ペリメータレス空調のための窓システムの評価に関する研究

第1報 窓側放射環境の評価法

A STUDY ON EVALUATION OF WINDOW SYSTEMS WHICH DO NOT NEED
SEPARATE PERIMETER AIR CONDITIONING SYSTEMS

Part 1 A evaluation method of window side radiant environment

郡 公子*

Kimiko KOHRI

Window systems such as air flow window, push-pull window and high performance general window make it possible to maintain space thermal comfort without individual air conditioning equipment for perimeter zone. The purpose of this paper is to establish an evaluation method of window side radiant environment for determination of proper window system. A simulation method of space radiant environment was shown and "operative temperature increase on window side" was defined as an index of window side radiant environment. Comfort range of this index was proposed by using PMV. From a simulation analysis for a glass-covered office building, basic characteristics of three types of window system became clear.

Key words: Air flow window, Push-pull window, High performance general window, Radiant environment, Evaluation method

エアフローウィンドウ、プッシュプルウィンドウ、高性能一般窓、放射環境、評価法

1.序

窓内に空気を通すエアフローウィンドウやプッシュプルウィンドウなどの高性能な窓システムを採用すると、ペリメータゾーン専用の空調システムを設けなくても、窓側熱環境を良好に保つことができる可能性がある。空調方式として、VAV方式などの個別制御が可能な方式を選択すれば、窓側の室温制御はかなりの場合可能となり、課題は室内の放射環境の均一化、冬期の冷房時に起きる恐れのある窓側の室温低下の抑制、コールドドラフトの抑制となる。

本研究は、オフィスビルにおいて、ペリメータレス空調を可能とする窓システムを決定するための評価法を確立し、主要な窓システムの評価を行い、その性能や特徴を明確化することを目的とする。本報では、窓側の放射環境に着目し、この評価法および窓システムの決定基準を検討し提案した。対象とする窓システムは、エアフローウィンドウ（以降 AFW と略す）、プッシュプルウィンドウ（以降 PPW と略す）のほかに、高性能ガラスを用いる一般窓でもペリメータレス化が可能な場合があると考え、これも加えた。また、近年ガラス面積の大きい建築が増えていることから、ガラス面積の大きい建築に対して、夏期冷房設計条件下において、窓側放射環境を良好に保つことのできる窓システムの検討例を示した。

エアフローウィンドウに関する既往の研究には、まず松尾・射場本・井上らによる空気循環型窓に関する一連の研究¹⁾がある。実験を通して AFW の熱性能値を明らかにし、一般窓との比較などを行った。またブラインドの自動制御と組み合わせ、光・熱の期間性能を数値解析した。井上・石野・郡らは、AFW、ダブルスキンを

ペリメータレス空調と位置付け、AFW については実測値との検証を行い、窓・室内を統合したモデルを用いた数値解析によりペリメータレス空調の種々の設計要因の熱性能値への影響や、熱量・室内環境の期間特性などへの効果を解析した^{2), 3)}。PPW に関する研究は、下鳥・梅主らによるもの⁴⁾、李・川瀬らによるもの⁵⁾のほか、最近では大橋らが実験・実測により、熱性能値を求めた研究⁶⁾、郡・石野らによる誘引風量に関する実験研究⁷⁾などがある。これらの研究は、窓システムの熱性能値に関するもの、期間特性に関するものが多く、窓システムの設計を可能とする室内放射環境の評価法の確立には至っていない。

2.窓の熱平衡式と窓基準条件

図1に本研究で対象とする3種類の窓システムを示す。AFW はブラインド内蔵二重ガラスの間に室空気を通すもので、窓からの排気は全て屋外へ排出するものとする。PPW は、窓下部からガラスとブラインドの間に室空気を吹出し、窓上部より排気するもので、吹出気流が上部まで到達するためある程度の風量が必要である。このため、窓からの排気は全て屋外排気できるとは限らず、一部空調機へ戻さざるを得ない場合もある。また、窓下部からの吹出気流によってスラットの隙間から室空気が誘引され、窓上部からは排気されずに余った空気が室内へと流出する。窓通気量は、AFW と PPW の熱性能を決める重要な要素である。PPW では、窓下部からのプッシュ風量と誘引風量の和を窓通気量ととらえる。また、窓通気量に対する窓排気率、屋外排気率を図中の式で定義した。

* 宇都宮大学大学院工学研究科 助教授・工博

Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Utsunomiya Univ., Dr. Eng.

図 1 対象とする窓システム

PPW、AFW の熱平衡式を表 1 に示す。PPW で、ブラインドを閉めている場合は、ガラス内表面、空気層、ブラインドの 3 点の温度を未知数とし、ブラインドが開いている場合は、ガラス内表面とプッシュプル空気層の 2 点の温度を未知数とした。AFW では、ブラインドが閉まっている場合の未知数は 5 点である。本論文では、外ガラスと内ガラスの距離が比較的大きい AFW を想定しており、外側、内側空気層温度やそれぞれの空気層への通気量を区別して扱った。また窓内風速は小さく、外側、内側空気層での通気量の違いによる対流熱伝達率の差は考慮していない。式は省略したが、AFW のブラインド開の場合の熱平衡式は、外ガラス内表面、空気層、内ガラスの 3 点の温度を未知数とした。また、一般窓に対しては、ブラインドが閉まっている場合は、PPW の熱平衡式において、 $V_{PUSH} = 0$ とおき、 V_{IN} としてスラットの隙間を通る自然循環風量を用い、ブラインドが開いている場合は窓内表面温度のみを未知数とする式を用いた。

