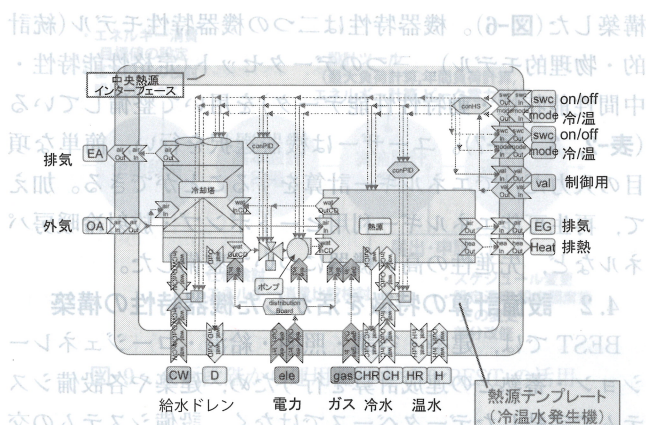


図-5 熱源テンプレートの例(冷温水発生機)

すでに接続済みのシステムにおいて他との接続を変えることなく他の熱源テンプレートに入替可能である。他に, 空調機テンプレート, ゾーンテンプレートなどがあり, 建物全体のエネルギーシミュレーションを実用的な手間の範囲内で計算可能である。

3.3 先端的省エネルギー手法の評価・検討のための利用

ZEB 化建築の計画・設計において, 消費エネルギー, 創エネルギーの見積もりは不可欠であるが, その要素技術は建築・設備・運用と多岐に渡る。前述のとおり, BEST では広範なモジュール群が用意されており, 建築側の計算機能と合わせて, 多様な省エネルギー手法の評価・検討が可能である。

また, 開発終了後もメンテナンス体制が維持されており, 従来のシミュレーションツールでは検討が困難な先端的省エネルギー手法に対応できるように, 継続的に追加モジュールの検討および実装を行っている。具体的には, ①換気回路網計算モジュール(熱計算との連成), ②アースチューブ, ③天井放射パネル, などについて対応を行っており, 今後も必要な省エネルギー対応モジュールを順次追加する予定である。

なお, モジュールは実態としては Java 言語におけるクラスであり, 計算エンジンや他のモジュールに関する知識がなくても新規のモジュールを開発者・ユーザーが組み込むことを可能としている。

4. 機器特性データベースの構築

4.1 汎用性・拡張性の高い機器特性の整備

シミュレーションツールの陳腐化の要因に, 新規開発機器に関する特性データの調査・更新が公開後に行われなくなってしまうというものがある。BEST では機器特性調査について, 各種工業会の協力による継続的な分科会体制を

構築した(図-6)。機器特性は二つの機器特性モデル(統計的・物理的モデル)、三つのデータセット(定格性能特性・中間性能特性・動特性性能データ)を用いて整備している(表-2, 3, 図-7)。ユーザーは機器選択を行い、簡単な項目の入力だけでエネルギー計算をすることができる。加えて、再生可能エネルギー利用ヒートポンプ・放射冷暖房パネルなど、先進性の高い機器について整備した。

4.2 設備計算の特徴を活かした機器特性の構築

BESTでは、建築・空調・照明・給湯・コージェネレーション・蓄熱との連成計算を行うため、建築や各設備システムで完結したデータベースではなく、設備システムの相互作用に影響する熱回収熱源や電熱同時供給などの電気や給排水設備にまたがる機器特性データベースの整備を行った。また、標準的な連成計算時間間隔5分に対応した低負荷域における動特性など、プログラムの特徴およびニーズに配慮した機器特性を検討した。つまり、設計ニーズとプログラムニーズに対応した汎用性・拡張性の高い機器特性データベースの整備を行っている。

5. 省エネルギー設計ツールとしての活用

5.1 ユーザーインターフェースの開発

BEST 1409 省エネツールは、設備設計者だけでなく、意匠設計者も省エネルギー設計に取り組める工夫がされている。グラフィカルな入力画面と建築の入力だけで外皮性能の計算ができ、明確な入出力フローにより設備設計者と連携した省エネルギー建築への取組みを支援するユーザーインターフェースとなっている(図-8)。建築入力では形状を再現した入力ができ、断熱、窓開口部の仕様、ひさし、非空調室との関連、室用途など設計で検討する内容に即した入力をビジュアル化することで、図面からの入力の間違

