

## 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94）

## BESTの現状とその特徴

## Development of an Integrated Energy Simulation Tool for Buildings and MEP Systems, the BEST (Part 94)

## The Current Stage of the BEST and a Topic of the Expected Features

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（建築環境・省エネルギー機構）
技術フェロー	坂本 雄三（建築研究所）	技術フェロー	二宮 秀典（鹿児島大学）
技術フェロー	大塚 雅之（関東学院大学）	技術フェロー	郡 公子（宇都宮大学）
技術フェロー	長井 達夫（東京理科大学）	技術フェロー	秋元 孝之（芝浦工業大学）
技術フェロー	柳原 隆司（東京大学）	正会員	牧村 功（日建設計）
技術フェロー	野原 文男（日建設計）	技術フェロー	柳井 崇（日本設計）

Hisaya ISHINO\*<sup>1</sup> Shuzo MURAKAMI\*<sup>2</sup> Yuzo SAKAMOTO \*<sup>3</sup> Hideyo NIMIYA\*<sup>4</sup>

Masayuki OTSUKA\*<sup>5</sup> Kimiko KOHRI\*<sup>6</sup> Tatsuo NAGAI\*<sup>7</sup> Takashi AKIMOTO\*<sup>8</sup>

Takashi YANAGIHARA\*<sup>9</sup> Isao MAKIMURA\*<sup>10</sup> Fumio NOHARA\*<sup>10</sup> Takashi YANAI\*<sup>11</sup>

\*<sup>1</sup> Tokyo Metropolitan Univ. \*<sup>2</sup> IBEC \*<sup>3</sup> Building Research Institute \*<sup>4</sup> Kagoshima Univ.

\*<sup>5</sup> Kanto-Gakuin Univ. \*<sup>6</sup> Utsunomiya Univ. \*<sup>7</sup> Tokyo Univ. of Science \*<sup>8</sup> The Univ. of Tokyo

\*<sup>8</sup> Shibaura Institute of Technology \*<sup>10</sup> Nikken Sekkei Ltd \*<sup>11</sup> Nihon Sekkei Inc.

The BEST program has been developed since 2005. This paper describes the current stage of the development and the features added last year. A topic of a new research on the estimation techniques of the thermal performance of window systems was also presented. Its results are ready to be incorporated in the BEST.

## はじめに

BESTプログラムは2005年に開発をスタートし、2008年にBEST0803として最初のバージョンを発表した。その後、幾度もバージョンアップを繰り返し現在は今年のバージョンBEST1204に至っている。本報はこの一年間の全体の進展概要と最新機能のダブルスキン開発について現況を述べる。

## 1. BESTの現状と特徴

BESTには入力容易な「簡易版」、省エネ法の告示改正を視野に入れた「新省エネ対応版」、当初から開発しているオリジナル計算法の「専門版」がある。専門版の開発状況・ユーザ支援状況を表1に示す。表1には全般、気象、建築、空調、衛生、機器、コジェネ、蓄熱に分類して内容をまとめている。特徴的なことは、普及促進のために今年度よりアカデミック版の無償公開を行っていること、ユーザからの問い合わせと回答をインターネット上にキーワード検索機能付きの全文公開を行っていること、ユーザ講習会を定期的に行っていること、簡易版の建築入力データの専門版へのインポート機能を設けたこと、昨今話題のピーク電力需要の計算を可能としたこと、など年々ユーザ目線に沿ったプログラムへと移行している。

## 2. 最新機能のダブルスキン開発についての現況

環境建築実現のための高性能窓システムとして、AFWと並びダブルスキンがある。ダブルスキンの採用事例が

増えているにもかかわらず、その熱性能、特に自然換気時の性能を簡単に推定する方法がなく省エネ効果の把握も困難であった。今回、非換気時の熱貫流率や日射熱取得率に対して自然換気効果を簡単に修正する熱計算法を開発した。この方法は、①AFWにも応用でき、外気・室空気の導入切換えを行う多機能窓の計算も容易となる、②換気計算に必要なキャピティ空気温度を計算できる、③多層吹抜けタイプの自然換気時の上下温度分布の影響も考慮できるという特徴をもつ。本計算法をダブルスキン、AFWに利用するために必要となる特性値を整理し、データベースのサンプルを試作した。本報では、そのサンプル値と計算例を紹介する。ダブルスキンの場合は自然換気計算との組合せが必要であり、プログラムによる計算が基本となる。また、時々刻々の計算を行うためには日射入射角変化の影響を考慮する必要があり、ブラインド内蔵窓の特性をもとに推定するが、その具体的方法は別途提案する。今後、データベース構築とBESTプログラムへの計算法組込みを進める予定である。

## おわりに

BESTのユーザには、シミュレーションの初心者から熟練者まで多種多様であり、建物全体のエネルギー計算を行う人からあるパーツのみの計算を行う人まで、と広範である。「簡易版」「新省エネ対応版」「専門版」それぞれの特徴を更に更新していく必要がある。

