

模擬日射装置をもつ実験室による高性能窓システムの性能評価

張本 和芳*1・佐藤 博樹*2

Keywords : air-flow window, solar heat gain factor, overall heat transfer coefficient, laboratory experiment, solar simulator

エアフローウインドウ, 日射熱取得率, 熱貫流率, 室内実験, 日射模擬装置

1. はじめに

高性能窓システムは空調の省エネルギーに有効であり, 特にエアフローウインドウは窓際温熱環境の改善に優れる窓システムである。近年では, アウターガラスに Low-εガラスを用いたエアフローウインドウが設計されている¹⁾。

本報で紹介するエアフローウインドウでは, Low-εガラスに日射透過率の低いタイプ(クリアタイプの約6割の透過率)を採用しているため, 窓際温熱環境の維持に必要なエアフロー風量を減らすことが可能となる。エアフロー風量が多い場合は, この風量の一部を室内側に戻す必要があり省エネ効果が期待されないが, エアフロー風量を減らすことにより, エアフローの全風量を外部へ排気することで省エネを図ることができる。本報ではこのエアフローウインドウについて実験室にて行った熱的性能実験について報告する。

また日射模擬装置を用いた実験室における窓の熱性能の計測方法について概説する。

2. 実験概要

2.1 窓システム構成と試験室

窓システムは表-1 に示す部材から構成され, エアフロー気流はインナーサッシ下端部の 20mm の隙間から導入され, 空気流通層頂部に接続されたチャンバーを介して排気される(図-1)。

実験は環境試験室(表-2, 図-2)にて 2011 年 1~3 月に実施した。環境試験室は, 外気温度と日射を模擬する外気条件室と実際のオフィスを模擬した室内側居室からなり, 界壁部分に本エアフローウインドウを構築した。実際の室内気流条件を再現するため, 室内側居室には天井面の窓際と室内側に吹出口を設置した。

*1 技術センター建築技術研究所環境研究室

*2 (株)三菱地所設計

表-1 窓システム概要

Table 1 Outline of Window System

| | |
|---------|-----------------------------------|
| アウターガラス | Low-ε 10mm + 空気層 16mm + フロート 10mm |
| ブラインド | スラット 50mm アルミシルバー |
| インナーガラス | フロート 10mm |
| インナーサッシ | W1800×H2173.5mm×左右2枚(引違い) |

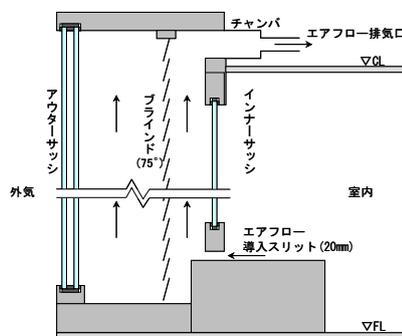


図-1 窓システム概要

Fig. 1 Outline of Window System

表-2 環境試験室の概要

Table 2 Outline of Environmental Experimental Laboratory

| | |
|-------|---|
| 室内側居室 | 床面積 77m ² (6.4m×12.0m), 容積 207.4m ³ , システム天井(CL2.750m) |
| 外気条件室 | 日射模擬装置(メタルハライドランプ×40 灯), 温度: -10~50℃ |



図-2 実験室内観 (試験体設置状況)

Fig. 2 Experimental Laboratory and Specimen Installation

2.2 測定条件

熱貫流率, 日射熱取得率を測定項目とし, 夏期・冬の外気・室内条件を設定した(表-3)。夏期設計外気温度は 34.4℃であるが, 室内側への熱量が小さく,

測定誤差が大きくなる可能性があり、外気 50℃の条件も併せて行った。

実験では標準風量 75.7[m³/(h・m)]に対し 1.32, 0.75, 0.5, 0 の倍率を設定し、5 ケースの風量と熱流との相関を評価した。実際の建物での窓高さは 2871[mm]であるが、実験上の制約により実験での窓高さを 2173.5[mm]としたため、実際の標準風量 100[m³/(h・m)]に対し、実験では縮率を考慮し、標準風量を 75.7[m³/(h・m)]として高さ方向の温度分布を再現することを試みた。