日射計算では、入射角特性を考慮し、ガラス面、ブラインド面およびガラス・ブラインド間空間の底面と上面の間相互反射を解き、各面吸収日射量を求めた。PPW や AFW では、ガラスとブラインドの間が離れているケースがあり、ブラインドより外側の空間の上面は、ブラインドに対して庇の効果を示すことになる。本研究では、この影響を考慮できるようにした。なお、ガラス・ブラインド間空間の底面と上面に吸収された日射は、空気層へ全て即時放熱するものとした。これは、表 1 の空気層の熱平衡式中の吸収日射量に相当する。

表 2 に、3 種類の窓システムの基準条件を示す。窓は高さ 2.7m と大きく腰壁はない。一般窓と PPW は low- ϵ 複層ガラス、AFW は外、内ガラスとも透明単板ガラスである。PPW、AFW の窓内部奥行きは 40cm ありブラインドに対して庇効果をもつ。ガラスやブラインドの対流熱伝達率、一般窓の自然循環風量は、過去の研究をもとに、表に示す値に設定した。また PPW の誘引風量は実験結果⁷⁾をもとに値を決めた。PPW の誘引風量は、吹出風量、風速、吹出口の形状、ブラインドスラット角によって変わる。また、室温に対するガラス、ブラインド温度の変動に対しても変化する。この詳細な特性は現時点では明確ではない。そこで、本研究では、窓通気量や窓排気率、屋外排気率の変化に対する熱性能値、放射環境への影響を数値解析で把握し、将来誘引風量が明確化されたときに利用できる結果を示すことを目指す。

表 1 窓の熱平衡式

■プッシュプルウィンドウ

(ブラインド閉)

ガラス内表面、ガラス・ブラインド間空気層、ブラインド (添え字 1、2、3 に対応) で熱平衡式をたてる。

$$I_{s1} + C_g(t_{0e} - t_1) + \alpha_{cg}(t_2 - t_1) + \alpha_r(t_3 - t_1) = 0 \quad \dots(1)$$

$$I_{s2} + \alpha_{cg}(t_1 - t_2) + \alpha_{cb}(t_3 - t_2) + C_p \cdot \rho(V_{PUSH} + V_{IN})(t_3 - t_2) = 0 \quad \dots(2)$$

$$I_{s3} + \alpha_{cb}(t_2 - t_3) + \alpha_r(t_1 - t_3) + \alpha_i(OT_{WINDOW} - t_3) = 0 \quad \dots(3)$$

ここに、 $t_1 \sim t_3$ 、 $I_{s1} \sim I_{s3}$: ガラス内表面、ガラス・ブラインド間空気層、ブラインドの温度[°C]および単位窓面積あたり吸収日射量¹⁾[W/m²]、 t_{0e} 、 t_r 、 OT_{WINDOW} : 相当外気温度(夜間放射の影響を考慮)、室温、窓気流熱計算用作用温度[°C]、 C_g : ガラス熱容量[W/m² K]、 α_{cg} 、 α_{cb} : ガラス内表面、ブラインド室内側総合熱伝達率[W/m² K]、 α_r : 放射熱伝達率[W/m² K]、 C_p 、 ρ : 空気比熱[J/gK]、密度[g/lit]、 V_{PUSH} 、 V_{IN} : 単位窓面積あたりプッシュ風量、誘引風量[lit/sec m²]

(ブラインド開)

ガラス内表面、プッシュプル空気層 (添え字 1、2 に対応) で熱平衡式をたてる。

$$I_{s1} + C_g(t_{0e} - t_1) + \alpha_{cg}(t_2 - t_1) + \alpha_r(MRT_{WINDOW} - t_1) = 0 \quad \dots(4)$$

$$I_{s2} + \alpha_{cg}(t_1 - t_2) + C_p \cdot \rho(V_{PUSH} + V_{IN})(t_r - t_2) = 0 \quad \dots(5)$$

ここに、 t_1 、 t_2 、 I_{s1} 、 I_{s2} : それぞれ窓内表面、プッシュプル空気層の温度[°C]および単位窓面積あたり吸収日射量[W/m²]、 MRT_{WINDOW} : 窓気流熱計算用平均放射温度[°C]

■エアフローウィンドウ (ブラインド閉)

外側ガラス、外側空気層、ブラインド、内側空気層、内側ガラス (添え字 1 ~ 5 に対応) で、熱平衡式をたてる。

$$I_{s1} + C_g(t_{0e} - t_1) + \alpha_{cg}(t_2 - t_1) + \alpha_r(t_3 - t_1) = 0 \quad \dots(6)$$

$$I_{s2} + \alpha_{cg} \cdot h(t_1 - t_2) + \alpha_{cb}(t_3 - t_2) + C_p \cdot \rho \cdot V_2(t_r - t_2) + C_p \cdot \rho \cdot V_5(t_4 - t_2) = 0 \quad \dots(7)$$

$$I_{s3} + \alpha_{cb}(t_2 - t_3) + \alpha_{cb}(t_4 - t_3) + \alpha_r(t_1 - t_3) + \alpha_r(t_5 - t_3) = 0 \quad \dots(8)$$

$$I_{s4} + \alpha_{cb}(t_3 - t_4) + \alpha_{cg}(t_5 - t_4) + C_p \cdot \rho \cdot V_4(t_r - t_4) + C_p \cdot \rho \cdot V_5(t_2 - t_4) = 0 \quad \dots(9)$$

$$I_{s5} + \alpha_{cg}(t_4 - t_5) + \alpha_r(t_3 - t_5) + \alpha_i(OT_{WINDOW} - t_5) = 0 \quad \dots(10)$$

