

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27報 ダブルスキン熱計算法の提案

正会員 ○郡 公子*1 同 石野 久彌*2
同 長井 達夫*3 同 村上 周三*4

BEST エネルギーシミュレーション ダブルスキン

1. 序

ダブルスキンの採用事例が増え、その熱性能値やエネルギー・熱環境への効果を推定・評価する手法が望まれている。ダブルスキンの熱計算が、エアフローウィンドウに比べて難しいのは、①自然換気量の計算が必要で、そのためにダブルスキン空気温度の推定も必要となる、②多層吹抜タイプの場合、温度・熱性能値の上下分布の推定が望まれる、③ダブルスキンの室内側に外壁がある場合も対象にする必要があるなどの点である。ダブルスキン空間を多数室の1つとして扱い計算することも考えられるが、部位別吸収日射の計算や対流・放射の分離が簡略化されやすく、入力の手間も増える。

そこで、BESTに導入することを前提とし、重み係数を利用することにより、精度を損なわずに比較的簡単な式で、多層吹き抜けダブルスキンの温度や熱性能値の上下分布を求める計算法を提案した。

2. ダブルスキン熱計算用の熱流重み係数

基準階のダブルスキンについて、図1に示す部位の温度を未知数として、表1に示す定常状態の対流・放射熱平衡式を解くと、ダブルスキン温度や熱性能値計算に使用する熱流重み係数が求められる。予め、種々のケースの重み係数を求めてデータベース化することをねらっている。熱流重み係数は、図2に示す種類があり、自然換気量には依存しない。重み係数は、ダブルスキン空気温度を既知として求めるため、表1式(7)には、便宜上、供給熱量 q の項がある。

3. 多層吹抜けダブルスキンの熱計算法

熱流重み係数を用いて、 n 層目のダブルスキン空気温度の熱平衡式を示したものが表2の式(1)である^{注1)}。この式をもとに、さらにダブルスキン空気温度の重み係数を求めておくと、任意の外乱に対する n 層目のダブルスキン空気温度は表2の式(2)により得られる。ダブルスキン空気温度の重み係数は、自然換気量を既知として計算する。実用的な計算手順は、①ダブルスキン空気温度が全層均一と仮定し、室内相当温度を既知とし、表2の式(2)と風量平衡式から自然換気量を求める、②得られた風量を用いて、表2の式(2)、(4)~(16)から、改めて各層の温度、熱性能値、室内熱取得を計算する、という方法である。自然換気を行う場合、室外相当温度(夜間放射の影響を加味した外気温度)と流入外気温度は、区別する必要がある。そこで、熱貫流率を室外相当温度と流入空気温度に起因する2つの成分 $U_{o,n}$ 、 $U_{v,n}$ に分けて定義し、別々に求められるようにした。本計算法の考え方は、ダブルスキンのみならずエアフローウィンドウにも適用できる。

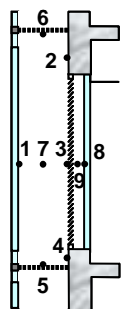
4. 結

今後は、ブラインド内蔵二重窓の重み係数をもとに、ダブルスキン、エアフローウィンドウの熱計算を可能とする方法に拡張する予定である。

【注記】1) 換気口は上下にそれぞれ1カ所あるものとする。また、ダブルスキンの仕様はどの層も同じである。

表1 ダブルスキンの熱平衡式(重み係数計算用詳細計算・ブラインド閉)