3. 測定要領

3.1 日射模擬装置の光源の選定

日射模擬装置の光源には、波長特性が太陽光に比較的近いメタルハライドランプを用いた(図-3, 図-4)。Low-εガラスは赤外域の透過率が低い特長があるため(図-5), 日射模擬装置とガラスの分光特性を考慮して、Low-εおよびフロートガラスの光学特性(透過, 吸収, 反射)を求め(表-4), さらに JIS R3106 の算定式により、ガラス, ブラインドの組み合わせ構成における光学特性を算出し、比較検証した(表-5)。

日射模擬装置の光源は、Low-εガラス単体において太陽光と同等の透過率があり、組み合わせ時においても総合吸収率の和の差は僅かであった。アウターガラスでの吸収率が小さく、ブラインドでの吸収率が高めであり、室内側へ伝達される熱量が若干高めとなることが予想された。

3.2 熱貫流・日射熱取得率の測定方法

熱貫流率および日射熱取得率は、室内側ガラス表面での熱流 Q_i の対流分および放射分の和により算出した(図-6, 7, 表-6)。室内側ガラス表面の対流分は、対流熱伝達率に窓表面温度と近傍空気温度の温度差を乗じて求めた。放射分は、室内側ガラス表面とガラス表面に対する実験室内の平均放射温度の温度差により求めた。対流熱伝達率, 放射熱伝達率の求め方は後述する。

熱貫流率 U は、室内側ガラス表面での熱流 Q_i を屋外側温度 T_o と室内側温度 T_i の温度差で除して求めた。

日射熱取得率 η は、室内再放熱分と室内透過日射分を測定して求めた。室内再放熱分は、室内側ガラス表面での熱流から、室内外温度差による熱貫流分を減じて求めた。室内透過日射分は日射計を室内側に設置して計測した。

表-3 測定条件

Table 3 Measurement condition

| Case | 季節 | 測定項目 | 日射模擬装置 | ブラインド | 屋外温度 [°C] | 室内温度 [°C] |
|-------|----|--------|--------|-------|-------------|-----------|
| 1~5 | 夏 | 熱貫流率 | OFF | 75° | 34.4 (50.0) | 26.0 |
| 6~10 | 夏 | 熱貫流率 | OFF | 開 | 34.4 (50.0) | 26.0 |
| 11~15 | 夏 | 日射熱取得率 | ON | 75° | 34.4 | 26.0 |
| 16~20 | 夏 | 日射熱取得率 | ON | 75° | 26.0 | 26.0 |
| 21~25 | 冬 | 熱貫流率 | OFF | 開 | 2.0 | 22.0 |



図-3 外気条件室(日射模擬装置)

Fig.3 Outside Air Chamber and Solar Simulator

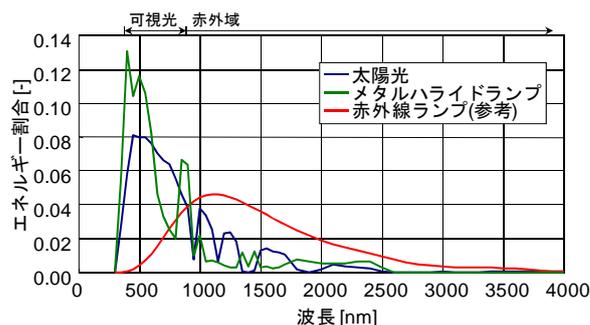


図-4 各光源の波長特性

Fig.4 Spectrum Distribution of each light source

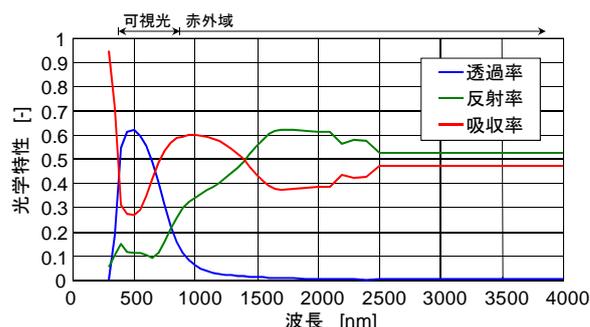


図-5 Low-εガラスの波長特性

Fig.5 Spectral Character of Low-E glass

表-4 各光源に対するガラスの光学特性

Table 4 Optical Characteristics of Each Light Source

| | Low-εガラス(単板)10mm | | | フロートガラス 10mm | | |
|----------|------------------|------|------|--------------|------|------|
| | 反射率 | 透過率 | 吸収率 | 反射率 | 透過率 | 吸収率 |
| 太陽光 | 22.1 | 33.6 | 44.3 | 6.6 | 75.1 | 18.2 |
| 日射模擬装置光源 | 19.5 | 39.5 | 41.0 | 6.8 | 77.8 | 15.3 |

