風圧力と浮力が同時に作用する建物における通風特性

自然通風に関する実測研究 その1

VENTILATION CHARACTERISTICS OF A BUILDING WHICH ARE SIMULTANEOUSLY
EFFECTED BY WIND PRESSURE AND BUOYANCY POWERS

Measurement survey on natural ventilation Part 1

細井昭憲*, 成田樹昭**, 須永修通***

Akinori HOSOI, Shigeaki NARITA and Nobuyuki SUNAGA

This paper describes characteristics of natural ventilation in the case that wind pressure and buoyancy powers effect simultaneously. Measurements of natural ventilation were performed in the building with hybrid ventilation system, and the ventilation characteristic was clarified. The measurement results were verified by the ventilation model. This basic ventilation model is characterized by simultaneous calculation of ventilation and indoor temperature. Experiment results of the ventilation characteristics were inspected by this model. By using the static analysis of measurements and the result from the ventilation model, we examined the weather conditions suitable for natural ventilation and the number of annual available time to use natural ventilation.

Keyword : Hybrid Ventilation, Natural Ventilation, Wind Pressure Power, Buoyancy Power, Measurement

ハイブリッド換気, 自然換気, 風圧力, 浮力, 実測

1. はじめに

近年の地球環境問題の顕在化に伴い, 省エネルギーと室内の快適性を両立させる新たな手法として, 機械空調と自然通風を組み合わせ, 両者を最適に制御する空調システムが着目されつつある。上記システムを導入した建物事例, 研究例¹⁾も増えつつあり, 今後の有力な手法の一つになると思われる。

建物の自然通風については, 古くは石原, 前田²⁾による知見があり, それらが現象の要因と結果の関連性を構造的に示すものであるが故に, CFD 技術が浸透した現在においても設計段階での基礎的検討に広く用いられている。近年においては, 赤林³⁾が開口部の開口条件や風向, 室内外障害物の変化が風圧係数, 換気回数に与える影響を実測及び風洞実験により明らかにした。清田⁴⁾は有風時の開口部圧力損失は無風時と異なることに着目し, 風洞実験により壁面近傍気流性状が開口部圧力損失に与える影響を明らかにした。さらに加藤⁵⁾は新たな通風量算出モデルとしてパワーバランスモデルを提唱した。上述のモデルは室内気流の動圧の保存に着目したモデルであり, この問題に対して越智⁶⁾は, 干渉係数を用いる方法により, 通風量算出を行った。

一方, 現実の建物における自然通風は, 非定常な外部気象条件及び内部条件の影響を大きく受けるため, 実測により定量的な解析を

行うことが難しく, 研究例は少ない。特に, 自然通風の主たる適用対象は住宅や工場であったため, 一般の事務室での通風利用を想定した知見の集積は不十分である。今後, 自然通風の適用範囲を拡大し, その利点を最大に享受するためには, 実際にシステムが運用された状態を実測し, 通風特性の解析を行うことが不可欠である。

そこで本研究はまず, 自然通風と機械空調を併用し, 一般事務室を有する建物を対象に実測を行い, その通風性能を明らかにした。次に, 実測結果の検証を目的として, 風圧力と浮力が同時に作用する場合の基本的な通風モデルを用いて通風特性の試算を行った。また, 実測によって得られた通風性能に関する統計的解析結果及び通風モデルを用いて, 通風可能な外部条件の検討を行い, 年間の通風利用可能な時間数を算出した。

2. 実測建物

表1, 図1に建物の概要及び自然通風システムの概念を示す。所在地は神奈川県厚木市で, 敷地は西側に開かれており, 西以外の三方は小高い山に囲まれている。本建物は研究施設であり, 事務棟, 3層吹抜けのアトリウム, 実験棟に分かれる。事務室内は無柱空間となっており, 個人スペースはFL+1200のブースによって仕切られている。事務室はアトリウムに直接開放されていて, 間仕切りはない。

* ㈱フジタ技術センター

** ㈱フジタ技術センター 工博

*** 東京都立大学大学院工学研究科建築学専攻 助教授・工博

Fujita Corp. Technology Development Division

Fujita Corp. Technology Development Division, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Graduate School of Eng., Tokyo Metropolitan Univ., Dr. Eng.