表-2 機器特性モデルの考え方

形式	特徴	適用する機器等
統計的なモデル	機器への入力と出力の関係を各々の実測や計算による数値を用い、これらの関係を多項式などで近似し、定式化するモデル。与えられた条件の組合せや範囲内の使用に限定される。	熱源機器、冷却塔、パッケージ空調機、ファン・ポンプ(定格性能)、電動機、インバータ
物理的なモデル	機器への入力と出力の関係を物理的な法則に従い、定式化するモデル。理論論が適用可能な範囲内で、さまざまな変数の入力条件に対応できる。	ファン・ポンプ(中間性能)、冷却塔、冷水・温水コイル、加湿器

表-3 機器特性データの分類

分類	特徴	適用する
定格性能特性データ	負荷率100%時やJIS条件下での特定条件下での機器性能を示すデータ。	メーカーカタログ、機器表に記載された機器仕様など
中間性能特性データ	定格時以外のさまざまな条件下での機器性能を示すデータ。	中間負荷や中間期での機器性能、過負荷時やレンジ外での機器性能を含む(機種ごとの代表値)
動特性性能データ	比較的短時間に限定された機器の特性を示したデータ。	大型冷凍機の起動時及び停止時の能力特性など(機種ごとの代表値)

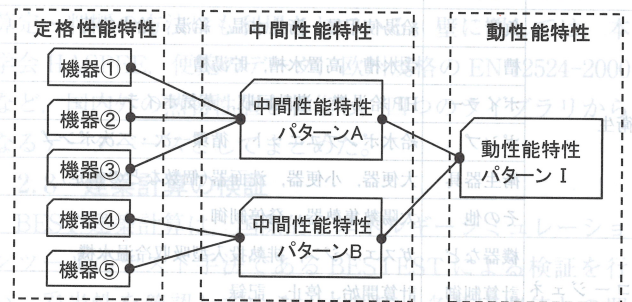


図-7 機器特性データの組合せのイメージ

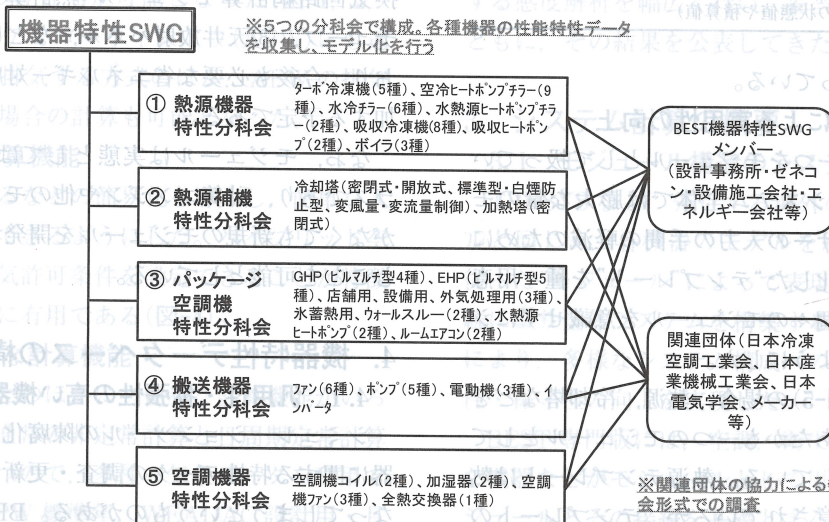


図-6 機器特性の整備状況と分科会体制

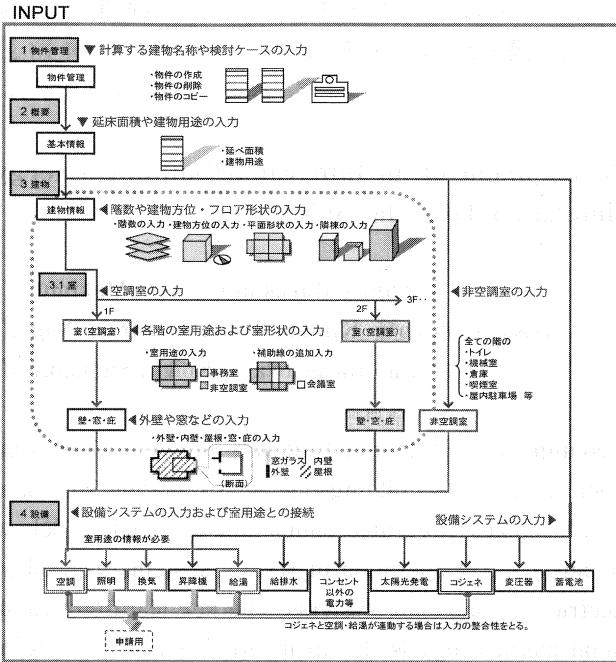


図-8 BEST 1409 省エネツールの入出力フロー

