

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116）

BEST への高性能窓システム新計算法の導入

Development of an Integrated Energy Simulation Tool for Buildings and MEP Systems, the BEST (Part 116)

Application of a New Calculation Method for High-Performance Window Systems to the BEST

技術フェロー ○郡 公子（宇都宮大学） 技術フェロー 石野 久彌（首都大学東京名誉教授）
技術フェロー 長井 達夫（東京理科大学） 特別会員 村上 周三（建築環境・省エネルギー機構）

Kimiko KOHRI*¹ Hisaya ISHINO *² Tatsuo NAGAI*³ Shuzo MURAKAMI *⁴

*¹ Utsunomiya University *² Tokyo Metropolitan University *³ Tokyo University of Science
*⁴ Institute for Building Environment and Energy Conservation

A new thermal calculation method for high-performance window systems such as double-skin facades and airflow windows was applied to the BEST program. The assumptions and calculation procedures in simulation of heat gain through facades are described and the simulation results in cases of office spaces with double skin facades as well as airflow windows are also shown. The usefulness of the simulation tool is confirmed for evaluating the performance of window systems.

1. 序

これまでの研究で、ダブルスキン、AFW に共通して利用できる実用的な熱性能理論式を提案し、計算に必要な窓システムの特性値をデータベース化する考えを示した^{1, 2)}。この熱性能式は、非通気時の熱貫流率や日射熱取得率を補正して通気時の値を推定するもので、ダブルスキンや AFW の窓内空気上下温度分布の影響を考慮することもできる。この計算法を BEST に導入した。本報では、新計算法導入にあたり前提とした条件や簡易化した点、具体的な熱取得計算法を述べるとともに、試算を行い、ダブルスキンの自然換気効果、AFW の通気効果や窓排気回収の影響を確認した。

2. ダブルスキンの熱取得計算法

表 1 に、BEST におけるダブルスキン熱取得計算法をまとめた。ダブルスキン単独で自然換気を行うものを計算対象とし、多層吹抜けの場合は、内側スキンの仕様やブラインド類の使用法が階により変わらないものとする。計算に使用するダブルスキン熱特性データは、内側スキン全面が、ブラインド非使用窓、ブラインド使用窓、壁の 3 種について整備されている。そのため、内側スキンにブラインド非使用窓、使用窓、壁の部位が混在する場合は面積加重平均した値を全体特性として使用する。そのほか、グレーチングによる内側ガラスの影部分は暗色ブラインド使用窓に置き換えるなどの簡易化を行う。ダブルスキンの換気・熱計算では、外部風の影響は考慮せず、上下の換気口有効開口面積を与えて、煙突効果による自然換気のみを計算する。ダブルスキン空気温度は全層平均温度で代表させ均一と仮定する。自然換気量とダブルスキン平均空気温度が得られた後に、改めてダブルスキン各層の空気温度や熱性能を計算する。ただし、建物のエネルギー計算上、層による違いを考慮する必要のないケースも多いので、その場合は全層平均性能を用

いて熱取得計算することもできる。

各ゾーンの熱計算では、窓、壁部位別に熱取得を計算する。そのときの部位別熱性能は、内側全面窓、全面壁の性能値で代用する。窓からの熱取得は小さめ、壁からの熱取得は大きめに推定される傾向になるが、合計熱取得の誤差は小さいと見なす。外気を通すダブルスキンの貫流熱取得計算では、夜間放射量の影響を考慮した外側温度として、表 1 の式(1-17)から得られる修正相当温度を用いる。内側スキンの壁貫流熱取得については非定常計算する必要がある。そこで、内側基準壁の定常貫流熱取得からダブルスキン空間側の相当温度をもとめ、これを使用して計算対象とする内側壁の非定常熱取得計算を行う。