単位: [%]

表-5 組み合わせ構成の光学特性

Table 5 Optical Characteristics of Combination of Component

| | 各層の総合吸収率 | | | | 総合吸収率の和 | 総合透過率 | 総合反射率 |
|--------|----------|------|-------|------|---------|-------|-------|
| | 1層目 | 2層目 | 3層目 | 4層目 | | | |
| | LE10 | FL10 | ブラインド | FL10 | | | |
| 太陽光 | 51.3 | 10.4 | 12.6 | 0.1 | 74.5 | 0.5 | 27.4 |
| 日射模擬装置 | 49.0 | 10.1 | 15.0 | 0.1 | 74.2 | 0.7 | 27.1 |

単位：[%]

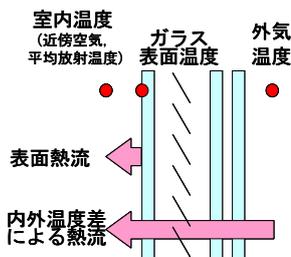


図-6 熱貫流率測定

Fig.6 Measurement of Overall heat transfer coefficient

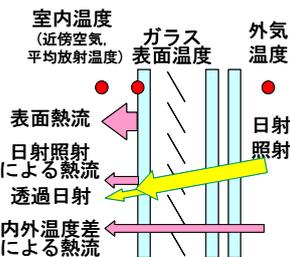


図-7 日射熱取得率測定

Fig.7 Measurement of Solar Heat Gain Factor

3.2.1 対流熱伝達率の測定方法

室内側ガラス表面熱流の対流分の算出にあたって、室内気流の影響を考慮するため、面状発熱体による対流熱伝達率 h_{ic} の計測を行った(図-8)。面状発熱体を窓面位置に設置し、投入電力量と表面温度、表面近傍空気温度を計測する。面状発熱体の裏面を断熱し、投入電力量 Q_H を表面からの発熱量とする。表面発熱量から放射熱伝達量を減じて対流熱伝達量を求め、表面温度と近傍空気温度の温度差から対流熱伝達率を求める。

$$h_{ic} = (Q_H - \epsilon_p \cdot \epsilon_{room} \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_r^4)) / (T_s - T_i)$$

3.2.2 放射熱伝達の測定方法

室内側ガラス表面での熱流の放射分の算出に用いる実験室内の平均放射温度 T_r は、窓面位置から等立体角射影方式魚眼レンズにより室内を撮影して形態係数を求め(図-9)、天井面・床面の各温度計測値を形態係数により加重平均して求めた。

3.3 実験における窓高さの補正方法

空気流通時の微小単位高さ当たりの温度上昇を、空気流通層への放熱量と風量で表すと表-7 式(1)のようになる。本実験では実際の窓高さと実験の窓高さに縮率があるため、空気流通層の風量を高さの縮率に比例させて風量 V を減じ、単位高さ当たりの温度上昇 ΔT を合わせ、空気流通層内空気の垂直温度分布を再現することとした(図-10)。

表-6 熱貫流率、日射熱取得率の求め方

Table 6 Calculation of Overall Heat Transfer Coefficient and Solar Heat Gain Factor

| Heat Gain Factor | | |
|------------------|---------------------|--|
| 熱貫流率 | [W/m ²] | $U = Q_i / (T_o - T_i)$ |
| 日射熱取得率 | [-] | $\eta = (Q_i - U \cdot (T_o - T_i)) / I_o + I_t / I_o$ |
| ガラス表面熱流 | [W/m ²] | $Q_i = Q_c + Q_r$ |
| 対流熱伝達 | [W/m ²] | $Q_c = h_{ic} \times (T_s - T_i)$ |
| 放射熱伝達 | [W/m ²] | $Q_r = \epsilon_g \times \epsilon_{room} \times \sigma \times (T_s^4 - T_r^4)$ |