表1 BEST 専門版の開発・ユーザ支援状況 (過去1年間)

項目	開発・ユーザ支援内容
全般	①普及促進：アカデミック版の無償公開を実現した。②ユーザ支援：ユーザからの問合せと回答をインターネット上に全文公開し、キーワード検索機能を付けることにより活用可能とした。また、初級、中級、上級講習会を開催した。③他の版との互換性向上：簡易版の建築エンジン入力データを専門版にインポートする機能を開発した。現在放射冷暖房計算に着手している。
気象	①2001～2007の拡張アメダス気象データ：順次公開することを目標に開発中である。②国内55地点の1分値10年気象データ：データ整理を行った。今後欠測補充を行い、順次公開する予定である。現在自作の気象データ利用に着手している。
建築	①プログラム機能拡充：最大熱負荷計算結果を装置容量へ自動反映、最大・年間熱負荷計算データの入力共有化が可能となり、最大、年間の計算切換えが容易となった。そのほか、WEADAC気象データ利用、EA実在気象の複数年連続計算、特別休日の期間指定、休み明けモード指定、設定室温のスケジュール設定が可能となった。②新しい計算法の開発：ダブルスキン熱計算法、非空調空間の壁体置換法、在室特性を考慮する照明点灯制御の計算法を検討し提案した。③建築モデリング法の検討：ゾーン相互影響を考慮するオフィスモデリング法とその有用性の確認を行った。BESTの特長を活かす設計事例のモデリング法を検討した。④プログラム検証：単純モデルを利用してNew-HASPとの比較検証を行った。④マニュアル・例題解説書の改訂：マニュアル、用語集、講習会テキストの改訂を行った。現在ダブルスキンのプログラム化に着手している。
空調	①プログラム拡充：2次ポンプテンプレート用に、配管系の圧力損失モデルを組み込んだポンプ台数制御モジュールを新規開発し、定流量、段数制御、吐出圧一定制御、末端差圧一定制御、予想末端差圧制御に対応させた。ファン（風量静圧モデル）の台数制御モジュールを新規開発した。仮設調整テンプレートと関連モジュールとして、ビル用マルチ室内機、EHP室外機用のものを開発し、VAVユニットに負荷に応じて最大風量を自動調整する機能を追加した。自作した設備モジュールをBEST本体に合成する手順を自動化したツールを開発した。②機器特性テスト環境の整備：機器単体の動作チェックの実行環境を構築し、その例題データを作成した。③マニュアル整備：テンプレート例題マニュアル、モジュール等作成マニュアル、設備（制御）モジュールマニュアルを整備し、講習会テキストを改訂した。現在テンプレートマニュアルの更新に力を注いでいる。
衛生	①プログラム開発：ハイブリッド給湯（ヒートポンプ給湯とボイラーの併用）システムのモジュール開発に着手。システム分類を行い、直列型と並列型の2種類について開発し、モジュール仕様を確認中である。②マニュアル作成：中央式給湯システムのマニュアル作成に着手した。③給湯負荷パターンのデータ収集：新しい省エネ法や一管式給湯を視野に入れた種々の用途の給湯負荷パターンのデータを収集。現在一管式給湯のプログラム化に着手している。
機器特性	①新規機器特性の調査：吸収ヒートポンプ等の機器特性の調査が完了した。ダブルバンドルターボを調査中。②プログラム化支援：機器特性の効率的な検証のためのテストツールを開発。テストモジュールによる機器特性のプログラムへの反映を確認中。機器特性マニュアルを整備。現在PACの高顕熱型、散水制御、デマンドカット制御の調査に着手している。
コージェネ・蓄熱	(コージェネ) ①プログラム開発：排熱投入型吸収冷温水機の機器特性の精緻化を行い、実在機テンプレートの整備を検討中である。②プログラム検証：コージェネレーションと太陽熱による複合システムを検証と最適な運転方法の検証を行った。排熱投入型吸収冷温水機の冷却水変流量制御の検証を行った。③モデル化：発電機排熱の蒸気取出しのモデル化を検討した。④マニュアル：マニュアルの整備を行った。現在蒸気排熱発電機のプログラム化に着手している。 (蓄熱) ①プログラム検証：現場築造型水蓄熱システムの検証、異容量連結完全混合槽型水蓄熱システムの検証を行った結果、計算精度に問題が無いことが確認された。②マニュアル・講習会テキストの改訂：講習会テキストを改訂した。水蓄熱式空調システムマニュアルの改訂、現場築造型水蓄熱式空調システム、氷蓄熱ユニット空調システムのマニュアル作成を行った。現在負荷予測などの標準コントローラー、台数制御などの具体的設計の対応を検証中である。