ここに、 $t_1 \sim t_5$ 、 $I_{s1} \sim I_{s5}$: それぞれ外側ガラス、外側空気層、ブラインド、内側空気層、内側ガラスの温度[°C]および単位窓面積あたり吸収日射量[W/m²]、 V_2 、 V_4 、 V_5 : 内側、外側空気層への単位窓面積あたり窓通気量、スラットの隙間を介しての単位窓面積あたり空気移動量[lit/sec m²]

【注記】1) 空気層の吸収日射量とは底面吸収日射量のこと、本文中に説明している。

表 2 窓の基準条件 (空調時)

■高性能一般窓

- 1) low- ϵ ガラス 10mm + 空気層 6mm + 透明ガラス 10mm (外側から)
- 2) ガラス・ブラインド間距離 0.1m
- 3) ガラス対流熱伝達率 α_{cg} : 5W/m² K、ブラインド対流熱伝達率 α_{cb} : 10W/m² K²⁾
- 4) スラット隙間を介する自然循環風量 V_s : 3lit/sec m²

■PPW

- 1) low- ϵ ガラス 10mm + 空気層 6mm + 透明ガラス 10mm
- 2) ガラス・ブラインド間距離 0.4m
- 3) α_{cg} : 10W/m² K³⁾、 α_{cb} : 10W/m² K
- 4) プッシュ風量 V_{PUSH} およびプッシュ風量 V_{PULL} : 8lit/sec m² (ブラインドの開閉によらず同一値)、誘引風量 V_{IN} : 16lit/sec m² (ブラインド閉)、24lit/sec m² (ブラインド開)⁴⁾、屋外排気量 V_{EX} : 5lit/sec m² (ブラインド閉のとき、窓排気率は 0.33、屋外排気率は 0.21)

■AFW

- 1) 内外ガラスとも透明 10mm
- 2) 内外ガラス間距離 0.4m (ブラインドの位置は中央)
- 3) α_{cg} : 5W/m² K、 α_{cb} : 10W/m² K
- 4) 窓通気量 V : 5lit/sec m² ($V_2 = V_4 = 2.5lit/sec m^2$ 、ブラインドの開閉によらず同一値)、スラット隙間を介する自然循環風量 V_s : 3lit/sec m²

■共通条件

- 1) 窓高さ 2.7m
- 2) 窓方位: 西
- 3) スラット日射吸収率: 0.5
- 4) スラット角: 45°
- 5) 屋外表面総合熱伝達率: 23W/m² K、室内各部放射熱伝達率: 4.5W/m² K

【注記】1) 文献 8) ~ 10) を参考に決めた。2) 透明ガラスの場合にブラインドを閉めることによる熱抵抗の増分が 0.06 m² K/W (文献 11)) となるような V_s 値とした。3) 実験結果 (文献 7)) から、ガラス面の風速 1m/sec 程度と想定して 1) の式をもとに決めた。4) 実験結果 (文献 7)) をもとに設定した。

図2 オフィスビル断面と温度計算点

C_o, C_{ov} : 外気温に対する窓内表面熱移動係数、空気流出熱移動係数

C_r, C_{rv} : 室温に対する窓内表面熱移動係数、空気流出熱移動係数

(a) 外気温に対する特性値

(b) 室温に対する特性値

図3 新たに提案する窓特性値 (PPW の例)

3. 室内放射環境のシミュレーション法

3.1 温度計算ポイント

図2に示すようなオフィスビル断面を想定し、室内熱環境をシミュレーションするモデルを作成した。窓側空間および室奥側空間の室温、天井内空気温度2点、表面温度11点を未知数とする対流・放射熱平衡式をたてた¹²⁾。窓部分の未知数は窓室内側表面温度のみである。既述の窓熱平衡式をそのまま室計算に組み込むと、窓システムの種類やブラインドの開閉状態により、未知数が変わり煩雑となるため、次に示す窓特性値を新たに定義し、精度を損なわずに未知数を減らす工夫を試みた。また、室内10ポイントについて作用温度を計算し、放射環境評価に用いた。

3.2 新しい窓特性値による窓廻りの熱平衡式

窓の未知数を窓室内側表面温度のみとする場合、従来は、窓特性値として、屋外から窓内表面までの窓熱コンダクタンスおよび窓内表面对流、放射熱伝達率を使う。しかし、これらの熱特性値では、窓内に室空気を通す窓システムの場合、また一般窓でブラインドのスラットの隙間を介して生じる自然空気循環を考慮しようとする場合には、正確に窓の温度と熱量を計算することができない。

窓内の熱平衡式は、表1のように一次式で表すことができるので、窓内から室へ向かう熱流を、外気温に起因する熱流と窓内に通す室空気温に起因する熱流に分けて求め、重ね合わせることができる。この考えを適用し、室計算に用いる窓特性値として、図3に示す4種の係数を新たに提案する。これらは、窓室内側表面温度を基準としたときの、外気温あるいは窓内へ通す室空気温に対する特性値2種ずつであり、事前に窓の熱平衡式を解くことにより得られる。図3は、PPWのブラインド閉の場合であるが、一般窓のブラインド閉の場合も同様に得られる。AFWの場合は、内ガラス温度を基準とする係数を求めればよい。一般窓、PPWのブライン