表1 実測建物概要

所在地	神奈川県厚木市小野
用途	研究所
建築面積	28,500 m ²
延床面積	24,148 m ²
構成	事務棟 : 6,747 m ² 地上3F 実験棟 : 16,228 m ² 地上3F地下2F アトリウム : 1,173 m ²

事務棟西面の FIX 窓上部の跳ね出し窓が、自然通風取入れ開口 (1350mmW×550mmH、以降「通風開口面」)、アトリウム上部の排煙窓が排気口である。各開口部の内側には防虫網が張られている。風圧力と浮力により、跳ね出し窓から取入れた自然風は、事務室内を通過し、アトリウム上部の排煙窓より排出される。

事務棟の2、3階 (合計約1,700m²) が自然通風の適用範囲で、室内環境の測定は2階を対象とした。図2に2階平面図を示す。空調時間帯は平日の8時～19時であり、自然通風時には該当エリアの空調機や余剰排気ファンは全て停止される。

3. 計測方法

計測期間は2000年5月～6月である。表2に測定内容を、図1～図3に測定器の設置状況を示す。

通風開口面の通過風速は1スパン当たり1箇所の計6点で計測し、内1開口 (図2△点) を15点で詳細に計測した。同時に、詳細測定

図1 自然通風システム概念図

ポイントに隣接する開口の上下2点に3次元超音波風向風速計を設置し、通風開口面内の風向風速を計測した。(注1 補図1参照)

室内温熱環境については、温湿度、グローブ温度、風速を計測した。設置高さはブース内とその上部に相当するFL+1100とFL+1500とした。(図3参照)

外部気象条件は外気温湿度、風向風速、雨量、日射量を計測した。風向風速計は3杯式で、塔屋に5.0mのポールを立て設置 (G.L.+25m) した。また、無指向性の熱線風速計を同位置に設置し、併用した。(図1、図3参照) なお、風速計が剥離領域外にあることを、事前のCFD解析により確認している。図4に2000年5月～6月の風配図を示す。外部風向は、測定期間中殆どの時間において、通風開口面に対し約45°斜め前方方向であった。測定間隔は、通風開口面の通過風速が1秒、その他の項目は1分であり、以降の解析において平均時間は全て10分間とした。実測は2000年7月以降も断続的に行っている。

表2 測定内容

測定項目	測定機器	測定間隔	測定場所
通風開口面通過風速	多点風速計 (無指向性、熱線式)	1sec.	通風開口面 (1点/1スパン、図2参照)
通風開口面風向風速	超音波風向風速計	1sec.	通風開口面 (上下2点、補図1参照)
室内温湿度	熱電対 (温度)、静電容量式 (湿度)	1min.	計9点 (図2参照)
室内気流速度	無指向性、熱線式風速計	1min.	計5点 (図2参照)
室内放射温度	グローブ球 (120φ)	1min.	計9点 (図2参照)
アトリウム上下温度分布	熱電対	1min.	上下9点×5ポイント (図1、図2参照)
外部温湿度	熱電対 (温度)、静電容量式 (湿度)	1min.	実測敷地内 (木陰、日射遮蔽カバー付)
外部風向風速	3杯式風向風速計、熱線式風速計	1min.	塔屋 (図1、図3参照)
日射量	ネオ日射計、積算アダプター	10min.	塔屋 (本論文の解析には用いない)
雨量	転倒杓式	1min.	塔屋 (本論文の解析には用いない)

図2 測定位置及び測定内容

図3 測定器設置状況

図4 計測期間中の風配図

4. 通風特性

4.1 通風開口面風速分布

通風開口面の代表風速計測点を決定するために、1 開口面の風速分布を実測した。

図5は、詳細測定した通風開口面（図2△点）における通過風速分布の例である。風向W（西、以後方位はアルファベット標記）は外部風が跳ね出し窓に沿って流入し、開口上部の風速が相対的に高くなるなど、風向により風速分布は異なる。図6に15点の平均風速と中央測定点（1点）の風速の関係を示す。風向により通風開口面の風速分布は異なるものの、本建物の開口では中央の1点で平均風速を代表できることがわかった。以降の通風開口面の通過風速は、図2に示した各6スパン中央1点の計測データの平均値である。^{注1)}

4.2 通風開口面風速比

通風の計画や制御を行う際に、外部風速から通風量や室内風速を推定することは重要である。通風開口面の通過風速を外部風速で基準化して風速比として表し、外部風速との関係を明らかにした。

