

BESTEST の概要と実例 —BEST の検証— A Summary of the BESTEST and an Example by the Validation of the BEST

平林 啓介¹⁾, 村上 周三²⁾, 石野 久彌³⁾, 郡 公子⁴⁾
HIRABAYASHI Keisuke, MURAKAMI Shuzo, ISHINO Hisaya KOHRI Kimiko

- 1)新日本空調株式会社, 担当研究員, 修士 (工学)
Shin Nippon Air Technologies CO., LTD., Assistant Researcher, M.Eng.
- 2)建築研究所, 理事長, 博士 (工学)
Building Research Institute, Chief Executive, Dr. Eng.
- 3)首都大学東京大学院, 名誉教授, 博士 (工学)
Tokyo Metropolitan Univ., Emeritus Prof., Dr. Eng.
- 4)宇都宮大学, 准教授, 博士 (工学)
Utsunomiya Univ., Associate Prof., Dr. Eng.

As one of the global warming countermeasures, the energy-saving of buildings is very important. The use of the simulation tool is nominated for one of the energy-saving technique, but it is necessary to verify the accuracy of these calculations. Therefore the BESTEST was developed as quantitative method of evaluation and diagnosis of the building energy simulation tool by IEA. This report introduces a summary of the BESTEST and an example through the validation of the BEST. The BEST was released in March 2008, it is an integrated energy simulation tool for buildings and MEP systems. Through the validation by BESTEST, a calculation result of the BEST was able to confirm a thing without the problem.

BESTEST, BEST, シミュレーション, エネルギー, プログラムの検証 BESTEST, BEST, Simulation, Energy, Validation of Program

1. はじめに

京都議定書の約束期間が2008年より始まり、温暖化問題は、もはや避けては通れぬ状況である。我が国のCO2排出量を見てみると、民生部門の占める割合は3割程度であるものの、その排出量の推移は増加の一途を辿っている。このような状況の中で、建築物の省エネルギー対策の重要性は非常に大きく、各分野で様々な対策が進められている。建築設備の分野でも、各種の省エネルギーシステムが提案され、運用されているが、これらの効果を事前に検討するのに利用されるべきなのがシミュレーションツールである。国内ではHASPをはじめ、様々なシミュレーションツールが開発され、最近ではLCEMやBESTといったものが発表されており、今後、これらが省エネルギー設計に大いに活用されることが期待されている。

一方、パソコンの処理能力の向上や低価格化に伴い、国際的にも数多くのシミュレーションツールが開発されてきたが、国際エネルギー機関(IEA)の調査¹⁾によると、これらのツールで客観的な品質管理が行われているツールはほとんどないとのことであった。そこで、IEAでは建物エネルギーシミュレーションツールの評価と診断の定量的手法として、BESTEST²⁾(Building Energy Simulation TEST)の開発を行った。現在、世界で広く利用されているEnergyPlusも、このBESTESTによる検証³⁾を行って

おり、今後、国内のシミュレーションツールが国際的に認知されるためには、BESTESTによる検証が必要となるであろう。なお、このBESTESTについては、現在はANSI/ASHRAE Standard 140⁴⁾となっており、ASHRAEのホームページより購入することができる。

IEAでは、建物側の検証方法を示したBESTESTを開発した後、空調システムの検証方法を示したHVAC BESTESTの開発も行われたが、本報では、建物側の検証法であるBESTESTについて、その概要と入力条件や検証方法について紹介し、また、建物の総合的なエネルギーシミュレーションツールとして2008年3月に公開されたBESTの最新版での検証結果について報告を行う。

2. BESTEST の概要

様々なシミュレーションツールが開発されるのに伴い、その計算結果の精度に関する検証を行なう方法として、IEAではBESTESTによる検証方法を推奨している。これは、非常に簡単なモデルから、実際の複雑なモデルまで、複数の計算ケースについて計算を行い、欧米で最新のシミュレーションツールとして認知されている参照プログラム(表1を参照)での計算結果と比較することで、対象とするツールの診断を行う方法である。各計算ケースの結果に対する診断のためのフローが用意されており、結果に問題があった場合の原因の特定に非常に有効である。BESTESTの報告書では、この比較による検証方法

は、プログラム内に潜んでいる様々なバグ、不完全なアルゴリズム、入力ミスの発見に大いに役立ち、また、プログラムの検証に費やされる時間と労力を大幅に軽減させたとしている。

2.1 入力条件

表2に標準ケースであるCASE600の入力条件を示す。各テストケースの詳細については後述する。検証に使用する気象データは、アメリカのデンバーの気象データで、BESTESTではTMY形式のデータが一緒に提供されている。今回検証を行うBESTでは、TMY形式ではなくEPW形式でのデータが必要となるため、アメリカのエネルギー省のホームページよりEPWデータをダウンロードして使用したが、データの中身そのものは同じである。