3. 窓排気の一部を空調機に回収する AFW の熱性能式

従来、AFW は、文献 3) の方法により熱計算されてきた。今回、ダブルスキンと共通の計算法ができたので、統一することにした。新計算法では、窓排気の一部を空調機に回収するケースも評価できる。表 2 に示すシステム熱貫流率、システム日射熱取得率、内表面修正放射率を、熱貫流率、日射熱取得率、内表面放射率として既存の汎用熱負荷計算ツールに入力すれば、一般窓と同様の扱いで、窓排気の一部を空調機に戻す AFW の熱負荷計算が可能である。BEST では、表 2 の計算法は採用せず、窓排気温度を求めて回収による対流熱取得計算を行い、窓内表面からの熱取得と別に扱うことにした。これにより、窓通気による室内放射環境の改善効果をより正確に評価できるようになる。

4. 高性能窓システムを採用するオフィスの冷房設計気象条件での熱負荷特性

新計算法を導入した BEST を利用して試算を行った。表 3 に基準計算条件を示す。設計用気象データは、方位に応じて厳しい気象タイプを選定した。計算対象

表1 BESTにおけるダブルスキンの熱取得計算法

●対象とするダブルスキン

- ①ブラインドは内側ガラスのダブルスキン側にある
- ②上下に換気口を有しダブルスキン単独の自然換気が可能

●計算上の仮定・扱い

- ①隣棟などの屋外日射遮蔽物はないとみなす。多層吹抜けタイプの場合、ブラインドなどの各階の状態は同じとする
- ②外部風の影響は無視する。
- ③ダブルスキン通気抵抗は、換気口においてのみ考慮する（有効開口面積を与える）。
- ④ダブルスキン空気温度の応答の遅れは無視する。
- ⑤内側スキンに窓と壁がある場合の部位別性能は、内側全面窓、全面壁の性能で代用する。
- ⑥グレーチングによる内側スキンの日影面の日射性能の扱い
ブラインド使用窓、壁：日照面の性能に等しいとする
ブラインド非使用窓：暗色ブラインド使用時の日照面性能に等しいとする
- ⑦全体性能の扱い
壁、ブラインド使用窓・非使用窓、日影面・日照面などの内側部位の状態別性能値を面積加重平均して求める。

●熱貫流率 U_V [W/m²K]、日射熱取得率 η_V [-]

N層吹抜けダブルスキンの空気流入層からN層目あるいは全層平均の性能値は、次式で表される。換気量 V [lit/sec・m²] は外ガラス1層分の単位面積あたりの値である。

$$U_V = U + \Delta U \cdot R \quad \dots(1-1) \quad \eta_V = \eta + \Delta \eta \cdot R \quad \dots(1-2)$$

$$\text{第 } n \text{ 層} : R = R_n = r^n \quad \dots(1-3)$$

$$\text{全層平均} : R = R_{ave} = r(1-r^N) / \{N(1-r)\} \quad \dots(1-4)$$

$$r = c_p \rho V / (K_C + c_p \rho V) \quad \dots(1-5)$$

●ダブルスキン空気温度 t_V [°C] と自然換気量 V [lit/sec・m²]

ダブルスキンの熱・換気平衡は、式(1-6)において、 $R=R_{ave}$ として、式(1-6)、(1-9)を連立させて解く。自然換気量が得られた後に、 $R=R_n$ として各層の熱性能を計算する。

$$t_V = t_{IN} + \{T^* o(t_{Oe} - t_{IN}) + (1 - T^* o)(t_{Re} - t_{IN}) + \sum_j T^*_{SR,j} I_j\} \times (1 - R) \quad \dots(1-6)$$

$$T^* o = \sum_k x_k T_{O,k} \quad \dots(1-7) \quad T^*_{SR,j} = \sum_k x_{k,j} T_{SR,k,j} \quad \dots(1-8)$$

$$V = (A_{ei} / h_{FL}) \sqrt{2g\Delta P_i / \rho_S} \times 10^3 \quad \dots(1-9)$$