- I_o, I_t [W/m²] 室外入射日射, 室内透過日射
- h_{ic}, h_{ir} [W/m²K] ガラス室内側表面对流熱伝達率, 放射熱伝達率
- Q_c, Q_r [W/m²] 対流熱伝達量, 放射熱伝達量
- Q_H [W/m²] 面状発熱体発熱量(=電力量)
- ϵ_g, ϵ_p [-] ガラス面放射率(0.84), 面状発熱体放射率(0.90)
- ϵ_{room} [-] 室内平均放射率(=0.90)
- σ [-] ステファンボルツマン定数
- T_s [K] 窓表面温度(15点平均), 面状発熱体表面温度
- T_i [K] ガラス面近傍空気温度(窓面から50mm, 15点平均)
- T_r [K] 平均放射温度(床・天井面を加重平均)

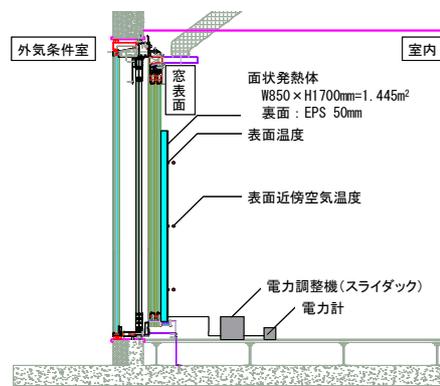


図-8 室内表面熱伝達率計測の概要

Fig.8 Measurement of heat-transfer coefficient of indoor surface

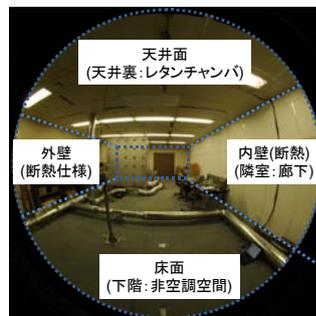


図-9 魚眼レンズによる室内形態係数の測定

Fig.9 Measurement of Indoor Angle Factor by Fisheye Lens

表-7 空気流通時の単位高さ当たりの温度上昇と熱量

Table 7 Temperature Increase and Heat Flux per Unit Height

| | |
|------------------------------------|---|
| 空気流通時の単位高さ当たりの温度上昇 | $\Delta T = \frac{Q \cdot w \cdot \Delta h}{C_p \rho \cdot V} \dots(1)$ |
| 空気流通時の単位高さ当たりのガラス・ブラインドから空気流通層への熱量 | $Q = \frac{C_p \rho \cdot V \cdot \Delta T}{w \cdot \Delta h} \dots(2)$ |

- Q [W/m²] ガラス・ブラインドから空気流通層への熱量
- Δh [m] 窓の微小単位高さ
- ΔT [K] 微小単位高さにおける温度上昇
- w [m] 窓幅
- d [m] 空気流通層ガラス間距離
- V [m³/s] エアフロー風量
- C_p [J/kgK] 比熱
- ρ [kg/m³] 比重

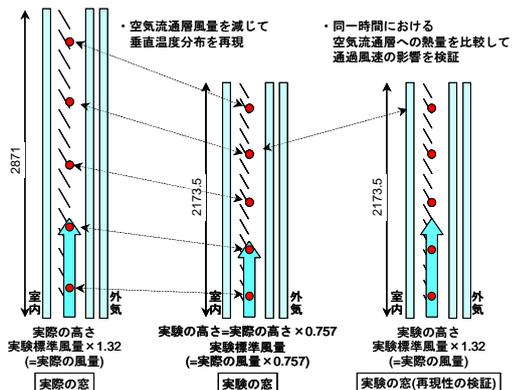


図-10 垂直温度分布の再現方法と再現性の検証方法
Fig.10 Experimental Reproduction of Window Height

表-8 日射量と室内側透過率
Table 8 Solar Irradiance and Transmittance

| | 左サッシ | 右サッシ(参考値) |
|---------------------------|------------------|------------------|
| 外気側日射量[W/m ²] | 741.0 (1065~369) | 576.5 (1022~113) |
| 室内側日射量[W/m ²] | 14.6 (28.4~7.2) | 10.5 (17.8~4.0) |
| 室内側透過率[%] | 2.0 | 1.8 |