図7に主風向の場合の通風経路を示す。(a)はアトリウム上部両側の排気口を開放した場合、(b)は風下側の排気口のみ開放する場合、(c)は風上側の排気口のみ開放し、遮風板の誘引効果により排気を行う場合を表す。通常は(a)の状態を使用するが、試験的に(b)、(c)の状態でも計測を行った。

図7 窓の開閉状態と通風経路

図8 開閉状態 (a) の風速比および計算値

図9 開閉状態 (a) 風向Eの風速比

図10 アトリウム温度と外部気象条件の系時変動

図11 開閉状態 (b) (c) の風速比

図5 自然通風開口面の風速分布

図6 平均風速と中央風速

開閉状態 (a) 図8は、計測期間の主風向SW～SSW および風向 $W \leq \pm 45^\circ$ における風速比の実測結果である。3 杯式風速計の測定レンジが0.5m/s以上であったので、主風向の低風速域は熱線風速計のデータにより補完した。図より風速比は一定ではなく、外部風速が低い領域で上昇し、外部風速が3.0m/s以上になると一定値に近づく傾向がある。これは、外部風速が低いほど室内外温度差が大きくなり、浮力による換気量が増加するためである。外部風速の増大と

図 12 通風モデル

図 13 浮力と風圧力

共に相対的に風圧力が支配的となり、風速比は一定値に近づく。また、風向 $W \leq \pm 45^\circ$ の風速比が主風向とほぼ同じ値となること、建物の対称性から風向 NW~NNW の風速比も主風向と同じ値が得られると推察されることから、W 方向（建物の正面方向）の外部風において風速比が大きく異なることはないと考えられる。

一方、図 9 は風向 E（背後方向）の風速比である。実測結果から通風経路を明確にすることはできなかったが、5 月 29 日（風向 E）と 5 月 30 日（主風向）、及び終日機械空調を行った 6 月 6 日のアトリウム温度、及び外気温度、外部風速の系時変動を示す図 10 より、以下の現象が推察される。5 月 29 日は 5 月 30 日と比べて外部風速が低く、外気温度はやや高いにもかかわらずアトリウム上部の温度が低い。これは風向 E では、アトリウム東側開口から外部風が直接アトリウム上部に侵入するためと考えられる。この結果アトリウムの上下温度差および浮力が小さくなる。さらに通風開口面が風下となることから、風向 E は主風向に比べ風速比がやや小さくなったと考えられる。また、風向 E は通風時のみ 2FL レベルの温度が上昇し、3FL レベルとほぼ同じ温度になることから、上下方向の空気の混合が活発な状態にあると推察される。

閉閉状態 (b) (c) 図 11 に主風向における風速比の実測結果を示す。外部風速の測定範囲が異なるものの、(b) (c) 共に同様の曲線上に分布している。外部風速が低い領域で風速比が増加する傾向は (a) と一致し、その大きさは (a) の約 70% となった。また、(c) においても (b) と同等の風速比が得られており、遮風板による換気効果が確認できた。なお、図 8、図 11 には計算結果も示されているが、これについては次節で述べる。

4.3 基礎式による風速比の検証

本自然通風システムの主たる自然換気の駆動力である風圧力と浮力を考慮した換気の基本式をもとに、通風開口面の風速比の実測結果を検証する。風上開口を通過した気流が動圧を保存したまま風下開口に達する場合は、加藤ら⁹⁾、越智ら⁶⁾により従来の通風量算出モデルの誤差が指摘されている。しかし本システムにおいては、風上開口から流入した噴流が開口の約 40 倍の断面積をもつアトリウムに到達して運動エネルギーを失い、かつ開口部からの噴流の減衰方向距離が十分に長いので動圧が保存されず、従来の通風量算出モデルが適用できると考えた。

まず、本建物を図 12 のようにモデル化する。^{注 2)} 通風時の室内の熱収支を以下の式で表す。記号は末尾記号表に示す。

$$Hr_n + \Delta t \cdot Cp(T_{i,n} - T_o)Q_n + \Delta t = Cp \cdot \rho_o \cdot Vm_n \cdot \Delta T \quad (1)$$