あらゆるプログラムにおいて、BESTESTで提供されている全ての入力条件と全く同一の入力を行うことは不可能であり、これらについては、できるだけ近い入力、もしくはその入力項目を無視する形で検証を進めていくこととなる。BESTの検証に際しても、窓ガラスや壁体材料の仕様、窓ガラスの入射角特性、内外表面の総合熱伝達率などの入力項目で同様のことがいえたが、これら入力条件の違いによる、計算結果への影響については3.4で検証している。

2.2 テストケース

BESTESTで用意されているテストケースは全部で36ケースあり、これ以外に自然室温の4ケースが用意されている。この内、検証の必要条件となるケースは600番台と900番台の全14ケースであり、表3に各ケースの入力項目と診断項目を示す。なお、全14ケースとあるが、この内、地盤連成を解くケースであるCASE990については、ANSI/ASHRAE Standard 140では除外されており、

表1 参照プログラム一覧 (IEA BESTEST²⁾ Table2-1 より)

Computer Program	Autohring Organization	Example Results Produced by
BLAST-3.0 level 193 v.1 (BLAST-US/IT)	CERL ^{*1} , U.S.	NREL ^{*2} , U.S. Politecnico Torino, Italy
DOE-2.1D 14 (DOE2)	LANL/LBNL ^{*3} , U.S.	NREL, U.S.
ESP-RV8 (ESP-DMU)	Strathclyde University, U.K.	De Montfort University, U.K.
SERIRES/SUNCODE 5.7 (SRES/SUN)	NREL/Ecotope, U.S.	NREL, U.S.
SERIRES 1.2 (SRES-BRE)	NREL/BRE ^{*4} , U.S./U.K.	BRE, U.K.
S3PAS	University of Sevilla, Spain	University of Sevilla, Spain
TASE	Tampere University, Finland	Tampere University, Finland
TRNSYS 13.1 (TSYS-BEL/BRE)	University of Wisconsin, U.S.	BRE, U.K. Vrije Universiteit(VUB), Brussels, Belgium

*¹CERL : U.S. Army Construction Engineering Research Laboratories

*²NREL : National Renewable Energy Laboratory

*³LANL/LBNL : Los Alamos National Laboratory / Lawrence Berkeley National Laboratory

*⁴BRE : Building Research Establishment

表2 CASE600の入力条件

気象データ	EPWデータ (Denver)
建物情報	面積：6m×8m=48㎡、高さ：2.7m、窓面積：12㎡
ガラス種類	透明フロート二重 (ガラス厚：3mm、空気層：12mm)
壁体構造	屋根 Plasterboard 0.16W/mK, 10mm Fibreglas quilt 0.04W/mK, 112mm Roofdeck 0.14W/mK, 19mm
	床 Timber flooring 0.14W/mK, 25mm Insulation 0.04W/mK, 1003mm
	外壁 Plasterboard 0.16W/mK, 12mm Fibreglas quilt 0.04W/mK, 66mm Wood Siding 0.14W/mK, 9mm
侵入外気	0.41回/h
内部発熱	機器発熱：0.2kW 冷却方式：自然放熱
空調条件	暖房：室温<20℃、冷房：室温>27℃ 暖房容量：1000kW、冷房容量：1000kW (実際上∞) 外気導入なし
計算間隔	3600sec

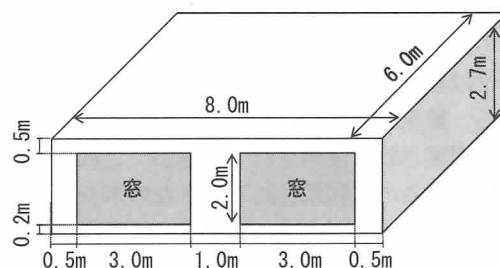


図1 標準建物アイソメ図 (CASE600)

表3 各ケースの入力項目と診断項目

CASE	熱容量	空調制御		換気	窓面積 [㎡]	方位	日除け	診断項目
		暖房	冷房					
600	小	20℃	27℃	—	12	S	—	熱容量が小さい建物の標準ケース
610		20℃	27℃	—	12	S	V:1m	南側水平ルーバーの影響の検証
620		20℃	27℃	—	6,6	E,W	—	東/西面の窓からの日射透過率の検証
630		20℃	27℃	—	6,6	E,W	VH:1m	東/西側水平垂直ルーバーの影響の検証
640		セットバック ^{※1}	—	—	12	S	—	セットバック制御の検証
650	off	27℃	○	12	S	—	外気導入の検証	
900	大	20℃	27℃	—	12	S	—	熱容量が大きい建物の標準ケース
910		20℃	27℃	—	12	S	V:1m	南側水平ルーバーの影響の検証
920		20℃	27℃	—	6,6	E,W	—	東/西面の窓からの日射透過率の検証
930		20℃	27℃	—	6,6	E,W	VH:1m	東/西側水平垂直ルーバーの影響の検証
940		セットバック ^{※1}	—	—	12	S	—	セットバック制御の検証
950	off	27℃	○	12	S	—	外気導入の検証	
960	小 大	20℃ off	27℃ off	— —	0 12	— S	— —	ゾーン間の熱移動の検証