付録1 多層吹抜けダブルスキン、AFWの熱性能の求め方

表2の値を用いて熱性能値を求めるための式である。式の詳細に関しては(その96)参照。

(室内側が全面窓(全面壁)の場合の熱性能式)

外気や室空気の流入層からn番目の層の熱性能は次式で表される。

$$\text{熱貫流率 } U_n(V) = U + \Delta U \cdot r(V)^n \quad [\text{W/m}^2 \text{K}] \quad \dots(1)$$

$$\text{日射熱取得率 } \eta_n(V) = \eta + \Delta \eta \cdot r(V)^n \quad [-] \quad \dots(2)$$

$$\text{窓通気効果率 } r(V) = 1.2V / (K_C + 1.2V) \quad [-] \quad \dots(3)$$

$$\text{窓内空気温度 } t_n(V) = t_{IN} + \{T_{O_e} \cdot (t_{O_e} - t_{IN}) + T_R \cdot (t_{Re} - t_{IN}) + T_{SR} \cdot I\} (1 - r(V)^n) \quad [^\circ\text{C}] \quad \dots(4)$$

Vは単位窓面積当たり風量[lit/sec m<sup>2</sup>]であり、層単位の外ガラス面積基準である。窓全体の平均熱性能は層分割を1として求める。

(室内側に窓と壁があるダブルスキンの熱性能式)

室内側窓用の熱貫流率と日射熱取得率は、風量が等しい室内側全面窓の性能値を用いる。室内側壁に対しては、室内側全面壁の性能値をもとに以下の特性をもつ一般外壁に置換する。

$$\text{壁熱貫流率 } U_{w,n}(V) = 1 / (1/U_{DS0,n}(V) - 1.1 + 1/U_{iw}) \quad [\text{W/m}^2 \text{K}] \quad \dots(5)$$

$$\text{外表面換算日射吸収率 } a'_n(V) = 23\eta_{0,n}(V) / U_{DS0,n}(V) \quad [-] \quad \dots(6)$$

$$\text{外表面換算放射率 } \varepsilon'_n(V) = 0.84U_{AFW0,n}(V) / U_{DS0,n}(V) \quad [-] \quad \dots(7)$$

窓内空気温度は、室内側全面窓、全面壁の場合の窓内空気温度を室内側窓、壁面積率で重み平均して求める。

(ダブルスキン自然換気量の式の例)

換気の式は自由であるが、例として、上下換気口の有効開口面積を与える方法を示す。

$$\text{換気風量 } Q = 4A_{ei} \sqrt{h_{NPL}(\rho_o - \rho_i)} \times 10^3 \quad [\text{lit/sec} \cdot \text{m}] \quad \dots(8)$$

$$\text{空気密度 } \rho = 353.2 / (t + 273.2) \quad [\text{g/lit}] \quad \dots(9)$$

$$\text{中性帯高さ } h_{NPL} = \{A_{eo}^2 / (A_{ei}^2 + A_{eo}^2)\} H_V \quad [\text{m}] \quad \dots(10)$$

【記号】U、η：非通気時の熱貫流率[W/m<sup>2</sup> K]、日射熱取得率[-]、ΔU、Δη：窓熱貫流率、日射熱取得率の極限変化量、K<sub>C</sub>：非通気時の窓内対流熱取得係数[W/m<sup>2</sup> K]、t<sub>IN</sub>、t<sub>Oe</sub>、t<sub>Re</sub>：流入空気温度、室外側、室内側相当温度[°C]、I：窓面日射量[W/m<sup>2</sup>]、T<sub>O</sub>、T<sub>R</sub>、T<sub>SR</sub>：室外側相当温度、室内側相当温度、窓面日射量に対する非通気時の窓内空気温度の重み係数、U<sub>DS0,n</sub>(V)、U<sub>AFW0,n</sub>(V)、η<sub>0,n</sub>(V)：室内側全面壁のときのダブルスキン、AFWの熱貫流率[W/m<sup>2</sup> K]、日射熱取得率[-]、U<sub>iw</sub>：室内側壁の熱貫流率(室内から窓内空間まで)[W/m<sup>2</sup> K]、ε<sub>O</sub>：外ガラス外表面放射率[-]、A<sub>ei</sub>、A<sub>eo</sub>：流入側、流出側換気口有効開口面積[m<sup>2</sup>]、h<sub>NPL</sub>：中性帯と流入換気口間の距離[m]、ρ<sub>o</sub>、ρ<sub>i</sub>：外気、窓内空気密度[g/lit]、H<sub>V</sub>：換気口距離[m]

付録2 ダブルスキン、AFWの熱性能の計算例

【例1】AFWの熱貫流率と日射熱取得率

(条件)内外とも透明単板ガラス(中間色ブラインド)、

窓高さ3m、風量120CMH/m

(熱特性値表の値)