表3 新しい窓特性値による窓廻りの式 (PPW ブラインド閉での例)

■窓室内側表面の熱平衡式および窓からの空気流出による熱移動量

外気温に対する窓内表面熱移動係数 C_o および空気流出熱移動係数 C_{ov} 、室温に対する窓内表面熱移動係数 C_r および空気流出熱移動係数 C_{rv} [W/m²K]を用いて、窓室内側表面での熱平衡式を以下のように表す。

$$I_s' + C_o(t_{oe} - t_{si}) + C_r(t_r - t_{si}) + \alpha_i(OT_{WINDOW} - t_{si}) = 0 \quad \dots(1)$$

$$ただし、OT_{WINDOW} = (\alpha_{ic} \cdot t_r + \alpha_{ir} \sum F_{WINDOW,k} \cdot t_k) / \alpha_i \quad \dots(2)$$

また、窓からの空気流出による熱移動量 $q_{WINDOW,v}$ [W/m²]は次式で表される。

$$q_{WINDOW,v} = C_{ov}(t_{oe} - t_{si}) - C_{rv}(t_r - t_{si}) + I_{sp}' \quad \dots(3)$$

ここに、 I_s' 、 I_{sp}' : 窓室内側表面の相当吸収日射量、室空気への日射放熱補正量 [W/m²]、 t_{oe} 、 t_r 、 OT_{WINDOW} 、 t_{si} 、 t_k : 長波放射相当外気温、室温、窓貫流熱計算用作用温度、ブラインド温度、室内面 k の温度 [°C]、 α_i 、 α_{ic} 、 α_{ir} : ブラインド室内側総合、対流、放射熱伝達率 [W/m²K]、 $F_{WINDOW,k}$: 窓対室内面 k の形態係数 [-]

■窓室内側表面の相当吸収日射量 I_s' 、日射放熱補正量 I_{sp}' の求め方 $t_{oe} = 0^\circ\text{C}$ 、 $t_r = 0^\circ\text{C}$ 、 $OT_{WINDOW} = 0^\circ\text{C}$ のとき、与えられた窓面日射に対するブラインド温度を t_{sio} 、空気層温度を t_{ao} [°C]、窓からの空気流出による熱移動量 $q_{WINDOW,vo}$ [W/m²]とすると、(1)、(3)式は、

$$I_s' - C_o \cdot t_{sio} - C_r \cdot t_{sio} - \alpha_i \cdot t_{sio} = 0 \quad \dots(1)'$$

$$q_{WINDOW,vo} = C_{ov} \cdot t_{sio} + C_{rv} \cdot t_{sio} + I_{sp}' \quad \dots(3)'$$

となる。 t_{sio} 、 t_{ao} は、表1の熱平衡式(1)~(3)を解いて求められる。従って、 I_s' は(1)'式を変形した次式より得られる。

$$I_s' = (C_o + C_r + \alpha_i) t_{sio} \quad \dots(4)$$

一方、 $q_{WINDOW,vo}$ は次式で表すこともできる。

$$q_{WINDOW,vo} = C_p \cdot \rho \cdot V_{out} \cdot t_{ao} \quad \dots(5)$$

(3)'、(5)式より、次式が得られる。

$$I_{sp}' = C_p \cdot \rho \cdot V_{out} \cdot t_{ao} + (C_{ov} - C_{rv}) t_{sio} \quad \dots(6)$$

ここに、 C_p 、 ρ : 空気の比熱 [J/gK]、密度 [g/lit]、 V_{out} : スラット隙間から室への流出風量 [lit/sec・m²]

表4 作用温度の計算法

■基本式

作用温度 OT および平均放射温度 MRT [°C]は、次式による^{文13)}。

$$OT = x_r \cdot MRT + (1 - x_r) t_r \quad \dots(1)$$

$$MRT = \sum_k [\eta_k \cdot F_{H,k} \{t_k + R_k / (\alpha_{RH} \cdot A_k)\} + (1 - \eta_k) F_{H,k} \cdot t_r] \quad \dots(2)$$

ここに、 x_r : 人体の放射熱伝達率の総合熱伝達率に対する比率 [-]、 t_k 、 t_r : 室温、室内表面 k の温度、家具表面温度 [°C]、 η_k : 家具係数 [-]、 $F_{H,k}$: 人対面 k の形態係数 [-]、 α_{RH} : 人体の放射熱伝達率 [W/m²K]、 R_k : 面 k からのその他の放射量 [W]で、窓面では、ブラインド閉のとき透過日射量、ブラインド開のとき透過した拡散日射量、天井面では照明器具の室内側放射熱量、それ以外の面ではゼロ、 A_k : 面 k の面積 [m²]

■計算条件・計算上の仮定

- 1) x_r : 0.5 (気流速度 0.2m/sec を想定)、
- 2) η_k : 天井面 2/3、床・壁面 1/3、窓面に対する値は窓からの距離 $x \leq 1.5\text{m}$ のとき 1、 $x = 6\text{m}$ のとき 2/3、 $1.5\text{m} < x \leq 6\text{m}$ のとき直線補間
- 3) t_r : 作用温度に等しい

ド開の場合は、従来の方法を利用あるいは応用する。

表3には、新しい窓特性値を用いた場合の窓室内側表面での熱平衡式および関連する諸式を、PPWのブラインド閉の例でまとめた。これらの窓特性値を用いて、窓からの対流、放射熱移動量を正確に求めるためには、これらに対応した日射計算も必要となる。表3には、窓室内側表面の相当吸収日射量、また窓からの空気流出による日射取得熱量を正確に求めるための日射放熱補正量の求め方も示した。シミュレーションに当たっては、まず窓部分の熱平衡式を解いて窓の日射計算を行い、その結果を用いて室内の熱平衡式を解く。