いを少なくし、時間を要しないことを意図し構築した。データベースからの窓仕様選択や壁構成による熱貫流率の自動計算などさまざまな工夫を行った。設備入力では多様かつ複雑な設備システムもアイコンなどで明示しわかりやすくし、どの室にどんな設備があるかなど、設備と建築の関連性をビジュアル化している。また、設計図書とのデータ互換性やスケジュール変更機能など柔軟性の高い機能を構築した。多数の省エネルギー制御にかかわる項目を選択でき、どんな建物にも応用可能で、さまざまな場面で活用できる設計ツールとして完成した。

5.2 多様な省エネルギー計算への応用

BEST 1409 省エネツールでは、単なる届出・申請ツールではなく、設計者が設計初期段階から、竣工後の建物運用実態に合わせた性能検証など、ライフサイクルツールとして応用できる仕組みを有している(図-9)。

BEST では建築と各設備の連成計算を行っている。つまり、BEST では照明設備を LED 化し昼光利用を行えば、

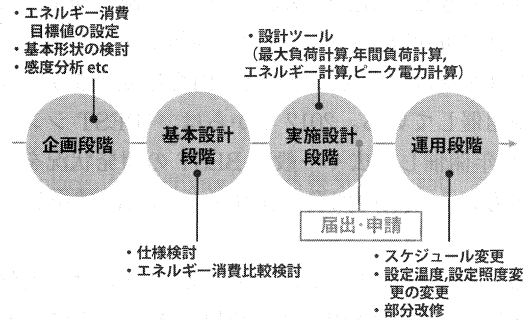
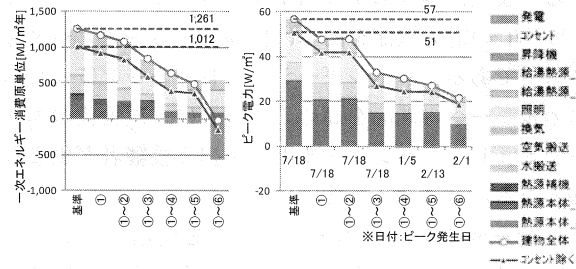


図-9 企画段階から運用段階までの BEST の活用



【試算条件】延床面積約 7 200 m² の庁舎。追加的な省エネの工夫として、①高性能外皮、①～②自然換気、①～③空調、①～④照明、換気、給湯、再生可能エネルギー、①～⑤効率的運用、①～⑥オフサイト発電。

図-10 ZEB 検討とピーク電力の発生日

その分内部発熱が減少し、空調負荷が低減された計算を行うといった交互作用を考慮した計算が実施である。

また、BEST は 5 分間隔の年間計算を行っているため、ピーク電力も算出される。ZEB を目指した検討を BEST により計算をしたものであり、エネルギー消費量と同時にピーク電力とその発生日を知ることができる。この結果によると、ZEB を推進するとピーク電力は夏期から冬期に変わるといった新しい知見が得られ、ZEB 化による系統電力への影響など、建物単体だけでなく街区や都市レベルでの応用事例である(図-10)。