表2(a)より U=2.6、K<sub>C</sub>=9.9、ΔU=-2.4W/m<sup>2</sup>K

表2(b)より η=0.28、Δη=-0.19

(熱貫流率と日射熱取得率)

窓内層分割はしない(n=1)。付録1の式(1)~(3)より、

$$\text{単位窓面積当たり風量 } V = 120 / 3 / 3.6 = 11 \quad \text{lit/sec m}^2 \quad \dots(s1-1)$$

$$\text{通気効果率 } r(V) = 1.2 \times 11 / (9.9 + 1.2 \times 11) = 0.57 \quad \dots(s1-2)$$

$$\text{熱貫流率 } U(V) = 2.6 - 2.4 \times 0.57 = 1.2 \quad \text{W/m}^2 \text{K} \quad \dots(s1-3)$$

$$\text{日射熱取得率 } \eta(V) = 0.28 - 0.19 \times 0.57 = 0.17 \quad \dots(s1-4)$$

**【例2】 夏期の西面 AFW の排気温度**

(条件) 窓仕様は例1と同じ。外界気象は東京 Jc-t 基準冷房設計気象データ 16:00 とし、外気温  $t_o=32.5^{\circ}\text{C}$ 、西窓面日射量  $I=630\text{W}/\text{m}^2$ 、室温  $t_r=26^{\circ}\text{C}$ 、夜間放射量と内部放射量は無視

(熱性能値表の値)

表 2(a)より  $T_o=0.58$ 、 $T_r=0.42$ 、表 2(b)より  $T_{SR}=0.046$

(AFW 排気温度)

表 2(c)式(4)において  $t_{IN}=t_{Re}=26$ 、 $t_{oe}=32.5^{\circ}\text{C}$ 、 $r(V)=0.57$  (式(s1-2))

なので、

$$t(V) = 26 + \{0.58 \times (32.5 - 26) + 0.42 \times (26 - 26) + 0.046 \times 630\} \times (1 - 0.57) = 40^{\circ}\text{C} \quad \dots(s2-5)$$

**【例3】 自然換気を行うダブルスキンの熱性能**

(条件) 内外とも透明単板ガラス (中間色ブラインド)、内側全面窓で窓高さ (=階高) 4m、グレーチング無視、5 階吹抜け、ダブルスキン幅 1m あたり換気口有効面積は上部に 0.08、下部に 0.04  $\text{m}^2/\text{m}$ 、換気口間距離 20m、外界・室内条件は例2と同じ

(熱特性表の値)

表 2(a)より  $U=2.6$ 、 $K_C=9.9$ 、 $\Delta U=1.7\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 、 $T_o=0.58$ 、 $T_r=0.42$ 、

表 2(b)より  $\eta=0.28$ 、 $\Delta \eta=-0.19$ 、 $T_{SR}=0.046$

(自然換気量)

自然換気量計算では、ダブルスキン空気温度は均一と仮定してよい。従って層分割は 1 とし、単位窓面積当たり風量  $I$  [ $\text{lit}/\text{sec} \cdot \text{m}^2$ ] とダブルスキン幅 1m あたり風量  $Q$  [ $\text{lit}/\text{sec} \cdot \text{m}$ ] との関係は、 $Q = 20I$  となる。

**表 2 ダブルスキン、AFW の熱特性値**

(a) 貫流特性値

(非通気時)  $U$ : 熱貫流率 [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]、 $K_C$ : 窓内対流熱取得係数 [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]、 $T_o$ 、 $T_r$ : 室外側温度、室内側温度に対する窓内空気温度の重み係数 [-]

(通気時)  $\Delta U_{DS}$ 、 $\Delta U_{AFW}$ : ダブルスキン、AFW の通気による熱貫流率の極限変化量 [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]