4. 窓側の放射環境の評価手法

作用温度の計算法を表4に示す。室内に存在する家具類の温度を作用温度に等しいと簡略に仮定し、家具類の放射環境への影響も考慮する方法とした¹³⁾。

窓側の放射環境を評価するため、窓の影響を強く受ける代表点と

図4 快適許容域の作用温度差

表5 室内環境の計算条件

- 気象：(東京) TAC2.5 % 夏期設計用外気温、8月方位別危険率2.5 % 設計用日射量
- 建物：中間階室、外壁熱貫流率1.2W/m² K 照明20W/m²
- ブラインド調整：次の場合は閉。①非空調時 ②床面への直達日射差込長さ $x \leq 1\text{m}$ で直達日射透過量 $RD > 350\text{W/m}^2$ のとき ③ $1\text{m} < x \leq 1.5\text{m}$ で $RD > 230\text{W/m}^2$ のとき ④ $x > 1.5\text{m}$ のとき
- 空調：設定室温25℃ 空調時間8:00～18:00(予冷1h) PPW、AFWの窓通気は空調時間帯のみ
- 環境評価時刻およびそのときの垂直面全日射量(拡散日射量)：
 - 南…12時、367(79)W/m²
 - 西…16時、586(46)W/m²
 - 北…12時、213(213)W/m²
 - 東…9時、500(57)W/m²

表6 窓基準条件での熱性能値

窓種類	ブラインド*	U	U _{EX}	System U	Co	Cov	CR	CRV	SC (SCR)	η_{EX}	System SC
一般窓	開	2.6	—	2.6	3.5	—	—	—	0.43 (0.36)	—	0.43
	閉	2.2	—	2.2	2.2	0.3	2.6	2.9	0.34 (0.10)	—	0.34
PPW	開	2.3	0.4	2.5	3.5	—	—	—	0.41 (0.33)	0.02	0.43
	閉	2.1	0.6	2.3	1.4	0.9	8.4	6.4	0.32 (0.07)	0.06	0.35
AFW	開	2.5	1.9	2.5	4.3	—	2.4	—	0.68 (0.60)	0.07	0.68
	閉	1.6	2.1	1.6	2.5	—	2.5	—	0.23 (0.13)	0.18	0.23

【表6注記】1)U、U_{EX}、System U：窓熱貫流率、窓貫流排熱率、システム熱貫流率[W/m² K]。U_{EX}は室内外温度差1Kのときの、通気による窓からの排熱量。
 System Uは、System U = U + U_{EX}(1 - 屋外排気量/窓排気量)
 2)Co、Cov、CR、CRV：外気温に対する窓内表面熱移動係数および空気流出熱移動係数、室温に対する窓内表面熱移動係数および空気流出熱移動係数[W/m² K]。PPWブラインド開のときの窓通気の影響は、Cov、CR、CRVを用いず、次式の見かけのガラス室内側対流熱伝達率 α_{GC} [W/m² K]を使用する。
 $1/\alpha_{GC} = 1/\alpha_{CG} + 1/(CP \cdot \rho(V_{PUSH} + V_{IN}))$ (記号は表1参照)
 3)SC、SCR、 η_{EX} 、System SC：遮蔽係数、放射遮蔽係数、窓日射排熱率、システム遮蔽係数[-]で、日射入射角30°のときの値。 η_{EX} は、窓面日射量に対する通気による窓からの排熱量の比。
 System SCは、System SC = SC + $\eta_{EX} / 3\text{mm}$ ガラスの日射熱取得率 $\times (1 - \text{屋外排気量/窓排気量})$

【図5注記】窓表面温度とは、一般窓、PPWでは、ブラインド閉のときブラインド温度、ブラインド開のとき室内側ガラス温度。AFWでは、常に室内側ガラス温度

図5 窓基準条件での温度時刻変動(西方位)

して窓から1.5m離れた位置を選定した。また、窓から5m以上奥を室奥側空間として、その中央を室奥の代表点とした。図2のオフィスでは、窓から10m離れた位置となる。窓側の放射環境の評価指標として、2つの代表点での作用温度の差を「窓側作用温度上昇」あるいは「窓側作用温度低下」として用いることとする。また、この快適許容限界値を設定するにあたり、PMVを利用した。空調空間の快適域は $-0.5 \leq PMV \leq 0.5$ である。室奥代表点のPMVが0になるよう制御されているとすると、窓側代表点では $-0.5 \leq PMV \leq 0.5$ であればよいと考える。窓側と室奥とのPMVの差を作用温度に換算するために、図4を作成した。着衣量を冷房設計条件のとき0.6clo、暖房設計条件のとき0.9cloと想定すると、PMVの差0.5に対応する作用温度差は、それぞれ1.5K、1.8Kとなる。

5. 冷房設計条件下における窓側放射環境の評価例

5.1 計算条件

窓側の放射環境を良好に保つには、夏期に十分な日射遮蔽性能が、冬期に十分な断熱性能が発揮される窓システムを決定する必要がある。関東以南の温暖地では、冬期より夏期の放射環境が厳しくなりやすく、まず夏期の窓側放射環境を快適許容域に抑える日射遮蔽性能の高い窓仕様を決定することが重要となる。本論文では、東京に建つガラス面積の大きいオフィスビルの西方位を中心に、夏期冷房設計条件下での窓側放射環境の検討例を示す。