※1 23:00~7:00は10℃以下で暖房、7:00~23:00は20℃以下で暖房、冷房は常に27℃以上

表4 比較可能な出力項目

- ・年間積算負荷
- ・各ケース間での差 (例：610と600の積算負荷の差)
- ・ピーク負荷とその発生日時
- ・最大室温とその発生日時
- ・最小室温とその発生日時
- ・年間平均室温
- ・各面での年間の全日射量
- ・窓の年間の透過日射量
- ・代表日の室温の時刻変動
- ・代表日の負荷の時刻変動
- ・代表日の全日射量の時刻変動

本報でもこのケースを除外した全 13 ケースについて報告する。CASE990 は地中温度を 10℃一定としている他のケースに比べて複雑なモデルであるため、参照プログラム間でも計算結果にばらつきがあったため除外されたと考えられる。

標準のテストケースとなる CASE600 の建物アイソメ図を図 1 に示す。非常に単純な直方体で構成された南窓面を有するケースとなっており、この標準ケースをもとに、外部日除けや換気の有無、窓方位や空調制御の違いなど条件を変えた検証を行っていく。また、600 番台は建物の熱容量が小さいケース、900 番台は熱容量が大きいケースとなっており、それ以外の条件は同じである。CASE960 は他のケースと違い、サンルームとバックゾーンの二つのゾーンからなる建物となっており、ゾーン間の熱移動の検証を行うケースとなっている。

前述のテストケース以外に、さらに入力条件を単純化した 22 ケースが用意されているが、これらは前述のテストケースで異常な計算結果となった場合の原因解明用に用意されているケースである。なお、全ケースの計算結果について、BESTEST では妥当とする明確な範囲を定めておらず、計算結果の妥当性については、表 4 に示した様々な出力項目と診断フローなどにより判断する必要がある。

3. BEST の検証

2008 年 3 月に BEST が公開されるにあたり、筆者らは BESTEST によるプログラムの検証を行ってきた。この検証により、入力ミスやプログラムのバグに起因する計算結果の異常を容易に発見することができ、入力データの修正と一部プログラムの改良を行うことで計算結果の妥当性を確認することができた⁷⁾。この BESTEST による検証は、プログラムの開発者側に非常に大きな安心感を与えると同時に、プログラムチェックに費やす労力と時間を削減することにも大きくつながった。エネルギーシミュレーションプログラムの開発者にとって、BESTEST による検証は大変有意義なものであるということが改めて確認できた。その後も細かなプログラムの改良を行ってきたが、本報では BEST の最新版

(Ver0.2.9c1) による検証結果について、出力項目ごとに説明していく。

3.1 方位別日射量による比較

方位別の全日射量の年間積算値による比較を図 2 に示す。与条件である水平面日射量に対して、鉛直面日射量は、直散分離法などの違いにより、各参照プログラム間で差が生じている。BEST の直散分離法は Perez モデルであり、現時点では天空日射は一樣として扱っている。参照プログラムと比較してみても、ほぼ平均的な年積算日射量が得られていることが確認できる。

快晴日と曇天日の南面と西面の全日射量の時刻変動を図 3 に示す。BEST では、西面において、直達日射の当たらない午前の日射量がやや大きく、午後やや小さいという特徴が現れた。参照プログラムでは、天空日射を一樣分布として扱うプログラムが多いが、今後 BEST では、天空日射の不均一性を考慮できる Perez の方法による斜面日射量計算に変更し、さらに比較を行う予定である。また、以前の結果⁷⁾では、BEST の時刻変動の結果がやや左側にずれていたが、これについてもプログラムの修正を行った。参照プログラムと BEST では、太陽位置を計算する際の時刻の取り方に違いがあり、参照プログラムでは正 30 分の太陽位置を使用しているのに対し、BEST では毎正時の値を使用していたことが原因であった。そこで BEST では、EPW データ使用時に限り、太陽位置計算を毎正時から正 30 分とするプログラム変更を行った結果、参照プログラム同様の時刻変動となった。