長波放射成分係数  $k_{LR}$  [-]: 0.46

ケース No. (外側ガラス)+(内側ガラス)	ブラインドなし						ブラインドあり						室内側を壁に変更					
	非通気				通気		非通気				通気		非通気				通気	
	U	$K_C$	$T_o$	$T_r$	$\Delta U_{DS}$	$\Delta U_{AFW}$	U	$K_C$	$T_o$	$T_r$	$\Delta U_{DS}$	$\Delta U_{AFW}$	U	$K_C$	$T_o$	$T_r$	$\Delta U_{DS}$	$\Delta U_{AFW}$
1 (透明)+(透明)	3.1	7.4	0.60	0.40	1.2	-1.8	2.6	9.9	0.58	0.42	1.7	-2.4	0.83	5.8	0.89	0.11	0.07	-0.55
2 (高性能熱反ブルー系)+(透明)	3.0	7.4	0.60	0.40	1.2	-1.8	2.6	9.7	0.58	0.42	1.7	-2.4	0.82	5.7	0.89	0.11	0.07	-0.56
3 (高性能熱反シルバー系)+(透明)	2.8	7.4	0.59	0.41	1.3	-1.8	2.5	9.4	0.56	0.44	1.8	-2.3	0.80	5.6	0.88	0.12	0.08	-0.59
4 (透明)+(透明+透明)	2.2	6.7	0.71	0.29	0.5	-1.4	2.0	8.5	0.69	0.31	0.8	-1.8	0.83	5.8	0.89	0.11	0.07	-0.55
5 (透明)+(Low-Eクリア+透明)	1.9	6.5	0.76	0.24	0.4	-1.2	1.7	8.0	0.73	0.27	0.6	-1.6	0.83	5.8	0.89	0.11	0.07	-0.55
6 (透明)+(Low-Eグリーン+透明)	1.9	6.4	0.76	0.24	0.4	-1.2	1.7	8.0	0.74	0.26	0.6	-1.5	0.83	5.8	0.89	0.11	0.07	-0.55
7 (透明+透明)+(透明)	2.2	6.0	0.43	0.57	2.0	-1.5	2.0	7.5	0.44	0.56	2.4	-1.8	0.75	3.8	0.81	0.19	0.14	-0.59
8 (透明+Low-Eクリア)+(透明)	1.9	5.6	0.37	0.63	2.2	-1.3	1.7	6.8	0.38	0.62	2.6	-1.6	0.71	3.2	0.77	0.24	0.18	-0.58
9 (透明+Low-Eグリーン)+(透明)	1.9	5.5	0.35	0.65	2.3	-1.3	1.7	6.7	0.37	0.63	2.7	-1.6	0.70	3.1	0.75	0.25	0.19	-0.58

\* 熱吸、熱反、セラミックプリントガラスの貫流熱性能値は、透明ガラスの値を使用する。

(b) 日射特性値

(非通気時)  $\eta$ 、 $\eta_R$ 、 $\tau$ : 日射熱取得率とその放射成分、透過率 [-]、 $T_{SR}$ : 窓面日射量に対する窓内空気温度の重み係数 [ $\text{K}^2/\text{W}$ ]

(通気時)  $\Delta \eta$ : ダブルスキン、AFW の通気による日射熱取得率の極限変化量 [-]

ケース No. (外側ガラス)+(内側ガラス)	ブラインドなし						明色ブラインド						中間色ブラインド					
	非通気				通気		非通気				通気		非通気				通気	
	$\eta$	$\eta_R$	$\tau$	$T_{SR}$	$\Delta \eta$	$\eta$	$\eta_R$	$\tau$	$T_{SR}$	$\Delta \eta$	$\eta$	$\eta_R$	$\tau$	$T_{SR}$	$\Delta \eta$			
1 (透明)+(透明)	0.67	0.60	0.55	0.014	-0.04	0.26	0.16	0.08	0.035	-0.14	0.28	0.15	0.04	0.046	-0.19			
2 (熱吸ブロンズ濃色)+(透明)	0.43	0.36	0.30	0.020	-0.06	0.20	0.12	0.04	0.033	-0.14	0.21	0.11	0.02	0.039	-0.16			
3 (熱反ブロンズ濃色)+(透明)	0.37	0.30	0.24	0.021	-0.06	0.20	0.11	0.04	0.032	-0.13	0.20	0.10	0.02	0.036	-0.15			
4 (高性能熱反ブルー系)+(透明)	0.32	0.25	0.19	0.020	-0.06	0.17	0.10	0.03	0.029	-0.12	0.17	0.09	0.02	0.033	-0.13			
5 (高性能熱反シルバー系)+(透明)	0.21	0.16	0.11	0.020	-0.06	0.14	0.08	0.02	0.025	-0.10	0.14	0.07	0.01	0.027	-0.11			
6 (セラミックプリント(白50%)+(透明)	0.47	0.41	0.35	0.017	-0.05	0.22	0.13	0.06	0.032	-0.13	0.22	0.12	0.03	0.039	-0.16			
7 (透明)+(透明+透明)	0.58	0.49	0.42	0.022	-0.04	0.21	0.13	0.06	0.044	-0.12	0.22	0.12	0.03	0.056	-0.15			
8 (透明)+(セラブリ(白50%)+(透明)	0.48	0.37	0.27	0.032	-0.06	0.20	0.11	0.04	0.045	-0.12	0.21	0.11	0.02	0.057	-0.15			
9 (透明)+(Low-Eクリア+透明)	0.52	0.43	0.35	0.029	-0.05	0.18	0.11	0.05	0.047	-0.10	0.19	0.10	0.03	0.060	-0.13			
10 (透明)+(Low-Eグリーン+透明)	0.39	0.29	0.21	0.036	-0.06	0.17	0.09	0.03	0.050	-0.10	0.18	0.09	0.02	0.062	-0.13			
11 (透明+透明)+(透明)	0.58	0.49	0.42	0.024	-0.08	0.31	0.18	0.06	0.050	-0.21	0.33	0.17	0.04	0.061	-0.25			
12 (透明+セラブリ(白50%)+(透明)	0.44	0.35	0.27	0.029	-0.10	0.27	0.15	0.04	0.049	-0.20	0.28	0.14	0.02	0.054	-0.23			
13 (透明+Low-Eクリア)+(透明)	0.55	0.44	0.35	0.031	-0.11	0.33	0.18	0.06	0.058	-0.25	0.35	0.18	0.03	0.068	-0.28			
14 (透明+Low-Eグリーン)+(透明)	0.38	0.29	0.21	0.028	-0.10	0.26	0.14	0.04	0.048	-0.20	0.27	0.14	0.02	0.053	-0.22			