表5に計算条件を示す。窓側放射環境の評価には、設計用日射

条件に何をを用いるかが重要である。ここでは、日射量観測値をもとに、方位別に8月の日積算日射量が大きくなる日を選んで作成された条件を用いる¹⁴⁾。この条件は、窓面直達日射量がゼロあるいは小さな値のときに、拡散日射量が大きいという特徴をもっている。ブラインドの開閉判定は、ブラインドが開いているときの直達日射の床面差込長さとして直達日射透過量で行うものとした。空調方式は、VAV方式などの個別制御が可能な方式とし、窓側、室奥とも夏期室温は、設定値に保たれるものと想定した。また、窓側放射環境の評価時刻として、室使用時間帯で最も窓面日射量が大きくなる時刻を方位別に選定した。

以降の数値解析で、特記のない条件は表2、表5の条件である。

5.2 基準条件での窓熱性能値および室内放射環境

まず、基準条件での一般窓、PPW、AFWの特性を比較する。表6に窓熱性能値を示す。窓熱貫流率Uのほかに窓排熱貫流率U_{EX}、システム熱貫流率System Uなる性能値も、新たに定義して示した。U_{EX}、System Uは、それぞれ室内外温度差1Kのときの窓排熱量、空調機が処理した窓貫流熱量[W/m² K]である。System Uは、PPWの窓排気量の一部を空調機に戻さざるを得ない場合にUと異なる値となる。同様に、日射遮蔽性能値として、遮蔽係数SC、放射遮蔽係数SCRのほかに、窓日射排熱率 η_{EX} 、システム遮蔽係数System SCを定義して示した。 η_{EX} は、窓面日射量に対する窓排熱量の比率、System SCは、空調機が処理した窓日射取得熱量を

図 6 窓基準条件での作用温度水平分布（西方位）

表 7 室条件の影響（一般窓・西方位）

要因	条件	代表点作用温度		窓側作用温度上昇
		窓側	室奥	
冷房室温	23℃	25.6℃	24.2℃	1.47K
	25℃	27.5℃	26.1℃	1.44K
	26℃	29.4℃	28.0℃	1.41K
家具	あり	27.0℃	26.0℃	1.44K
	なし	28.1℃	26.9℃	1.29K

図 7 窓物性値類の影響（PPW）

図 8 各方位の作用温度水平分布（一般窓）

遮蔽係数に換算したものである。

熱貫流率 U 、遮蔽係数 SC で評価すると、まず、AFW は、高性能ガラスを使用しなくてもブラインドを閉めると窓の排熱効果が高く、 U 、 SC を非常に小さな値に抑えることができる。ブラインドを開けると SC は相当大きな値となるため、あまりブラインドを必要としない方位には透明ガラスの AFW は不向きと予想される。一般窓と PPW は low- ϵ 複層ガラスを採用している。一般窓、PPW の SC の値は、ブラインド開の場合 AFW より小さいが、ブラインドを閉めると AFW より大きくなる。PPW は、一般窓に対し窓通気を行う点異なるが、 U 、 SC ともわずかに性能が向上する程度である。System U 、System SC で比較すると、ブラインド閉の場合は、窓通気が逆効果として現れ、一般窓より値が大きくなっている。PPW の場合、窓から室への空気流出量が多いと窓熱性能値は向上しない。この原因である誘引風量を抑える工夫が今後重要となる。日射熱の放射環境への影響という点から放射遮蔽係数 SCR を比較すると、ブラインド開、閉どちらの場合も、PPW が最も小さく、AFW が最も大きい。透明ガラスの AFW は、low- ϵ 複層ガラスの一般窓、PPW に対し、ブラインドを閉めたとき、 SC 値自体は小さいものの放射侵入成分が大きいことがわかる。

図 5 は、3 種の窓システムでの温度変動を西方位について示したものである。ブラインドは 9～13 時まで開状態で、14 時に閉められる。窓面日射量がピークとなる 16 時に、窓表面温度、窓側作用温度もピークとなる。16 時の窓表面温度は、AFW が最も高い。PPW の 16 時の窓表面温度は、窓通気の効果で一般窓より 3K 程度低下している。この 3 ケースの 16 時における作用温度の水平分布を図 6 に示す。窓から 10m の室奥代表点の作用温度は、3 ケースとも 26℃前後、窓から 1.5m の窓側代表点の作用温度は、最も温度の高い AFW が 28℃、最も低い PPW が 27℃、一般窓はその中間で 27.5℃となった。窓側と室奥側の代表点の作用温度差で定義される窓側作用温度上昇は、AFW、一般窓、PPW それぞれ 1.9K、

1.5K、1K 程度で、冷房快適許容域 1.5K に対し、PPW は余裕があるものの、AFW は満たせず、一般窓は許容限界値となった。PPW は、窓通気をしない場合に対し空調装置負荷を低減できるとは限らないが、日射熱の長波放射の室内侵入成分を減らすことができるので、窓側の放射環境を確実に向上させるといえる。透明ガラスの AFW は、ブラインドを閉めれば室内日射侵入熱を非常に小さくすることができるが、low- ϵ 複層ガラスの一般窓や PPW に比べると日射侵入熱のうちの放射成分はやや大きく、窓側放射環境を抑えるために必要に応じた窓通気量の配分などの工夫が重要である。