(1) 式の Hr_n は、内部発熱量、日射取得熱量、貫流熱取得（損失）量、蓄放熱量を総計した室内顕熱取得量とする。これを微分方程式として解き、室内平均温度 $T_{i,n}$ について整理すれば、^{注 2)}

$$T_{i,n} = T1 + T_o - (T1 - T_s + T_o) e^{\left(-\frac{Q}{Vm\rho}\right)} \quad T_s: \text{初期温度 (K)} \quad (2)$$

次に、図 12 ポイント①の外部の圧力を基準 ($P_{o,1} = 0$) とすれば、各ポイントの外部の圧力 $P_{o,n}$ は、

$$P_{o,n} = P_{o,1} - h_n \cdot g \cdot \rho_o + C_n \cdot \rho_o \cdot \frac{V_{o,n}^2}{2} \quad (3)$$

室内の圧力 $P_{i,n}$ は、

$$P_{i,n} = P_{i,1} - h_n \cdot g \cdot \rho_{i,n} \quad (4)$$

通風量 Q_n は室内外の圧力差を用いて以下の式で表される。

$$Q_n = \alpha_n \cdot A_n \sqrt{2\rho_{i,n}(P_{o,n} - P_{i,n})} \quad (5)$$

ここで $\rho_{i,n}$ を図 12 のように $\rho_{i,1} = \rho_{i,2}$ と近似し、 $\rho_{i,3}$ は通風時のアトリウム頂部温度実測値の平均から算出される値を用いる。本建物では主風向の場合、各通風開口面における風の流出入方向が明らかであるので、通風量 Q_n について以下の式が成り立つ。

$$Q_{1,1} + Q_{2,2} = Q_n \quad (6)$$

(2) 式を用いて (4) 式の $\rho_{i,n}$ を計算し、同時に (3), (4), (5) 式を用いて (6) 式が成り立つように未知数 $P_{i,1}$ に関する収束計算を行い、通風量 Q_n を算出する。

次に Q_n を通風開口面積で除し、風速比を計算する。

$$\frac{v_n}{V_{o,n}} = \frac{Q_n}{V_{o,n} \cdot \rho_{i,n} \cdot A_n} \quad \text{より、} \quad (7)$$

$$\frac{v_n}{V_{o,n}} = \frac{1}{V_{o,n}} \cdot \alpha_n \cdot \frac{1}{\rho_{i,n}} \sqrt{2\rho_{i,n}(P_{o,n} - P_{i,n})}$$

一方、図 8 の実測結果で示したように風速比は外部風速の増加に伴い減少し、一定値に近づく。この一定値は、外部風速が非常に速く、室内外の温度差及び浮力が無視できる場合の風速比であるから、

(7) 式において、 $V_o = \infty$ 、かつ $\rho_{i,n} = \rho_o$ より、

$$\frac{v_n}{V_o} = \alpha_n \cdot C_n^{0.5} = \text{const.} \quad (8)$$

実測結果との比較のため、前述の図 8 及び図 11 に計算結果を曲線で示した。図から、実測結果と計算結果の特性が一致することがわかる。図 8 の計算結果を比較すると、風向 $W \leq \pm 45^\circ$ の方が、風圧係数の違いから風圧による換気力がやや増加し、主風向より風速比の平均値が約 0.02 大きくなる。しかし、両者はほぼ同じ値となり、

実測結果と一致する。なお、清田⁴⁾は、外部風速が速いほど開口部近傍の下降気流が強くなり、開口部圧力損失係数が増大することを示した。その結果から、外部風速が速くなるに従い風速比が減少することが予想されるが、本実測においてその傾向は明確でない。これは、本建物の開口部が跳ね出し窓であるため、上述の下降気流の影響が弱いことが一因と推察される。

図13はポイント①における外部風速に対する浮力と風圧力の変化を表したものである。浮力は(5)式から計算される $P_{i,1}$ と、風圧力のみ働く場合(すなわち $\rho_{i,n} = \rho_o$)の室内圧力の差として算出した。無風時の浮力は外部風速3.0m/sの風圧力と同等であり、外部風速3.0m/sまでは風圧力より浮力が大きい。従って外部風速が低い領域では外部風速と通風量は直線的に比例しない。通風開口面の通過風速から推定されるポイント①の通風量^{注4)}は、室容積約2200m³に対し、外部風速0.5m/sでは換気回数約26回/h、外部風速3.0m/sでは同約38回/hとなった。