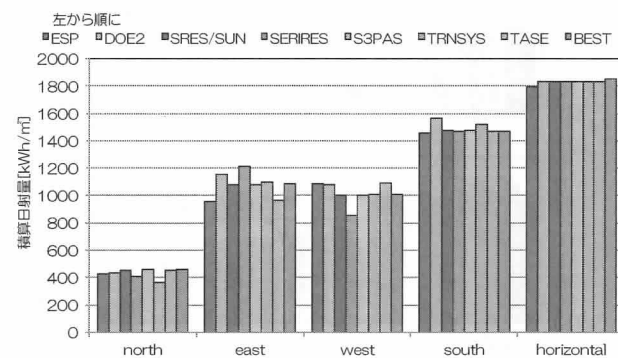


図 2 各面の年積算日射量の比較

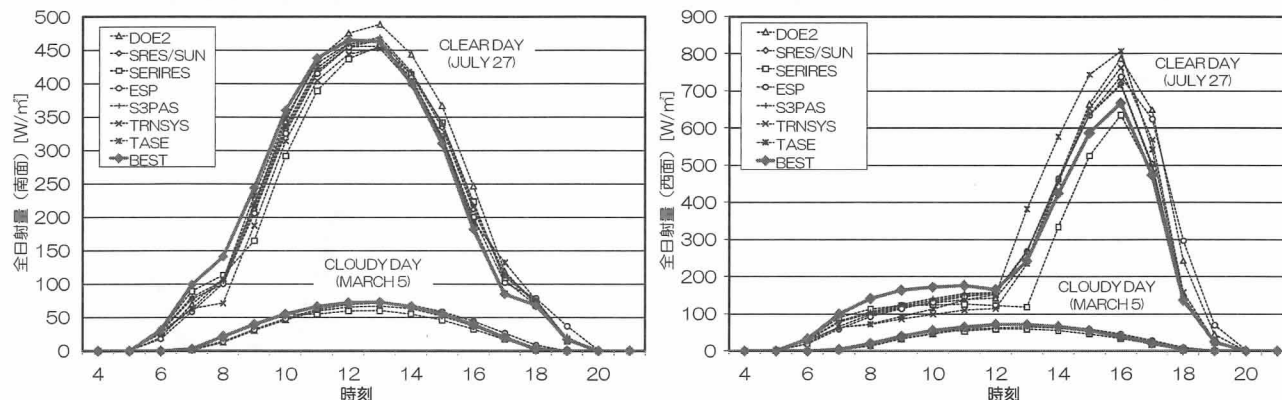


図 3 晴天日と曇天日の斜面日射量の時刻変動比較 (左: 南面、右: 西面)

3.2 室負荷による比較

13 ケースの年積算暖冷房負荷とピーク暖冷房負荷の計算結果の比較を図4に示す。BESTESTで提供されている8つの参照プログラムにEnergyPlusの結果も加えたグラフとなっている。計算結果を見ると、全てのケースにおいて、参照プログラムの計算結果の最大・最小範囲に入っており、BESTの計算結果の妥当性が確認できる。以前の結果⁷⁾⁸⁾では、暖房の設定温度を夜間10℃、昼間20℃としたセットバック制御のCASE640、940のピーク暖房負荷の結果がやや大きかったが、これについては、BESTのプログラム内で用意してある、熱容量を補正する係数の設定間違いによるものであった。家具を入力し

ない場合でも室空気以外の熱容量を考慮できるようにとプログラム内で用意していた係数が2となっていた(室空気の熱容量が倍ということ)ため、この値を1に戻したところ最大・最小範囲内におさまった。BESTESTでは、この年積算およびピークの暖冷房負荷による比較がベースとなるが、2.2でも述べたように、計算結果が妥当であるかを判断するための明確な範囲は示されていない。しかし、参照プログラムの最大・最小範囲から外れているような場合には、やはり、そのプログラムにどこか問題がないかを疑う必要はあるようだ。