$$\Delta P_i = h_{NPL} (\rho_o - \rho) \quad \dots(1-10)$$

$$h_{NPL} = \{A_{eo}^2 / (A_{ei}^2 + A_{eo}^2)\} h_V \quad \dots(1-11)$$

●日射入射角条件が異なる場合の補正

任意の日射入射角、プロファイル角での日射熱取得率の極限変化量 $\Delta \eta$ [-]、日射用温度重み係数 T_{SR} [K m²/W] は、基準入射条件の値 $\Delta \eta_{base}$ 、 $T_{SR,base}$ に角度補正係数 f [-] を乗じて求める¹⁾。

$$\Delta \eta = f \cdot \Delta \eta_{base} \quad \dots(1-12) \quad T_{SR} = f \cdot T_{SR,base} \quad \dots(1-13)$$

$$\text{内側全面窓} \quad f = (\eta - \tau) / (\eta_{base} - \tau_{base}) \quad \dots(1-14)$$

$$\text{内側全面壁} \quad f = \eta_{Gout} / \eta_{base,Gout} \quad \dots(1-15)$$

●内側窓からの熱取得

第n層の内側窓部位の熱取得 HG_n [W/m²] は、

$$HG_n = \sum_j \eta_{V,n,j} I_j + U_{V,n} (t'_{Oe} - t_{Re}) \quad \dots(1-16)$$

と表される。外側修正相当温度 t'_{Oe} [°C] は、次式から得られる。

$U^*_{DS,n}$ は外気を通した場合、 $U^*_{AFW,n}$ は同風量の室空気を通した場合の第n層の全部位平均熱貫流率 [W/m² K] である。

$$t'_{Oe} = t_o - \epsilon'_o R / h_o \quad \dots(1-17)$$

$$\epsilon'_o = \epsilon_o (U^*_{AFW,n} / U^*_{DS,n}) \quad \dots(1-18)$$

●内側壁からの熱取得

第n層の内側壁部位からの熱取得 HG_n [W/m²] は、基準壁材の場合の窓内相当温度 $t_{e,n}$ [°C] を利用して求める。 t_{Re} は、便宜上前時間ステップの値で代用する。

$$HG_n = \int \{\phi_{w,T}(\tau) t_{e,n}(t - \tau) - \phi_{w,A}(\tau) t_{Re}(t - \tau)\} d\tau \quad \dots(1-19)$$

$$t_{e,n} = \{U_{V,n,wBase} (t'_{Oe} - t_{Re}) + \sum_j \eta_{V,n,wBase,j} \cdot I_j\} / U_{wBase} + t_{Re} \quad \dots(1-20)$$

【記号】 U, η : 非通気時の熱貫流率 [W/m² K]、日射熱取得率 [-]、 $\Delta U, \Delta \eta$: 熱貫流率極限変化量 [W/m² K]、日射熱取得率極限変化量 [-]、 R : 通気補正係数 [-]、 R_n, R_{ave} : 層別通気効果率、平均通気効果率 [-]、 r : 通気効果率 [-]、 K_C : 窓内対流熱取得係数 [W/m² K]、 c_p, ρ : ダブルスキン空気の比熱 [J/gK]、密度 [g/lit あるいは kg/m³]、 t_{IN}, t_{Oe}, t_{Re} : 流入空気温度、室外側相当温度、室内相当温度 [°C]、 I : 窓面日射量 [W/m²]、 T_o, T_{SR} : 貫流用温度重み係数 [-]、日射用温度重み係数 [K m²/W]、 x : 部位別面積率 [-]、サフィックス*、 k, j : 全体、部位別、日射種別 (直達、天空、地表面反射)、 A_{ei}, A_{eo} : 下部、上部換気口有効開口面積 [m²/m]、 h_{FL}, h_V, h_{NPL} : 1層分高さ、換気口間距離、下部開口から中性帯までの高さ [m]、 ΔP_i : 下部開口での内外差圧 [kg/m²]、 ρ_o, ρ_S : 外気、基準空気密度 [kg/m³]、 g : 重力加速度 [m/sec²]、 τ, η_{Gout} : 対象ダブルスキンの透過率 [-]、外ガラスのみの日射熱取得率 [-]、サフィックス $base$: 基準入射条件、 R_o : 夜間放射量 [W/m²]、 $\epsilon'_o, \epsilon_o, h_o$: 屋外面の修正放射率 [-]、放射率 [-]、総合熱伝達率 [W/m² K]、 $\phi_{w,T}, \phi_{w,A}$: 室内側壁 (室内からダブルスキン空間まで) の貫流、吸熱重み関数 [W/m² K]、 t : 現在時間 [sec]、サフィックス $wBase$: 内側全面基準壁、 U_{wBase} : 基準壁の熱貫流率 (室内からダブルスキン空間まで) [W/m² K]