4.4 室内風速及び風速比

本節以降図2に示すN, C, S各ゾーンのペリメータをP, インテリアをIとし、例えばペリメータのNゾーンをP-Nと標記する。

図14に、開口部通過風速から推定される通風量と、P部、I部のブース上部風速(FL+1500)の相関を示す。室内風速と通風量(図では換気回数として示す。)には比例関係が認められ、文献2)の換気量と室内気流の実測結果と一致する。図より、I部風速はP部風速の約70%に減衰する。

次に、実測事務室内はブースで仕切られており、温熱環境の観点からはブース内の風速(FL+1100)が重要となる。図15は、Nゾーンの実測データを用いて作成したブース上部と内部の風速の頻度分布及びブース上部風速で基準化したブース内風速の頻度分布である。基準化ブース内風速の平均値は0.88、標準偏差0.09となった。同頻度分布を正規分布にあてはめると、有為水準5%で適合した。そこで上側確率10%点を算出すると0.98であった。

図16に外部風速とブース上部風速比の関係を示す。図14に示したように通風開口面通過風速と室内風速には比例関係があるので、外部風速が低い領域では浮力の影響によりブース上部風速比は増大する。^{注5)} 図中の曲線はブース内の風速が1.0m/sとなる境界で、実線は図15の平均値の場合、点線は上側確率10%、すなわち危険率10%の場合を表す。自然風のような非定常風の、好まれる気流速度については様々な報告があり、^{8)~10)}気温が30℃と高温の場合でも上限は1.0m/s~1.5m/s程度である。また、通常の事務作業を妨げない限界としても上記風速が目安となろう。図からP部は、外部風速が2.0m/s以上でブース内風速が1.0m/sを超える危険性があるものの、平均的には外部風速6.0m/s程度まで通風を利用できると言える。

図17 Hrの分布

図14 換気量と室内風速の相関

図15 ブース内外の風速分布

図16 室内通過風速比

5. 通風時の室内温度

通風時の室内平均温度は(2)式によって表される。本建物はS造で熱容量が小さく、通風時に室内温度が外気温度に追従^{注6)}するので、(2)式において定常状態を仮定し、室内平均温度 $T_{i,n}$ を

$$T_{i,n} = Tl + To = \frac{Hr_{,n}}{Cp \cdot Q_{,n}} + To \quad (9)$$

と表す。 Tl は室内外温度差を表し、通風量 $Q_{,n}$ の逆数に比例する。

(9)式の室内顕熱取得量 $Hr_{,n}$ は、通常設計時に行う負荷計算により算定可能な値であるが、本建物はオープンタイプのアトリウムを有するため、アトリウムと事務空間の負荷を正確に算出できない。そこで、室内温度、外気温度、通風量の実測値を用いて(9)式から $Hr_{,n}$ を推定すると、図17のような分布が得られた。 $Hr_{,n}$ の値として平均値47.5W/m²を採用し、図17の分布を仮定した場合の $T_{i,n}$ の誤差分布を図18に示す。外部風速が低く、通風量が少ない場合、最大

図18 T_i の誤差分布

図 19 室内各測定点と平均室内温度

±1.5°Cの誤差が生じる可能性がある。図中の太線で表す分布は、外部風速の発生頻度を考慮した T_{in} の誤差分布であり、危険率 10%で -1.2°C~+0.3°C以内の誤差となる。

一方、本建物は外部風速が低い場合においても大量の通風量が得られるものの、通風時には若干の室内温度分布が生じる。図 19 に室内の測定点 6 点の平均温度と各測定点の温度の関係を示す。図のように通風経路に対し直角方向（建物の南北軸）の温度分布はほとんどないが、室内熱取得のため通風経路に沿って平均値に対して最大 ±0.5°C 程度の温度差が生じた。

6. 自然通風の適用外気条件及び利用時間数

自然通風時の室内風速、室内温度に関する実測、計算結果をもとに、本建物における主風向の場合の通風が適用可能な外部条件を検討した。まず、(2) 式及び (5) 式 (6) 式を用いて、外気温度、外部風速から室内平均温度、通風開口面の通過風速を計算する。次に図 15 及び図 16 の関係を用いて P 部（ペリメータ）、I 部（インテリア）のブース内風速を算出する。次いで図 19 の結果を考慮し、室内平均温度に P 部 -0.5°C、I 部 +0.5°C の補正を行う。