次に冬期代表日である1月4日の室負荷の時刻変動を図5に示す。グラフ左側の熱容量の小さいCASE600では、昼間は日射の影響で室温が上昇するため、冷房負荷

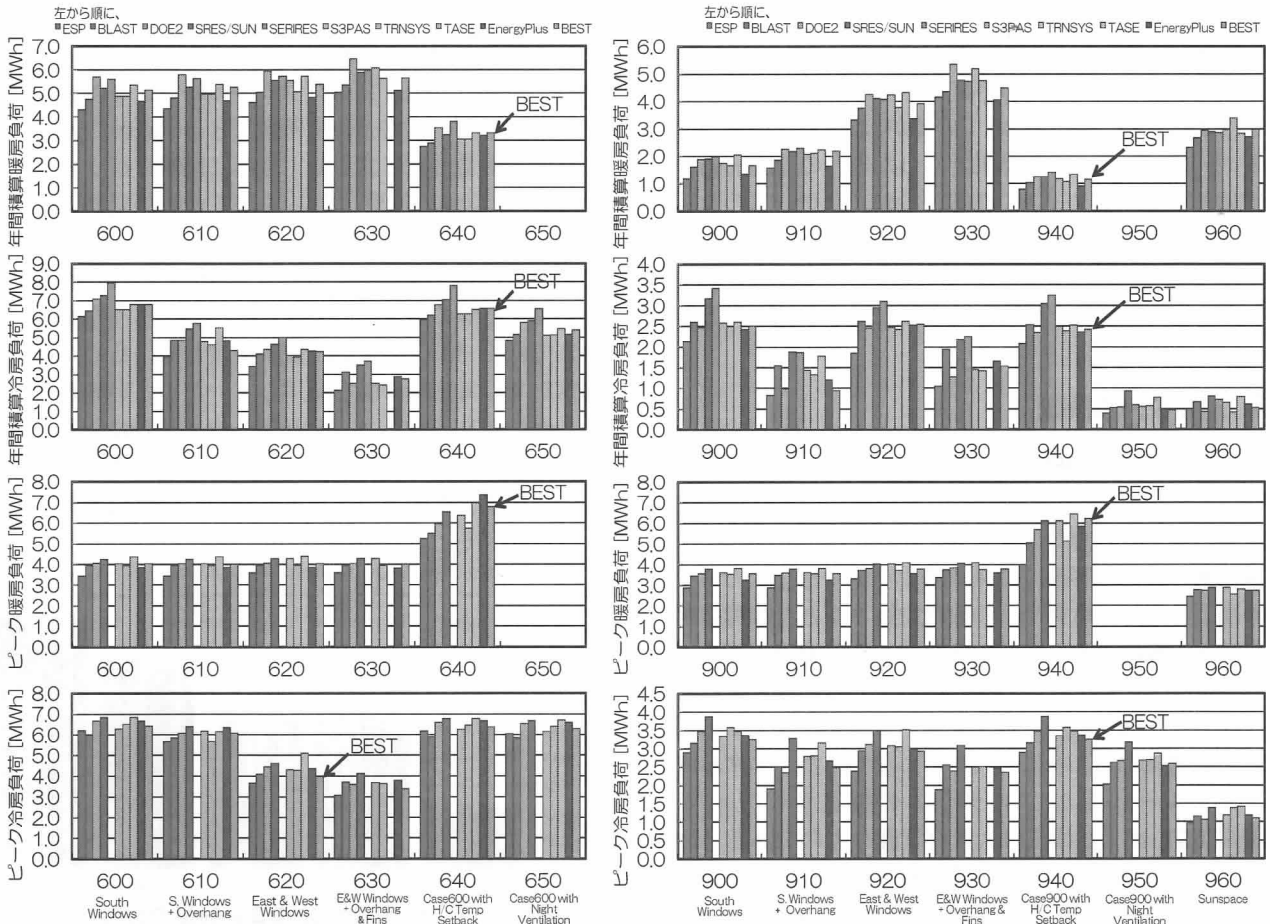


図4 年積算暖冷房負荷とピーク暖冷房負荷の比較 (左: 熱容量小のケース、右: 熱容量大のケース)

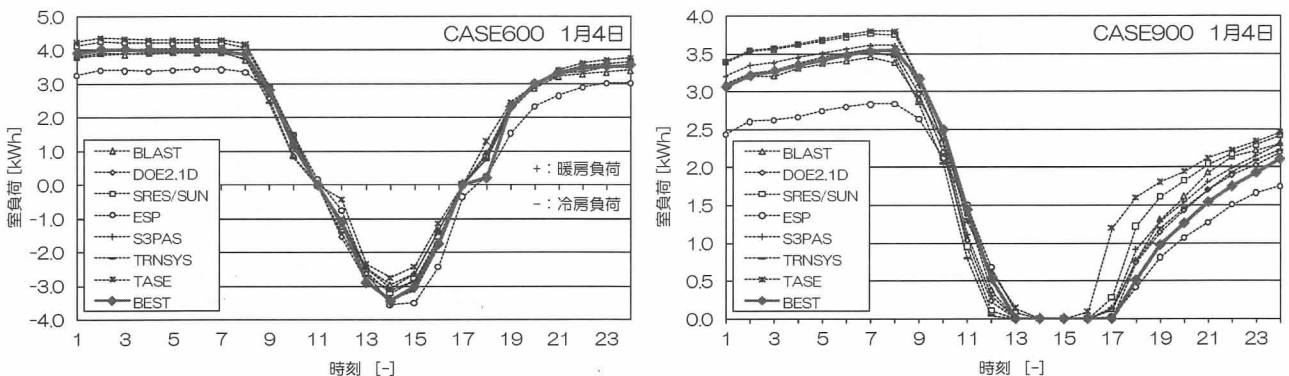


図5 1月4日の室負荷の時刻変動比較 (左: CASE600、右: CASE900)