5.3 窓物性値類、室条件の影響解析

窓熱性能値と窓側作用温度上昇を推定する場合、窓廻り対流熱伝達率や PPW の誘引風量などのように、条件設定で誤差が予想される要因がある。また、窓側作用温度上昇は、本来冷房室温を下げる値が大きくなる。これらの影響を予め把握するための試算を行った。そのほか、本論文では室内家具類の影響を簡単に考慮する作用温度計算法を用いており、家具類がない場合との差も試算した。これらの結果を図 7、表 7 に示す。

ブラインド、ガラスの対流熱伝達率の影響を PPW の場合で調べたところ、窓側作用温度上昇への影響はかなり強いことがわかった。ブラインドの対流熱伝達率は、PPW に限らず、他の種類の窓でも明確とはいえず、今後の研究を待つ必要がある。本論文では、PPW と一般窓のブラインド対流熱伝達率を等しいとした。実際には PPW のブラインドまわりの気流は活発であり、一般窓での値より大きいと予想されるが、確実なデータがないため、放射環境の評価の上で安全側の値を設定した。PPW の誘引風量は、検討した範囲では窓側作用温度上昇に対してはそれほど大きくなく、遮蔽係数、熱貫流率に対してやや大きい。

表 7 から、冷房室温の違いによる窓側作用温度上昇の変化は小さく、冷房室温 25℃で数値解析した結果を冷房室温が異なる場合

【図9注記】PPWの窓通気量 V とは、プッシュ風量と誘引風量の和。屋外排気率を用いるとシステム熱貫流率とシステム遮蔽係数が、窓排気率を用いると熱貫流率と遮蔽係数が得られる。屋外排気率、窓排気率の定義は図1参照。

図9 窓通気量の影響（西方位）

に適用しても差し支えないと判断できる。また、家具類の有無による窓側作用温度上昇の違いは0.15Kであった。

5.4 窓設計要因の影響解析

窓の設計要因には、窓システムの種類のほかに、窓方位、窓寸法、外部日除けの寸法、ガラス種類、ガラス・ブラインド間距離、ブラインド日射吸収率、窓通気量などが考えられる。ここでは、窓方位、PPW、AFWの窓通気量、ガラス種類について、窓側作用温度上昇、窓熱性能値への影響を解析した。

図8は、一般窓の場合で、窓4方位の作用温度の水平分布を示したものである。作用温度分布の方位差は、ブラインドの開閉調整を行うかどうかによって異なってくる。ブラインドの開閉調整を行う場合、日射ピーク時刻（表5環境評価時刻）に東、西方位でブラインドは閉められるが、南、北方位では閉める必要がない。図中には、ブラインドを常時閉とする南、北方位のケースも示した。ブラインド調整を行うと、窓側の作用温度の方位差はそれほど小さくなく、北方位が西方位と同程度に厳しい放射環境となった。夏期にブラインドを閉めることを想定して窓の設計を行うと、南、北方位では危険である。

図9は、PPWとAFWについて、窓通気量の影響を示したものである。PPWは、窓排気率から熱貫流率と遮蔽係数、屋外排気率からシステム熱貫流率とシステム遮蔽係数が得られる。PPWでは、

【図10注記】ガラス厚は10mm。複層ガラスの室内側は透明ガラス。セラミック・リントガラスは空気層側の30%の面積に被覆(白)。高性能熱反射はフル系。

図10 ガラス種類の影響（西方位）

屋外排気率を0.25以上確保しないと、窓通気量の増加とともにシステム熱貫流率、システム遮蔽係数が増大してしまう。窓通気量が20lit/sec・m²以上になると、窓側作用温度上昇はあまり変わらない。AFWは、窓通気量を増加させることによる窓側作用温度上昇の抑制効果が、PPWに比べて非常に大きい。窓通気量を11lit/sec・m²以上にすると、透明ガラスでも窓側作用温度上昇を快適許容域内に抑えることができる。

図10は、ガラス種類の違いを示したものである。一般窓、PPWはガラス種類の違いによる窓側作用温度上昇の変化や遮蔽係数の変化が大きい。これに対し、AFWは、外ガラスを高性能なものに変えても、一般窓やPPWほど、窓側作用温度上昇や窓熱性能値の改善効果は見られない。PPWは、AFWほど窓通気による排熱効果が低いいため、まずガラスを高性能なものにすることが重要である。

本論文では、設計要因による影響の検討例を示す程度としたが、今後種々の要因の影響解析を行い、影響の強い要因を絞り、窓システムの具体的な決定法を検討する予定である。

6. 結論

高性能一般窓、PPW、AFWの3つの窓システムを対象として、

オフィスビルでのペリメータレス空調を可能とする窓仕様の決定法を確立するために、数値計算から窓側の放射環境を評価する手法を示した。本手法で、新たに提案した点は以下である。

1)室内放射環境のシミュレーションモデルの構築に当たって、窓部分の熱平衡式と室熱平衡式を切り離し、4種類の窓熱移動係数を新たに提案することにより、室計算での窓部分は、窓システムの種類やブラインド開閉状態によらず、室内側表面温度のみを未知数とする扱いでも精度を落とさず計算可能とした。

2)窓側の放射環境の評価指標として、窓側作用温度上昇あるいは低下を定義した。またこの快適許容限界値を PMV を利用して決定し、冷房時 1.5K、暖房時 1.8K とした。