右図のダブルスキン断面の各ポイントでの熱平衡式を示す。



1 外側ガラス	$I_{A1}/h_1 + C_1(t_{oe} - t_1) + \alpha_{C1}(t_7 - t_1) + \sum_{k=1}^6 \alpha_{R1,k} F_{1,k}(t_k - t_1) = 0$...(1)
2 上部壁	$I_{A2}/h_2 + C_2(t_{ce} - t_2) + \alpha_{C2}(t_7 - t_2) + \sum_{k=1}^6 \alpha_{R2,k} F_{2,k}(t_k - t_2) = 0$...(2)
3 ブラインド	$I_{A3}/h_3 + \alpha_{C3}(t_7 - t_3) + \alpha_{C3}(t_9 - t_3) + \sum_{k=1}^6 \alpha_{R3,k} F_{3,k}(t_k - t_3) + \alpha_{R8,3}(t_8 - t_3) = 0$...(3)
4 腰壁	$I_{A4}/h_4 + C_4(t_{re} - t_4) + \alpha_{C4}(t_7 - t_4) + \sum_{k=1}^6 \alpha_{R4,k} F_{4,k}(t_k - t_4) = 0$...(4)
5 下部グレーチング	$I_{A5}/h_5 + \alpha_{C5}(t_7 - t_5) + \sum_{k=1}^6 \alpha_{R5,k} F_{5,k}(t_k - t_5) = 0$...(5)
6 上部グレーチング	$I_{A6}/h_6 + \alpha_{C6}(t_7 - t_6) + \sum_{k=1}^6 \alpha_{R6,k} F_{6,k}(t_k - t_6) = 0$...(6)
7 ダブルスキン内空気	$\sum_{k=1}^6 \alpha_{Ck} \cdot h_k(t_k - t_7) + C_p \cdot \rho \cdot V(t_{IN} - t_7) + C_p \cdot \rho \cdot V_B \cdot h_3(t_9 - t_7) + q = 0$...(7)
8 内側ガラス	$I_{A8}/h_8 + C_8(t_{re} - t_8) + \alpha_{C8}(t_7 - t_8) + \alpha_{R8,3}(t_3 - t_8) = 0$...(8)
9 ブラインド・内ガラス間空気	$I_{A9}/h_3 + \alpha_{C3}(t_3 - t_9) + \alpha_{C9}(t_8 - t_9) + C_p \cdot \rho \cdot V_B(t_7 - t_9) = 0$...(9)

【記号】 t_i : 表面*i*の温度[°C]
 t_{oe} : 室外相当温度[°C]、 t_{IN} : 流入空気温度[°C]、 t_{re} 、 t_{ce} : 窓・腰壁側、上部壁側の室内相当温度[°C]、 I_{Ai} : 部位*i*の窓幅1m当たり吸収日射量[W/m]、 h_i : 部位*i*の高さあるいは奥行き[m]、 C_i : 部位*i*のコンダクタンス[W/m²K]、 α_{Ci} : 表面*i*の対流熱伝達率[W/m²K]、 $\alpha_{Ri,j}$: 面*i*間の放射熱伝達率[W/m²K]、 $F_{i,k}$: 面*i*対面*k*の形態係数[-]、 V : 自然換気量[lit/sec·m]、 q : 供給熱量[W/m²]、 V_B : スラット隙間循環風量[lit/sec·m]、 C_p : 空気比熱[J/gK]、 ρ : 空気密度[g/lit]

図1 温度計算点(詳細計算)

*相当温度とは、夜間放射や室内面に当たる放射の影響を加味した空気温度

【謝辞】

本報の一部は、科研費補助金基盤研究(C)21560610 による。また、(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)、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)、高橋亜璃砂(大林組)、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、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)郡公子、石野久彌、長井達夫、村上周三：建築総合エネルギーシミュレーションツール BEST のための建築シミュレーション法に関する研究、空気調和・衛生工学会論文集、No.162、pp.9-15、2010.9 2) 郡公子、今井崇嗣、坂本隼人：ダブルスキンシステムの基本的熱特性に関する数値解析、IBPSA-Japan 論文集/2010、pp.17-24、2010.12