※窓面49点の平均値および(最大~最小)を示す

4. 実験結果

4.1 日射量

アウターガラスの模擬日射に対する透過率を検証した結果、太陽光で29%、模擬日射で27%となり、組み合わせ構成時の総合吸収率に対する影響は微小であるが、日射熱取得率の実験値は小さめに評価される傾向がある。

屋外側および室内側の日射分布を測定し、室内側への透過日射量を算出した(表-8)。左サッシを詳細な測定の対象として均等な日射照射を重視したため、左右の照射量と分布に差異がある。日射透過率は2.0%であり、前述のJISによる算出値(表-5)より大きめの値を示した。透過率が高くなった要因としては、平行光でないことが考えられる。

4.2 対流熱伝達率・放射熱伝達率

ガラス表面の熱伝達は以下の通りとなった。

対流熱伝達率: 3.79 [W/m²K]

放射熱伝達率: 4.32~4.80 [W/m²K] (ケース毎に算出)

4.3 垂直温度分布と再現方法の検証

空気流通層内の垂直温度分布を図-11に示す。

垂直温度分布の再現のために空気流通の風量を減じているが、通過風速によってガラス・ブラインド表面での熱伝達率が異なり、日射吸収熱の空気流通層への放熱に対する影響が考えられるため、表-7の式(2)に基づき放熱量を検証した。①実際の風量における温度

と、②実験の風量における温度、さらに比較を容易にするため①の高さ方向を0.757倍してプロットしたものを図-11に示す。Case1・2, Case21・22以外では全般的に垂直温度分布の再現性が確認されている。再現性を確認できなかったCase1・2では室内外の温度差が小さく実験精度の確保が困難であったこと、Case21・22では冬期条件であるため下から上への明確な空気流れが形成されなかったことが要因として考えられる。

4.4 熱貫流率・日射熱取得率

標準風量における熱貫流率と、日射熱取得率を表-9に示す。いずれも良好な熱性能値であることが確認された。なお夏期の熱貫流率の測定では設計外気温度(34.4℃)での測定誤差が懸念されるため50℃条件での値とした。

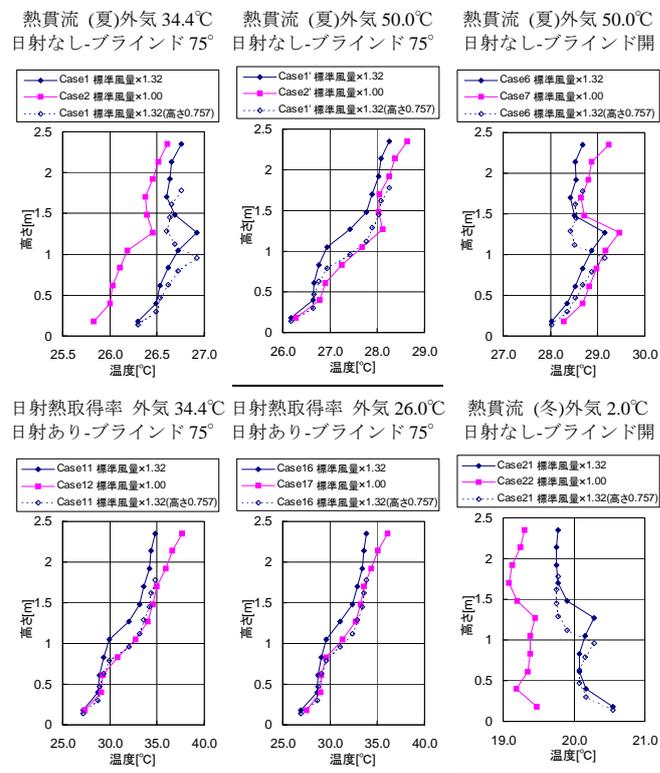


図-11 垂直温度分布および再現方法の検証
Fig.11 Vertical Temperature Distribution and Verification of Reproduction Method

表-9 標準風量における熱貫流率および日射熱取得率
Table 9 Overall heat transfer coefficient and Solar Heat Gain Factor on Standard Airflow Volume

| | 熱貫流率 [W/m ² K] | | 日射熱取得率 [-] |
|-------|---------------------------|----------|------------|
| 季節 | 夏 (50℃) | 冬 (2.0℃) | 夏 (34.4℃) |
| ブラインド | 閉 | 開 | 閉 |
| 性能値 | 0.419 | 0.810 | 0.063 |