省エネ法で決められている標準的スケジュールが室用途別にデフォルトとして入力されているが、竣工後には、実運用に合わせてスケジュールを変えることが可能である。熱源機器の部分負荷特性や内部発熱の実態など、BEMS データや実測データと計算値との照合を図り、省エネルギー設備を導入した建物が適切に運用されているかを確認するための、性能検証ツールとして活用できる。

6. 普及

BEST は 2005 年に開発計画が始まり、専門版初版がリリースされた 2008 年に、開発普及の核となる組織“BEST コンソーシアム”が設立された。省エネルギー基準対応ツール(省エネツールと略す)は、2012 年に試行版を、2013 年に正式初版をリリースした。その後、専門版、省エネツールともに、毎年機能拡充を図り、バージョンアッ

プを行ってきた。BESTの説明会は、計画当初より行って、専門版初版リリース後は、操作説明会、講習会として、プログラムの進展に合わせて内容を変えながら現在まで継続開催している。2012年からは、“BEST シンポジウム”を毎年開催し、広く一般にBESTの開発状況を発表するとともに、今後の開発に関する自由な討議を行っている。

2012年にアカデミックユーザー制度を設け、大学研究者・学生は、無償でBESTを利用できるようにするとともに、大学での授業利用も可能とし、そのサポートも行っている。また、種々のテキストを作成した。“TRYBEST”は、BESTの計算機能を簡単に体験できる例題データ付きテキストである。エネルギーシミュレーションに親しみ、省エネルギーへの関心を高めるとともに、次世代のエネルギーシミュレーションツール開発を担う後継者が生まれる契機となることに期待している。

ユーザーサポートにホームページを活用している。マニュアルは無論、講習会のビデオ・テキスト・例題データ公開、ユーザーからの問合せと回答の全文公開、学会発表論文と質疑応答の内容公開、その他の記事や技術資料、データベース内容の公開を行っている。ユーザーからの問合せに対しては、サポート委員会を中心に迅速に対応し、対応実績を公開するとともに、BESTの改良や新機能追加に反映される体制をつくり上げている。

おわりに

BESTは省エネ法告示に即した計算、ZEBの検討、ピーク電力消費の計算など、従来検討できなかった課題の計算を可能としており、世の中のエネルギー問題の解決の一助になりうるものと考えます。また、ユーザーサポートを重視した体制をとっており、中でも大学研究者・学生に対して無償での利用可能かつ講習会参加、さらには大学教育における補助も行っている。時間的余裕のない人やシミュレーション嫌いの人のために、TRYBESTという料理のレシピ本のような興味ある課題に対する入力出力のセットも無

償公開している。BESTシミュレーションは進化した計画原論的な機能があると考えます。

(2016/4/28 原稿受理)

Development of an Integrated Building Energy Simulation Tool, the BEST

Shuzo Murakami*1, Isao Makimura*2
Hisaya Ishino*3, Kimiko Kohri*4, Tatsuo Nagai*5
Iwao Hasegawa*6, Koichi Shinagawa*7

Synopsis BEST (i.e. Building Energy Simulation Tool) is a whole building energy simulation software. BEST enables integrated simulations of building behavior and control operation of HVAC systems as well as electric and plumbing systems. The key feature of simulation methodology is the ability to switch solution techniques as well as the ability to change simulation time step. BEST has two solution techniques, explicit and implicit techniques. BEST has also the capabilities to simulate advanced window systems, zone natural ventilation, daylighting and diverse HVAC systems including both decentralized and central systems. The initial version BEST 0803 was released in 2008, since then has been continuously updated.

(Received April 28, 2016)

- *1 Institute for Building Environment and Energy Conservation, Member
- *2 Naguwashi E & TP Laboratory, Member
- *3 Tokyo Metropolitan University, Member
- *4 Utsunomiya University, Member
- *5 Tokyo University of Science, Member
- *6 Nikken Sekkei Ltd, Member
- *7 Nihon Sekkei Inc., Member