表2 窓排気の一部を空調機に戻す AFW の熱性能

●システム熱貫流率、システム日射熱取得率

高さ方向をN層に分割する AFW の全層平均の熱貫流率 $U_{AFW,ave}$ [W/m² K] と日射熱取得率 $\eta_{AFW,ave}$ [-] は、表1の式(1-1)、(1-2)、(1-4)、(1-5)より得られる。これに、窓排気の回収風量の熱処理分 ΔU_{Sys} [W/m² K]、 $\Delta \eta$ [-] を加えたものをシステム熱貫流率 U_{Sys} [W/m² K]、システム日射熱取得率 η_{Sys} [-] と定義する。

$$U_{Sys} = U_{AFW,ave} + \Delta U_{Sys} \quad \dots(2-1)$$

$$\eta_{Sys} = \eta_{AFW,ave} + \Delta \eta_{Sys} \quad \dots(2-2)$$

$$\Delta U_{Sys} = c_p \rho V_{ret} T_o (1 - r^N) \quad \dots(2-3)$$

$$\Delta \eta_{Sys} = c_p \rho V_{ret} T_{SR} (1 - r^N) \quad \dots(2-4)$$

$$V_{ret} = (1 - x_{ex}) V / N \quad \dots(2-5)$$

●貫流熱取得 $HG_{T,n}$ [W/m²]

AFW の貫流熱取得を求めるとき、室内側温度として、内側修正相当温度 t'_{Re} [°C] を用いる。

$$HG_{T,n} = U_{AFW,ave} (t_{Oe} - t'_{Re}) \quad \dots(2-6)$$

$$t'_{Re} = t_R + \epsilon'_i R / h_i \quad \dots(2-7)$$

$$\epsilon'_i = \epsilon_i \{U_{DS,ave} - c_p \rho V_{ret} (1 - T_o) (1 - r^N)\} / U_{Sys} \quad \dots(2-8)$$

【記号】 V : N 分割した窓の単位面積あたり通気量 [lit/sec m²]、 V_{ret} : 窓全層の単位面積あたり回収風量 [lit/sec m²]、 x_{ex} : 屋外排気率 [-]、 $U_{DS,ave}$: 窓に同風量の外気を通したときの平均熱貫流率 [W/m² K]、 R_i : 室内表面の吸収放射量 [W/m²]、 $\epsilon'_i, \epsilon_i, h_i$: 室内表面の修正放射率 [-]、放射率 [-]、総合熱伝達率 [W/m² K]、その他は表1参照。