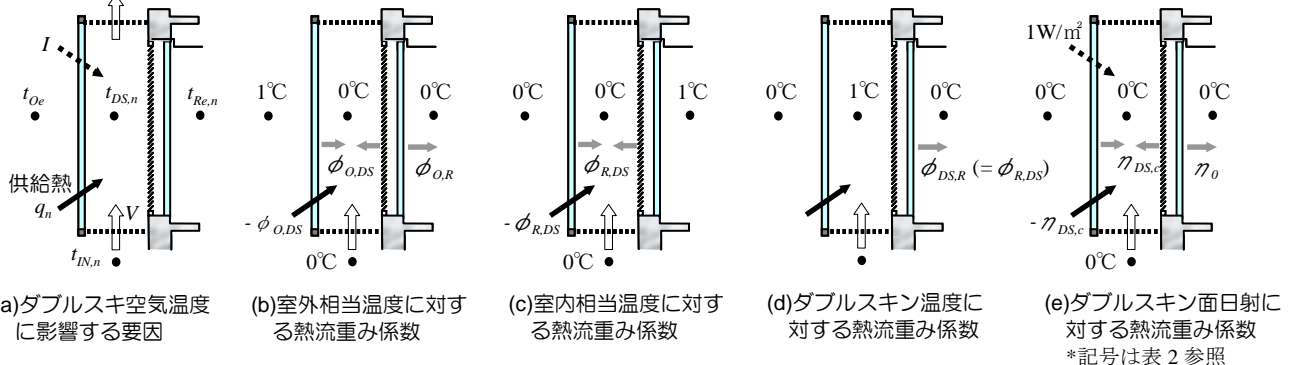


図2 ダブルスキン熱平衡計算と室内熱取得計算に用いる熱流重み係数

表2 重み係数を用いるダブルスキン空気温度、窓の熱貫流率・日射熱取得率の計算法

多層吹抜けダブルスキンのn層目の空気熱平衡式を、重み係数 $\phi_{O,DS}$ 、 $\phi_{R,DS}$ 、ダブルスキン空間の日射熱取得率対流成分 $\eta_{DS,c}$ を用いて、式(1)のように表すことができる。

$$\phi_{O,DS}(t_{Oe} - t_{DS,n}) + \phi_{R,DS}(t_{Re} - t_{DS,n}) + \eta_{DS,c} \cdot I + C_p \cdot \rho \cdot V (t_{IN,n} - t_{DS,n}) = 0 \quad \dots(1)$$

式(1)をもとに、さらに、ダブルスキン空気温度を求めるための重み係数、熱貫流率、日射熱取得率の式を導くことができる。ただし、自然換気量Vは既知とする。

●ダブルスキン空気温度

n層目のダブルスキン空気温度 $t_{DS,n}$ は、室外相当温度 t_{Oe} 、室内相当温度 t_{Re} 、換気による1層目の流入空気温度 $t_{IN,1}$ 、ダブルスキン面日射量Iに対するダブルスキン空気温度の重み係数 $T_{O,n}$ 、 $T_{R,n}$ 、 $T_{V,n}$ 、 $T_{SR,n}$ を用いて、次のように表される。

$$t_{DS,n} = T_{O,n} \cdot t_{Oe} + T_{R,n} \cdot t_{Re} + T_{V,n} \cdot t_{IN,1} + T_{SR,n} \cdot I \quad \dots(2)$$

●室内熱取得

n層目の室内熱取得 $HG_{in,n}$ [W/m²] は、次式で表される。

$$HG_{in,n} = \phi_{O,R}(t_{Oe} - t_{Re,n}) + \eta_n \cdot I + \phi_{DS,R}(t_{DS,n} - t_{Re,n}) \quad \dots(3)$$

●ダブルスキン空気温度の重み係数

ダブルスキン空気温度の重み係数は、式(1)において、 $t_{Oe}=1^\circ\text{C}$ 、 $t_{Re}=t_{IN,1}=0^\circ\text{C}$ 、 $I=0$ と置くと $T_{O,n}$ 、 $t_{Re}=1^\circ\text{C}$ 、 $t_{Oe}=t_{IN,1}=0^\circ\text{C}$ 、 $I=0$ と置くと $T_{R,n}$ 、 $t_{IN,1}=1^\circ\text{C}$ 、 $t_{Oe}=t_{Re}=0^\circ\text{C}$ $I=0$ と置くと $T_{V,n}$ 、 $t_{IN,1}=t_{Oe}=t_{Re}=0^\circ\text{C}$ $I=1$ と置くと $T_{SR,n}$ を、導くことができる。

$$T_{O,n} = k_{1,n} \cdot \phi_{O,DS} \quad \dots(4) \quad T_{R,n} = k_{1,n} \cdot \phi_{R,DS} \quad \dots(5)$$

$$T_{SR,n} = k_{1,n} \cdot \eta_{DS,c} \quad \dots(6) \quad T_{V,n} = k_{2,n} \quad \dots(7)$$

$$k_{1,n} = \frac{1}{\Phi_{DS}} \frac{(1-r^n)}{(1-r)} \quad \dots(8) \quad k_{2,n} = r^n \quad \dots(9)$$

$$r = \frac{C_p \cdot \rho \cdot V}{\Phi_{DS}} \quad \dots(10) \quad \Phi_{DS} = \phi_{O,DS} + \phi_{R,DS} + C_p \cdot \rho \cdot V \quad \dots(11)$$