ケース No. (外側ガラス)+(内側ガラス)	暗色ブラインド						室内側を壁に変更					
	非通気				通気		非通気				通気	
	$\eta$	$\eta_R$	$\tau$	$T_{SR}$	$\Delta \eta$	$\eta$	$\eta_R$	$T_{SR}$	$\Delta \eta$			
1 (透明)+(透明)	0.30	0.15	0.02	0.056	-0.23	0.10	0.05	0.071	-0.04			
2 (熱吸ブロンズ濃色)+(透明)	0.22	0.11	0.01	0.043	-0.18	0.07	0.03	0.059	-0.04			
3 (熱反ブロンズ濃色)+(透明)	0.20	0.10	0.01	0.040	-0.16	0.07	0.03	0.055	-0.03			
4 (高性能熱反ブルー系)+(透明)	0.18	0.09	0.01	0.035	-0.15	0.06	0.03	0.050	-0.03			
5 (高性能熱反シルバー系)+(透明)	0.14	0.07	0.01	0.029	-0.12	0.05	0.02	0.042	-0.03			
6 (セラミックプリント(白50%)+(透明)	0.23	0.12	0.02	0.044	-0.18	0.08	0.04	0.059	-0.04			
7 (透明)+(透明+透明)	0.23	0.11	0.01	0.067	-0.18	0.10	0.05	0.071	-0.04			
8 (透明)+(セラブリ(白50%)+(透明)	0.22	0.11	0.01	0.068	-0.18	0.10	0.05	0.071	-0.04			
9 (透明)+(Low-Eクリア+透明)	0.20	0.10	0.01	0.072	-0.16	0.10	0.05	0.071	-0.04			
10 (透明)+(Low-Eグリーン+透明)	0.19	0.09	0.01	0.073	-0.15	0.10	0.05	0.071	-0.04			
11 (透明+透明)+(透明)	0.35	0.17	0.02	0.070	-0.29	0.14	0.06	0.117	-0.08			
12 (透明+セラブリ(白50%)+(透明)	0.29	0.14	0.01	0.059	-0.25	0.11	0.05	0.103	-0.07			
13 (透明+Low-Eクリア)+(透明)	0.37	0.18	0.01	0.075	-0.32	0.15	0.07	0.141	-0.11			
14 (透明+Low-Eグリーン)+(透明)	0.27	0.13	0.01	0.057	-0.24	0.12	0.05	0.111	-0.08			

\* 室内側全面壁のとき透過率  $\tau=0$  である。

**【注記】**

- 1) ガラス厚は 8mm。ペアガラスの中空層は 6mm。ガラス種類は外から順に示した。表の値は、室内側が全面窓あるいは全面壁の場合である。
- 2) 非通気時の全面窓の値は、ブラインド内蔵窓の値として利用できる。
- 3) ダブルスキンの屋外側総合熱伝達率は  $23\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 、放射率は 0.84、壁の熱コンダクタンス (室内から窓内空間側外表面まで) は  $1\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 、日射吸収率は 0.7 とした。
- 4) 日射入射角、プロファイル角は  $30^{\circ}$  とした。

る。ダブルスキン空気温度  $t(V)$  [°C] は、付録 1 式(4)において  $t_{in} = t_{oe} = 32.5^\circ\text{C}$ 、 $t_{re} = 26^\circ\text{C}$  なので、

$$t(V) = 32.5 + \{0.58 \times (32.5 - 32.5) + 0.42 \times (26 - 32.5) + 0.046 \times 630\} \times (1 - r(V)) = 58.8 - 26.3r(V) \quad \dots(s3-1)$$

$$\text{ただし、} r(V) = 1.2 \times V / (9.9 + 1.2V) \quad \dots(s3-2)$$

となる。換気計算は付録 1 式(8)~(10)を用いることにする。中性帯高さ  $h_{NPL}$  [m]、外気密度  $\rho_o$  [g/lit] は、

$$h_{NPL} = \{0.08^2 / (0.04^2 + 0.08^2)\} \times 20 = 16 \text{ m} \quad \dots(s3-3)$$