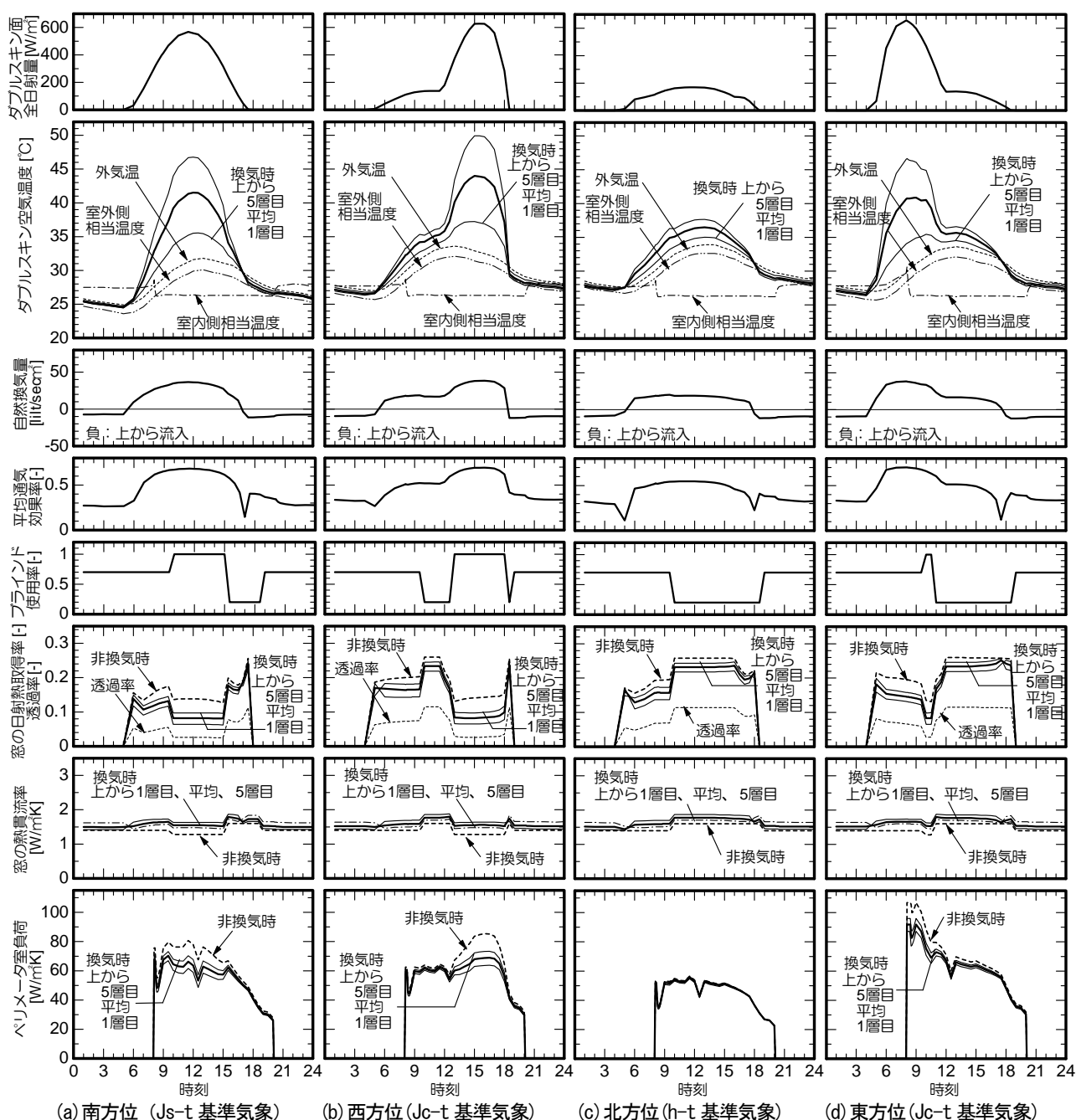
表3 基準計算条件

気象	東京EA設計用気象データ(外部風は無視) 方位別代表気象・時刻: 南はJs-t基準11:30、西はJc-t基準16:00、北はh-t基準11:30、東はJc-t基準9:00
ダブルスキン	外ガラス: 透明単板、内側窓: Low-E複層・ダブルスキン側明色ブラインド(標準操作)・高さ2.7m(窓面積率68%)、内側上部壁: 高さ1.3m、ダブルスキン空間から室内までの熱貫流率: 0.9W/m ² K、グレーチングの出: 0.5m、吹抜層数: 5層、換気口有効開口面積: 上下に0.06m ² /m
AFW	内外とも透明単板ガラス・明色ブラインド内蔵(標準操作)・窓面積率68%、通気量: 10lit/secm ² 、排気回収なし
一般窓	Low-E複層ガラス・内側明色ブラインド(標準操作)・窓面積率68%
ゾーン	室: 中間階室ペリメータ・インテリア2ゾーン断面(室奥行き15m、ペリメータ奥行き5m、階高4m)、内部発熱(最大): 照明15W/m ² 、機器: 15W/m ² 、在室者: 0.15人/m ²
空調	空調時間8:00-20:00(予冷8:00-9:00)、設定室温26°C