●窓熱貫流率

ここでは、ダブルスキン室内側外壁も窓の一部と扱う。n層目の窓の貫流熱取得 $HG_{T,n}$ [W/m²] を室外相当温度に起因する成分と流入空気温度に起因する成分に分け、それぞれに対応する熱貫流率 $U_{O,n}$ 、 $U_{V,n}$ [W/m²K] を新たに定義し、これを用いて表す。

$$HG_{T,n} = U_{O,n}(t_{Oe} - t_{Re,n}) + U_{V,n}(t_{IN,1} - t_{Re,n}) \quad \dots(12)$$

$U_{O,n}$ 、 $U_{V,n}$ は、式(2)~(4)、(7)から導出できる。

$$U_{O,n} = \phi_{O,R} + T_{O,n} \cdot \phi_{DS,R} = \phi_{O,R} + k_{1,n} \cdot \phi_{O,DS} \cdot \phi_{DS,R} \quad \dots(13)$$

$$U_{V,n} = T_{V,n} \cdot \phi_{DS,R} = k_{2,n} \cdot \phi_{DS,R} \quad \dots(14)$$

●日射熱取得率

日射熱取得 $HG_{SR,n}$ [W/m²] は、室内日射熱取得率 η_n を用い、

$$HG_{SR,n} = \eta_n \cdot I \quad \dots(15)$$

と表される。 η_n は、ダブルスキン空気温度が0°Cと想定した場合の室内日射熱取得率 η_0 を補正して求める。

$$\eta_n = \eta_0 + \phi_{DS,R} \cdot T_{SR,n} = \eta_0 + k_{1,n} \cdot \eta_{DS,c} \quad \dots(16)$$

【記号】

添え字n：対象とする層番号(ダブルスキン最下層からの番号)、 t_{Oe} ：室外相当温度[°C]、 $t_{DS,n}$ ：ダブルスキン空気温度[°C]、 $t_{Re,n}$ ：室内相当温度[°C]、 $t_{IN,n}$ ：流入空気温度[°C]、 I ：ダブルスキン面日射量[W/m²]、 V ：換気風量[lit/sec·m²]、 $\phi_{O,DS}$ 、 $\phi_{O,R}$ ：室外相当温度に対するダブルスキン空気への対流放熱重み係数、室内熱取得重み係数[W/m²K]、 $\phi_{R,DS}$ ：室内相当温度に対するダブルスキン空気への対流放熱重み係数[W/m²K]、 $\phi_{DS,R}$ ：ダブルスキン空気温度に対する室内熱取得重み係数[W/m²K]、 $\eta_{DS,c}$ ：ダブルスキン空気の日射熱取得率(対流)[-]、 η_0 ：ダブルスキン空気温度が0°Cのときの室内日射熱取得率[-]、 C_p 、 ρ ：空気の比熱[J/gK]、密度[g/lit]、 $T_{O,n}$ 、 $T_{R,n}$ 、 $T_{V,n}$ ：室外相当温度、室内相当温度、1層目の流入空気温度に対するダブルスキン空気温度の重み係数[-]、 $T_{SR,n}$ ：ダブルスキン面日射量に対するダブルスキン空気温度の重み係数[K/(W/m²)]、 $U_{O,n}$ 、 $U_{V,n}$ ：室外相当温度、流入空気温度に起因する熱貫流率 $U_{O,n}$ 、 $U_{V,n}$ [W/m²K]

*1 宇都宮大学 准教授 工博
*2 首都大学東京 名誉教授 工博
*3 東京理科大学 准教授 博士(工学)
*4 建築研究所 理事長 工博

*1 Associate Prof., Utsunomiya Univ., Dr.Eng.
*2 Emeritus Prof., Tokyo Metropolitan Univ., Dr.Eng.
*3 Associate Prof., Tokyo Univ. of Science, Dr.Eng.
*4 Chief Executive, Building Research Institute, Dr.Eng.