4.5 エアフロー風量と熱性能値の関係

図-12, 13に示すように、エアフロー風量の増加に伴う熱貫流率・日射熱取得率の向上が確認された。標準風量ではエアフローなしに比べて、断熱性能(熱貫流率)で約1.4~2.3倍、日射遮蔽性能(日射熱取得率)で約1.4倍の性能を得ることができる。なお外気温度34.4℃での熱貫流率の測定値は風量1.0と1.32が逆転しており、測定誤差によるものと思われる。

4.6 ブラインドの有無および夏期・冬期の違い

夏期条件の熱貫流率は、ブラインド無し(開)に比べ、有り(75°)の方がよく、ブラインドの空気流通層の仕切り効果により空気流通層がインナー側とアウター側に分割されて、室内から空気流通層に導入された空気がブラインドのインナー側空間を上昇し、窓表面温度が室内温度に近くなる効果があるためと考えられる。

またブラインド無しの夏期と冬期を比較すると、夏期は冬期に比べて熱貫流率がよい結果となっている。冬期は空気流通層内でのアウター側の下降気流とエアフロー気流により上下温度分布が小さくなるのに対し、夏期はアウター側の上昇気流とエアフロー気流により上下温度分布が形成されやすく、空気流通層上部の熱溜まりを高め温度で効率的に排気できるためと考えられる。

4.7 実験条件(外気温度・日射量)の検証

外気温度および日射量の実験条件が、熱貫流率および日射熱取得率の測定結果に及ぼす影響を検証した。

熱貫流率の測定においては、外気温度34.4℃および50℃の条件での熱貫流率は、ほぼ同等の値となった(図-12)。

日射熱取得率の測定においては、左サッシ・右サッシでの日射照射量が異なるものの、日射熱取得率に大きな差異はみられなかった。また外気温度を設計条件とした34.4℃の場合と、熱貫流による熱流を抑制した26.0℃の場合も同等の値となった(図-13)。

以上のことから、空気流通層内の気流性状に対して

エアフローが支配的であれば、設計条件と若干異なる日射・外気温度条件でも、熱性能の計測値への影響は小さいことが分かった。

5. まとめ

実験室における熱的性能試験の手法を示し、高性能Low-εガラスを外ガラスに用いたエアフローウインドウについて、熱性能値とエアフロー風量との相関を確認した。また、運用時にエアフロー風量を低減しつつ、窓面負荷を抑制し実際温熱環境を維持するための知見を得た。

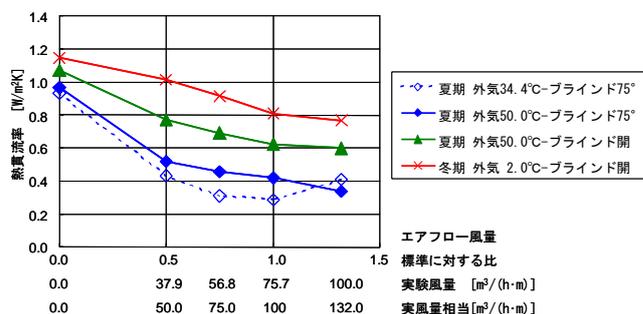


図-12 外気条件・ブラインド条件による熱貫流率の差異
Fig.12 Differences of Overall Heat Transfer Coefficient by Outdoor Air Condition and Blind Condition

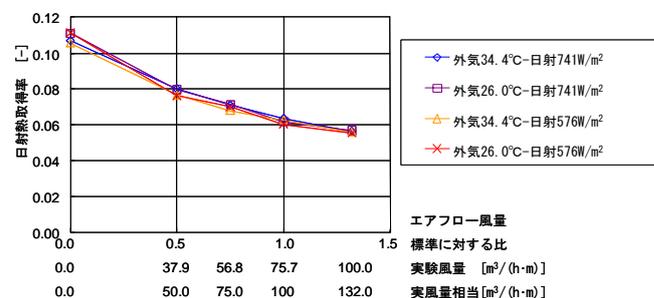


図-13 外気・日射条件による日射熱取得率の差異
Fig.13 Differences of Shading Coefficient by Outdoor Air Condition and Blind Condition

参考文献

1) 佐々木 邦治「窓の性能(3) エアフローウインドウ(空気流通窓)」, 空気調和・衛生工学, 2001.10