*AFW、一般窓のとき、外壁熱貫流率は0.8W/m²K。AFWの層分割は1

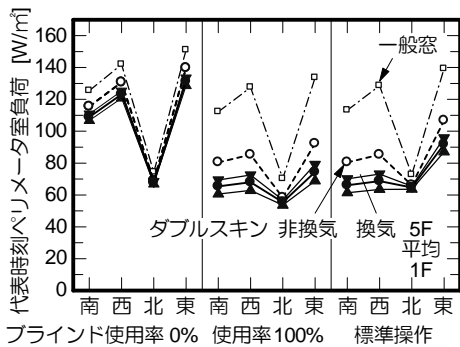
室は、ペリメータ、インテリア2ゾーンのオフィス断面であり、窓の基準条件は、ダブルスキン、AFWのほか、比較のために一般窓についても用意した。

図1は、5層吹抜けダブルスキンをもつオフィスについて、方位別にダブルスキン状態値とペリメータ室負荷の時刻変動を示したものである。南、西、東方位の日射ピーク時刻のダブルスキン空気温度の上下差は10K以上になるが、ダブルスキン空気温度は定常計算であるため、日没後は一気に下がり室外側相当温度に近づく。夜間には上部から外気が流入する。日中の平均通気効果率は0.5~0.7になる。日射熱取得率はブラインド使用率、太陽位置、自然換気量の変化に応じて、熱貫流率はブラインド使用率、自然換気量の変化に応じて変動する。自然換気



(a) 南方位 (Js-t 基準気象) (b) 西方位 (Jc-t 基準気象) (c) 北方位 (h-t 基準気象) (d) 東方位 (Jc-t 基準気象)

図1 4方位のダブルスキンの状態とペリメータ室負荷変動(基準条件)



*「標準操作」のブラインド使用率は、9:00-18:00の時間帯に直達日射ガラス透過量が $10\text{W}/\text{m}^2$ 以下のとき20%、それを超えるとき100%、それ以外の時間では70%

図2 方位・ブラインド使用法とペリメータ室負荷 (ダブルスキン)

により、日射熱取得率は減少、熱貫流率は増大する。特にブラインド使用時の日射熱取得率の減少は大きい。また、自然換気によるペリメータ負荷の減少は直達日射入射量の強い時間帯に顕著で、南、西、東方位に対しては冷房ピーク負荷の低減効果が大きいといえる。それに対して、直達日射が当たらずブラインドを必要としない北方位のペリメータ室負荷には、自然換気の有無の差がほとんど生じなかった。

図2は、方位別代表時刻のペリメータ室負荷について、ブラインドと自然換気の効果と比較したものである。参考に内側ブラインド付きのLow-E複層ガラスの一般窓の結果も示した。ブラインドを使用しないと自然換気を行ってもダブルスキンと一般窓の負荷の差はそれほど大きくない。ブラインドを使用し自然換気をすることでペリメータ室負荷の方位差がかなり小さくなる。北方位はブラインドを使用しても自然換気による負荷低減は小さい。図3は、主要な要因について南方代表時刻のペリメータ室負荷の感度解析を行った結果である。換気による負荷低減率は内側ガラス種類によらず17%程度である、換気時には明色ブラインドより暗色ブラインドが有利になる、内側壁に対して換気効果は小さい、吹抜け層数の違いによる全層平均の換気効果はあまり差がなく吹抜け層数が多いとわずかに不利である、上下にそれぞれ $0.1\text{m}^2/\text{m}$ 以上の有効開口面積の換気口があれば、開口面積による効果の違いはそれほど大きくない可能性があるなどのことがわかった。