$$\rho_o = 353.2 / (32.5 + 273.2) = 1.155 \text{ g/lit} \quad \dots(s3-4)$$

となり、自然換気量  $Q$ 、 $V$  は

$$Q = 20V = 4 \times 0.04 \sqrt{16 \times (1.155 - \rho_i)} \times 10^3$$

$$\therefore V = 32 \sqrt{1.155 - \rho_i} \quad \dots(s3-5)$$

$$\text{ただし、} \rho_i = 353.2 / (t(V) + 273.2) \quad \dots(s3-6)$$

と表される。熱の式(S3-1、2)と換気の式(S3-5、6)をともに満たす  $V$  が求める換気量である。図 1 は、ダブルスキン空気温度と自然換気量の関係を熱、換気の式から求めたもので、2つの曲線の交点が熱・換気の平衡状態である。図より、自然換気量  $V = 7 \text{ lit/sec m}^2$  ( $Q = 7 \times 20 = 140 \text{ lit/sec} \cdot \text{m}$ )、そのときのダブルスキン空気温度は  $47^\circ\text{C}$  である。

(平均熱性能値)

$$\text{自然換気量 } V = 7 \text{ lit/sec m}^2 \text{ を用いて、}$$

$$\text{通気効果率 } r(V) = 1.2 \times 7 / (9.9 + 1.2 \times 7) = 0.46 \quad \dots(s3-7)$$

$$\text{熱貫流率 } U(V) = 2.6 + 1.7 \times 0.46 = 3.4 \text{ W/m}^2 \text{ K} \quad \dots(s3-8)$$

$$\text{日射熱取得率 } \eta(V) = 0.28 - 0.19 \times 0.46 = 0.19 \quad \dots(s3-9)$$

(各階の熱性能値)

各階の性能値を求めたい場合は次のようにする。単位窓面積当たり風量  $V$  [lit/sec · m<sup>2</sup>] は、1 階分の外ガラス面積基準の値を用いるので、 $V = 140 / 4 = 35 \text{ lit/sec m}^2$  である。 $n$  階目の熱性能値は、

$$\text{通気効果率 } r(V) = 1.2 \times 35 / (9.9 + 1.2 \times 35) = 0.81 \quad \dots(s3-10)$$

$$\text{熱貫流率 } U_n(V) = 2.6 + 1.7 \times 0.81^n \quad \dots(s3-11)$$

$$\text{日射熱取得率 } \eta_n(V) = 0.28 - 0.19 \times 0.81^n \quad \dots(s3-12)$$

$$\text{ダブルスキン空気温度 } t_n(V) = 59.4 - 26.3 \times 0.81^n \quad \dots(s3-13)$$

と表される。この結果を図 2 に示す。

#### 【例 4】室内側に窓と壁があるダブルスキンの熱性能

(条件) 室内側の窓高さ 2.7m、壁高さ 1.3m、壁熱貫流率  $U_w = 1.0 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ 、外表面放射率  $\epsilon_o = 0.84$ 、窓面夜間放射量  $R_o = 35 \text{ W/m}^2$ 、その他の条件は例 3 と同じ。外表面総合熱伝達率  $h_o = 23 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  である。

(熱特性表の値)

室内側全面窓の場合の値は例 3 と同じ。室内側全面壁の場合の値は、表 2(a) より  $U = 0.8$ 、 $K_C = 5.8$ 、 $\Delta U_{DS} = 0.1$ 、 $\Delta U_{AFW} = 0.6 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ 、 $T_o = 0.89$ 、 $T_R = 0.11$ 、表 2(b) より  $\eta = 0.10$ 、 $\Delta \eta = -0.04$ 、 $T_{SR} = 0.071$

(特性値の補正)

表 2 の室内側全面窓、全面壁の特性値を室内側の窓、壁面積率で加重平均し対象とするダブルスキンの特性値とする。室内側の窓面積率は  $2.7/4 = 0.68$  であるので、 $K_C = 0.68 \times 9.9 + 0.32 \times 5.8 = 8.6 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  同様に計算すると、 $T_o = 0.68$ 、 $T_R = 0.32$ 、 $T_{SR} = 0.054$

(自然換気量)

$$\text{室外側相当温度 } t_{oe} = 32.5 - 0.84 \times 35/23 = 31.2^\circ\text{C} \text{ であるので、}$$

$$t(V) = 32.5 + \{0.68 \times (31.2 - 32.5) + 0.32 \times (26 - 32.5) + 0.054 \times 630\} \times (1 - r(V)) = 63.6 - 31.1r(V) \quad \dots(s4-1)$$

$$\text{ただし、} r(V) = 1.2 \times V / (8.6 + 1.2V) \quad \dots(s4-2)$$

換気の式は式(S3-5、6)と同じである。例 3 と同様に自然換気量  $V$  を求めると、 $V = 8 \text{ lit/sec m}^2$  ( $Q = 160 \text{ lit/sec} \cdot \text{m}$ )、そのときのダブルスキン空気温度は  $48^\circ\text{C}$  で、例 3 の結果とそれほど差はない。