が発生しており、それ以外の時間帯は暖房負荷となっている。右側の熱容量の大きい CASE900 では、冷房負荷は発生せず暖房負荷のみとなっている。日没後の暖房負荷の立ち上がり方を見ると、CASE600 が急激に立ちあがっているのに対し、CASE900 は緩やかに立ちあがっており、熱容量の違いによる影響がわかる。時刻変動についても、BEST と参照プログラムとではほぼ同じ変動であることが確認できる。

3.3 自然室温による比較

空調制御を行わない自然室温ケース (CASE600FF、900FF、650FF、950FF) と CASE960 のサンルーム側の最高温度、最低温度、年間平均温度による比較を図 6 に示す。デンバーの気候は、年間の最高気温 35°C、最低気温 -24.4°C と寒暖の差が激しいが、熱容量の小さい建物のケースでは、日射の影響もあり最高気温は 60°C を超えている。建物の熱容量の大小により年間の最高気温、最低気温には差がつくものの、年間平均温度ではほとんど差がつかないことがわかる。BEST の計算結果は、参照プログラムと比較してみても、平均的な温度となっていることが確認できる。

次に、冬期代表日である 1 月 4 日の CASE600FF と 900FF、同じく夏期代表日である 7 月 27 日の CASE650FF と 950FF の自然室温ケースの時刻変動を図 7 に示す。グラフ左側の 1 月 4 日の外気温は -25°C ~ -10°C の間で変動していたが、建物の熱容量の小さいケースでは、日射の影響を受ける昼間には 30°C 以上となっており、一日に変動する室内温度差は約 50°C と非常に大きい。熱容量の大きいケースでは、室内温度差も約 15°C と小さく、また、一日を通して熱容量の大きいケースと小さいケースとでは、室温の変動特性自体も大きく異なる。これに対して右側の 7 月 27 日のグラフは、18:00 ~ 7:00 の夜間のみ換気を行っているケースであるが、換気時間帯は熱容量の大きいケース、小さいケースとも同じような室温変動となっており、換気の無い時間帯の温度変動は異なることが確認できる。自然室温ケースの計算結果でも BEST と参照プログラムで同様の時刻変動となっている。

3.4 入力条件の違いによる検証

これまで BEST 最新版の検証結果を示してきたが、これらは、BESTEST で提示されている入力条件にできるだけ合わせた場合の計算結果である。実際に一般ユーザーが壁体材料や窓の入力を行う際は、現在の BEST では、用意されているデータベース (DB) から材料を選択することになっており、任意の材料を入力することはできない。また、内外表面の熱伝達率についてもプログラム内固定の値となっている。これらに対して、開発者側である筆者らは BESTEST と同様の入力 (開発側入力とする)