図4は、南面AFWの窓通気効果を比較したものである。 $10\text{lit}/\text{sec}\text{m}^2$ の窓通気を行うと、非通気に対して代表時刻(11:30)のペリメータ負荷は2割近く減少する。これに対して、通気量を $2\text{lit}/\text{sec}\text{m}^2$ 増やしその分を空調機に回収すると、通気による負荷低減量は約半分になり、通気量を $5\text{lit}/\text{sec}\text{m}^2$ 増やしてそれを回収すると負荷低減は期待できない。ただし、室内環境の向上効果を別途評価する必要がある。外側ガラスをLow-E複層ガラスにすると回収の逆効果を少し抑えられる。

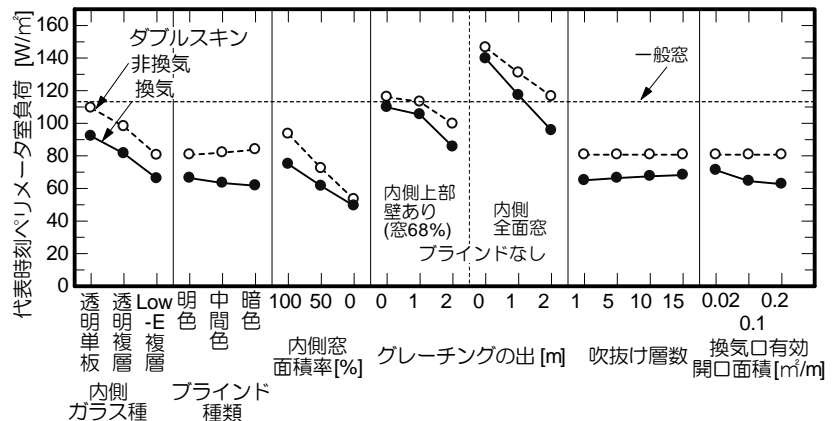


図3 主要な要因とペリメータ室負荷 (ダブルスキン平均性能・南)

【図4、5注記】窓排気回収による熱負荷増大は、ペリメータ室負荷に含めた。

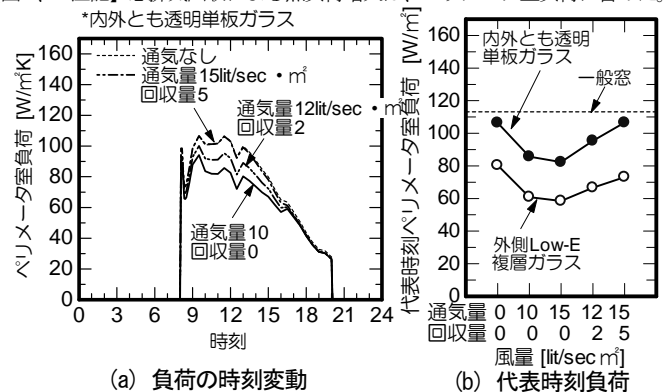


図4 窓風量とペリメータ室負荷 (AFW・南)

5. 結

ダブルスキン、AFWの新計算法をBESTに導入した。ダブルスキンの夏期自然換気効果やAFWの窓排気を空調機に戻す影響を評価可能であることを確認した。

【謝辞】

本報の一部の研究は科研費補助金24560709による。また、(一財)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。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)、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)、田中拓也(大成建設)、長井達夫(東京理科大学)、二宮秀典(鹿児島大学)、野原文男、長谷川巖、滝澤総、二宮博史、丹羽勝巳、久保木真俊(以上、日建設計)、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)

【文献】

- 1) 郡・石野：熱負荷計算のための窓熱性能値に関する研究 第3報、日本建築学会環境系論文集 No.682、pp.997-1002、2012.12
- 2) 石野・郡・長井・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94)、(その96)、pp.1327-1330、p.1335-1338、2012.9、3)
- 3) 郡・石野：熱負荷計算のための窓熱性能値に関する研究、日本建築学会環境系論文集 No.600、pp.39-44、2006.2、4)
- 4) 郡・石野・長井・村上：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40報、日本建築学会大会学術講演梗概集、2013.8