(室内側の窓と壁の平均熱性能値)

室内側窓、壁の熱性能を別々に求める。室内側窓の熱性能値は、例 3 の式(S3-7~9)に対して  $V = 8 \text{ lit/sec m}^2$  の値を求める。 $r(V) = 0.49$ 、 $U(V) = 3.4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ 、 $\eta(V) = 0.19$  である。室内側全面壁の熱性能値は、通気効果率  $r_w(V) = 1.2 \times 8 / (5.8 + 1.2 \times 8) = 0.62$

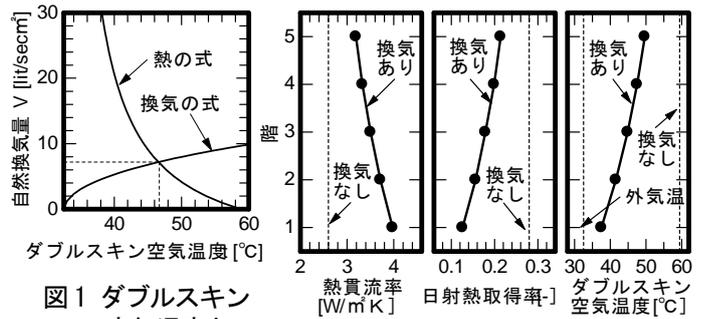


図 1 ダブルスキン空気温度と自然換気量

図 2 各階のダブルスキン熱性能値

$$\text{熱貫流率 } U_{DS0}(V) = 0.83 + 0.07 \times 0.62 = 0.87 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$U_{AF0}(V) = 0.83 - 0.55 \times 0.62 = 0.49$$

$$\text{日射熱取得率 } \eta_0(V) = 0.10 - 0.04 \times 0.62 = 0.075$$

であるので、一般外壁に置換した壁の熱性能は、次のようになる。

$$\text{壁熱貫流率 } U_w(V) = 1 / (1/0.87 - 1.1 + 1) = 0.95 \quad \dots(s4-6)$$

$$\text{換算日射吸収率 } a'(V) = 23 \times 0.075 / 0.87 = 2.0 \quad \dots(s4-7)$$

$$\text{換算放射率 } \epsilon'(V) = 0.84 \times 0.49 / 0.87 = 0.5 \quad \dots(s4-8)$$

既存の熱負荷計算ツールを利用する場合、平均的な風量を想定して上述の要領で求めた特性をもつ窓と外壁として入力すればよい。

(室内側窓、壁からの定常熱取得)

ここでは、室内側壁からの熱取得は、窓と同様に日射熱取得率を用いて求める。

$$\text{窓熱取得 } HG = U(V)(t_{oe} - t_{re}) + \eta(V) \cdot I$$

$$= 3.4 \times (31.2 - 26) + 0.19 \times 630 = 137 \text{ W/m}^2 \quad \dots(s4-9)$$

$$\text{壁熱取得 } HG_w = U_{DS0}(V)(\epsilon'(V) \cdot R_o / h_o - t_{re}) + \eta_0(V) \cdot I$$

$$= 0.87 \times (32.5 - 0.5 \times 35 / 23 - 26) + 0.075 \times 630 = 52 \text{ W/m}^2 \quad \dots(s4-10)$$

#### 【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ものである。統合化 WG 名簿(順不同) 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)、内海康雄(宮城工業高等専門学校)、大西晴史(関電工)、木下泰斗(日本板硝子)、木本慶介(大林組)、工月良太(東京ガス)、郡公子(宇都宮大学)、菰田英晴(鹿島建設)、佐藤誠(佐藤エネルギーリサーチ)、芝原崇慶(竹中工務店)、新武康(清水建設)、田中拓也(大成建設)、長井達夫(東京理科大学)、二宮秀與(鹿児島大学)、保木栄治(東京電力)、野原文男、二宮博史、丹羽勝巳、長谷川巖、久保木真俊、田端康宏(以上、日建設計)、柳井崇、品川浩一(以上、日本設計)、事務局: 生稲清久、石田真理(以上、建築環境・省エネルギー機構)

#### 【文献】

- 1) 石野・村上他: 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 1)~(その 93)、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.19669-2040、2007.9、pp.1077-1156、2008.8、pp.639-730、2009.9、pp.2527-2590、2010.9、pp.1675-1738、2011.9
- 2) 石野・村上他: 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 1 報~第 29 報、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1027-1042、2008.9、pp.976-1000、2009.9、pp.1293-1298、2010.9、pp.1147-1154、2011.9
- 3) 石野・村上他: 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 96)、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、2012.9