3)PPW は、窓からの排気の一部を空調機に戻さざるを得ない場合があり、このときの窓熱性能値として、システム熱貫流率とシステム遮蔽係数を新たに定義した。

次に、東京にあるガラス面積の大きいオフィスビルを想定し、夏期冷房設計条件下での窓要因の影響を解析し、以下の知見を得た。

1)冷房室温を変えても窓側作用温度上昇はあまり変化しない。従って、基準の冷房室温で窓側作用温度上昇を解析すれば、その結果を冷房室温が異なる場合に適用しても問題ない。

2)ブラインドの開閉調整を行う場合、南、北方位は夏期にブラインドを閉める必要がなく、日射ピーク時の放射環境は東、西方位と同程度に厳しくなる。このことから、ブラインドを閉めることを想定して南、北方位の窓を設計すると危険といえる。

3)PPW は、窓から室への空気流出があるため、窓通気による窓熱性能値の向上はあまり期待できない。従って、高性能ガラスを採用することが前提といえる。窓通気量に対する屋外排気率をある値以上確保しないと、窓通気を行わない場合に対しシステム熱貫流率、システム遮蔽係数が大きくなり省エネルギー上は逆効果となる。基準条件の場合、その境界の屋外排気率は 0.25 程度である。しかし、窓通気によって室内への長波放射侵入量を抑制できるので、窓側の放射環境は確実に向上する。

4)AFW は、高性能ガラスを使用しなくてもブラインドを閉めると窓通気による排熱効果が高く、熱貫流率と遮蔽係数を非常に小さな値にすることが可能で、省エネルギー的に優れている。しかし、日射侵入熱の放射成分がやや大きく、窓側の放射環境を良好にするには、必要に応じた窓通気量の配分が重要である。これが無理な場合、高性能ガラスの使用などを検討せざるを得ないが、ガラス種類を変えることによる窓側作用温度上昇と窓熱性能値の向上は、一般窓や PPW に比べると小さいことに留意する必要がある。

本論で扱った AFW は、ガラス間隔が 40cm 程度のものであり、間隔のごく狭い AFW は考慮していない。今後の課題である。

謝辞

本研究は、御竹中工務店の奨学寄付金によるものである。御竹中工務店設計部高井啓明氏を始め関係各位に謝意を表す。また、東京都立大学大学院石野久彌教授の御指導御援助を得た。ここに記して謝意を表する。

注記

本論文は、参考文献 15)、16)の内容を再検討しまとめ直したものである。

参考文献

- 1)松尾陽・井上隆・射場本忠彦ほか：窓の熱的性能評価に関する研究(その 1)、(その 2)、(その 4)～(その 7)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.621～624、1983.9、pp.705～706、1984.10、pp.823～824、1985.10、pp.767～768、1986.8 ほか多数
- 2)井上宇市・石野久彌・郡公子ほか：ペリメータレス空調の評価法に関する研究、第一報～第五報、空気調和衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.217～224、1991.10、pp.353～360、1992.10
- 3)石野久彌・郡公子・内藤敬：ペリメータレス空調の適用性の検討、空気調和衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.741～744、1995.10
- 4)下島睦郎・梅主洋一郎・福永純治：窓際のプッシュプル流れによる日射熱負荷の除去効果について、空気調和衛生工学会学術論文集、pp.389～392、1982.10 他
- 5)李春夫・川瀬貴晴ほか：窓下からのエアカーテンによるペリメータ熱負荷処理効果の測定、空気調和衛生工学会学術論文集、pp.213～216、1986.10
- 6)大橋一正・関五郎・西川豊宏：空気流通のある窓面の熱的特性に関する実験的研究 第 1 報、第 2 報、空気調和衛生工学会論文集 No.65、pp.15～22、1997.4、No.68、pp.21～28、1998.1
- 7)郡公子・石野久彌ほか：プッシュプルウィンドウの気流特性に関する実験研究、第 1 報、第 2 報、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.629～636、1999.9
- 8)稲沼実・石野久彌・芝原崇慶：横型ブラインドのある窓の日射遮蔽係数算定のための日射熱移動に関する実験的研究、日本建築学会計画系論文集 No.527、pp.45～52、2000.1
- 9)鈴木哲行・片山忠久・林徹夫ほか：ブラインドを含む窓面の伝熱機構の解析 その 2、日本建築学会学術講演梗概集、pp.783～784、1989.10
- 10)日本機械学会：伝熱工学資料改訂第 4 版、pp.42～70、1986.10
- 11)木村建一・田中辰明・宮川保之：回転式空調実験室によるガラス窓からの熱負荷変動に関する実験的研究、空気調和・衛生工学 Vol.44-7、pp.1～10、1970.7
- 12)郡公子・石野久彌：温熱環境とエネルギー消費量の同時評価法に関する研究、日本建築学会計画系論文集 No.365、pp.40～48、1986.7
- 13)石野久彌・郡公子：輻射環境を考慮した空調設計用室内熱環境条件の決定法に関する研究、日本建築学会計画系論文集 No.457、pp.1～7、1994.3
- 14)空気調和・衛生工学会：空気調和・衛生工学便覧第 12 版 3、p.26、1995
- 15)郡公子：ペリメータレス空調に必要な窓の熱性能に関する研究 ―ガラス建築の窓日射遮蔽性能―、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.27～28、1998.9
- 16)郡公子・高井啓明ほか：ペリメータレス空調のガラス建築への適用に関する研究、第 3 報、空気調和衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.109～112、1998.8、1999.9

(2000年3月22日原稿受理、2000年8月30日採用決定)