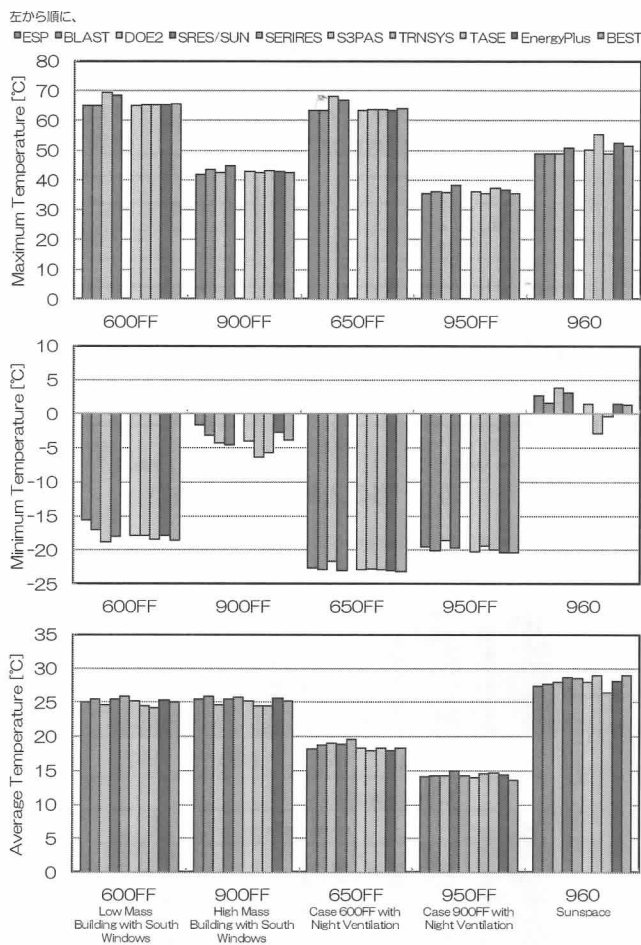


図 6 自然室温 (最高、最低、平均) による比較

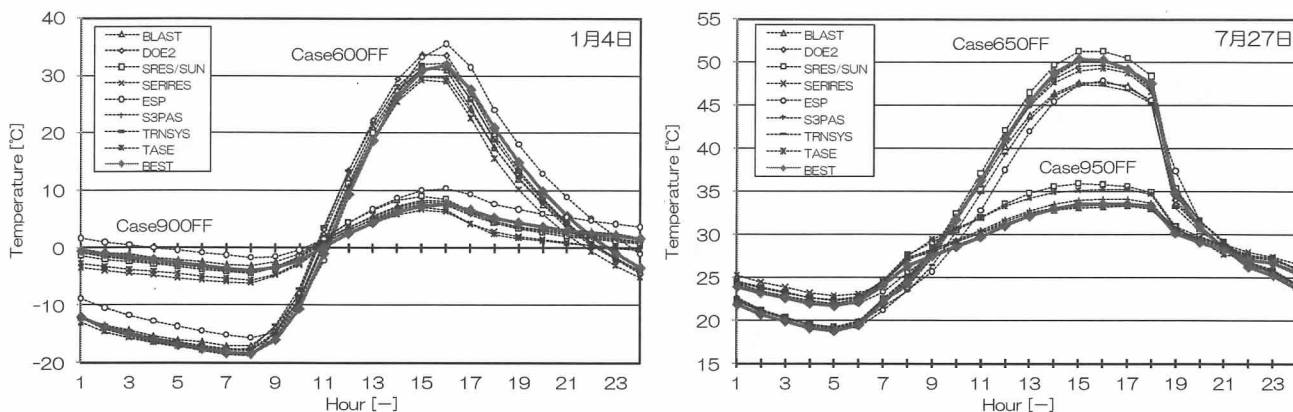


図 7 代表日の自然室温の時刻変動比較 (左: 1 月 4 日、右: 7 月 27 日)

が可能だが、一般ユーザーにはそれができない。そこで、一般ユーザーが入力可能とする条件（一般入力とする）での計算結果について比較を行った。開発側入力と一般入力の違いを表5、図8に示す。外表面総合熱伝達率はBESTESTの条件の方が大きく、内表面総合熱伝達率はBESTよりも小さく、放射・対流成分の割合も異なっている。窓の入射角特性については、BESTESTの入力条件に一番近い透明フロート二重（ID=325）との比較である。入射角特性を正確に解いたWindow4.0と比較すると、BESTESTではいずれも50°付近から大きくなっており、

表5 内外面の熱伝達率の違い

	BEST	BESTEST
外表面総合熱伝達率[W/m ² K]	23.0	29.3
内表面対流熱伝達率[W/m ² K]	4.50	3.16
内表面放射熱伝達率[W/m ² K]	4.50	5.13
内表面総合熱伝達率[W/m ² K]	9.00	8.29

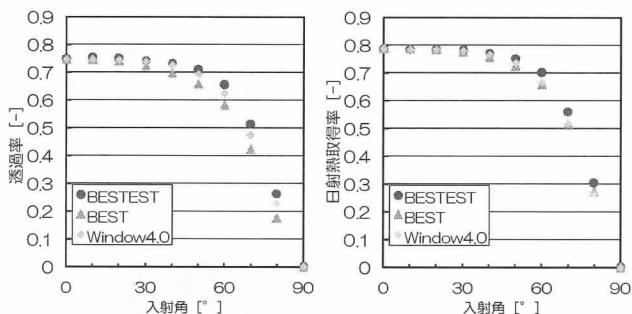


図8 窓の入射角特性の違い

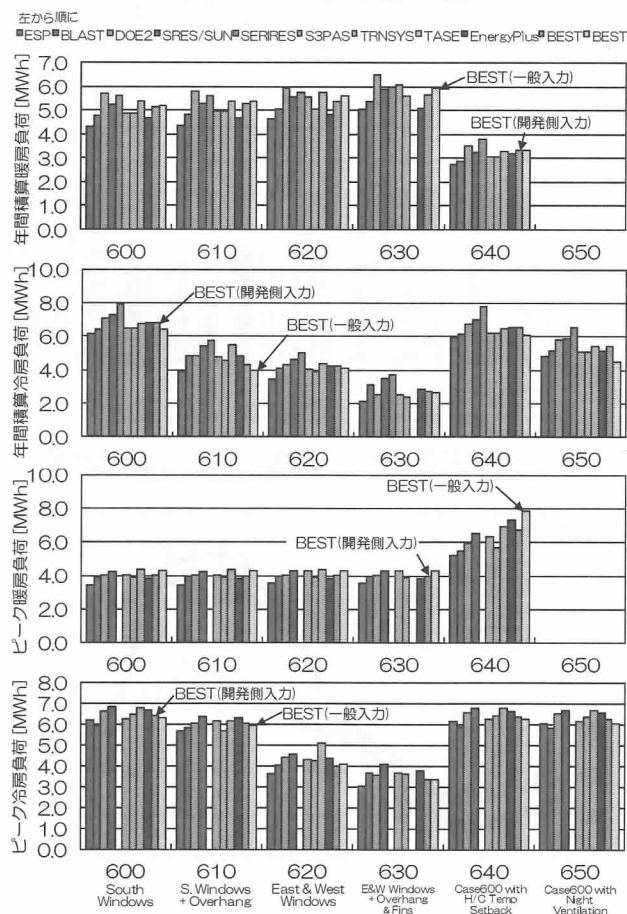


図9 年積算負荷とピーク負荷による比較

逆にBESTでは透過率は小さめであるものの日射熱取得率についてはWindow4.0の値とほぼ同じとなっている。

これら入力条件の違いによる600番台の年間積算暖冷房負荷とピーク暖冷房負荷の計算結果を図9に示す。棒グラフ右端の一般入力の方が、暖房負荷がやや大きめ、冷房負荷がやや小さめとなる傾向が見られる。積算冷房負荷のCASE650とピーク暖房負荷のCASE640で参照プログラムの範囲から外れてはいるものの、全体としてそれほど大きな違いは現れていない。これらはあくまでも入力値の違いによる結果であり、プログラム自体の精度については開発側入力で確認済みである。

4. おわりに

建物エネルギーシミュレーションツールの評価と診断の定量的手法としてIEAで開発されたBESTESTについて、その概要と入力条件や検証方法について紹介した。また、建物の総合的なエネルギーシミュレーションツールであるBESTの検証を通して、BESTESTの有効性を確認するとともに、この検証により、BESTの建物側プログラムの計算精度に問題のないことが確認された。今後は、システム側の検証方法として提供されているHVAC BESTESTでのBESTのシステム側の検証を行っていく予定である。

【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)、建築SWG(郡公子主査)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。建築SWG名簿(順不同) 主査: 郡公子(宇都宮大学)、委員: 石野久彌(首都大学東京名誉教授)、一ノ瀬雅之(東京理科大学)、上田博嗣、角谷亜璃砂(以上、大林組)、木下泰斗(日本板硝子)、久保木真俊、田端康宏(以上、日建設計)、芝原崇慶(竹中工務店)、平林啓介(新日本空調)、事務局: 生稲清久(建築環境・省エネルギー機構)。また、資料提供下さった宮城工専の内海康雄教授にも合わせて謝意を表します。

【参考文献】

- 1) Rittelmann, P.R. and S.F. Ahmed, Burt Hill Kosar Rittelmann Assoc., : Design Tool Survey : May 1985
- 2) R.Judkoff, J.Neymark : International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method : February 1995
- 3) Rovert H. Henninger, Michael J. Witte : EnergyPlus Testing with ANSI/ASHRAE Standard 140-2001 (BESTEST) : June 2004
- 4) ANSI/ASHRAE Standard 140-2007 : Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs
- 5) J.Neymark, R.Judkoff : IEA Building Energy Simulation Test and Diagnostic Method for Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Equipment Models (HVAC BESTEST) Volume1 : January 2002
- 6) 平林・村上・石野・郡・内海 : 建築エネルギー・環境シミュレーションツールBESTの開発 第6報BESTESTによる検証とケーススタディ, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1037-1038, 2008.9
- 7) 平林・村上・石野・郡・内海・二宮 : 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26) BESTESTによる検証とケーススタディ, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.1105-1108, 2008.8
- 8) 平林・村上・石野・郡・内海 : 建築エネルギー・環境シミュレーションツールBESTの開発 第15報BESTESTによる建物側とシステム側の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.987-988, 2009.8
- 9) 平林・村上・石野・郡・菅長・柳井 : 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61) 建築・個別式空調計算のBESTESTによる検証, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.727-730, 2009.9
- 10) 郡・平林 : 特集 The BEST Programの概要と今後の展望 5.建築の熱シミュレーション法とBESTEST, IBEC No.170, pp.24-35, 2009.1