以上の方法で導かれた室内温度、風速を用い、clo 値 0.7、Met 値 1.2、グローブ温度=室内温度、相対湿度 50%として SET* を算出した。結果を図 20 に示す。日本人の温感中立範囲¹¹⁾である 22.0°C<SET* <26.0°Cを、P 部、I 部共に満たすための条件は、外気温度 20.0°Cでは外部風速約 1.0m/s 以下、同 22.0°Cでは 1.5m/s~3.0m/s、24.0°Cでは 3.0m/s 以上である。

以上の方法と標準気象データを用いて、通風時の室内温熱環境を予測し、年間の自然通風が利用可能な時間を検討した。ただし外部風が W 方向（建物の正面方向）の場合は主風向の風圧係数を用いて計算を行った。E 方向（背後方向）は、図 9 のプロット点に近似曲線を引き、これを基に通風開口面の通過風速を算出した。例えば表 3 は、5 月から 10 月の東京の標準気象データを用いて P 部、I 部共に 22.0°C<SET* <26.0°C（条件 1¹¹⁾）及び 20.0°C<SET* <30.0°C（条件 2¹²⁾）を満たす時間数を月別に算出した結果である。SET* の算出条件は室内相対湿度=外気相対湿度とした。通風適用時間帯を 8 時から 19 時とし、土日は除外した。また、ブース内の風速を考慮し、4.4 節に示した外部風速が 6.0m/s 以上となる場合も除外した。合計の欄に括弧で示す数字は、期間空調時間数に対する自然通風の条件を満たす時間の割合である。条件 2 は条件 1 に比べて特に 7 月と 8

図 20 外部風速、外気温度と室内SET*
(左：ペリメーター 右：インテリア)

表 3 月別自然通風利用可能時間数

	5月	6月	7月	8月	9月	10月	合計
22<SET* <26	36	78	43	40	52	16	265 (18.4%)
20<SET* <30	77	172	192	203	180	43	867 (60.2%)

単位：時間 (h)

月の利用時間が多くなり、合計では約 3 倍の利用時間が見込まれた。通風時の室内快適域の設定が通風利用時間に大きく影響することがわかった。筆者らが行った本建物の通風時室内快適性アンケート調査からは、通風可能な室内温熱環境はオフィスを想定した快適範囲より広いとの結果が得られている。¹³⁾ また、文献 8) によれば、通風時の好まれる気流は 0.4m/s~1.5m/s と考えられ、機械空調を想定した風速域 (0.5m/s 以下) では、通風の快適性が損なわれる可能性がある。自然通風を最大限に利用するためには、快適性の観点から適用条件を決定する必要があり、今後の検討課題である。

7. まとめ

- 1) 自然通風と機械空調を併用する建物の実測結果より、風圧力と浮力を同時に受ける場合の自然通風量は外部風速と単純な比例関係になく、外部風速が低い場合は浮力によって風速比が増加することがわかった。
- 2) 実測結果の検証を目的として通風モデルによる試算を行った結果、風速比の計算結果と実測値はほぼ一致した。また、風速比は外部風速が速い場合に (8) 式で表される一定値に近づくこと、本建物の無風時の浮力は外部風速 3.0m/s の風圧力と同等であることがわかった。
- 3) 通風量と室内風速には比例関係があることが確認され、室内の風速比は、通風開口面の風速比と同様の傾向があることがわかった。
- 4) 通風可能な外部風速の条件は、個人ブース内部の風速を考慮することで利用範囲を拡大できる。本建物では外部風速約 6.0m/s まで利用可能と考えられた。
- 5) (9) 式により室内平均温度を算出する場合、室内顕熱取得量に起因する誤差が生じる。実測データから推定した平均値を用いた場合の誤差は、危険率 10%で -1.2°C~+0.3°C以内となった。
- 6) 通風の基本モデル及び本建物の通風特性を利用して、自然通風を快適に利用できる外部条件を検討した。その結果、例えば外気温度 20.0°Cでは外部風速 0.5m/s~1.0m/s で利用可能なことがわかった。また、通風利用可能な時間数は、室内の快適域の設定によって約 3 倍もの違いが生じることがわかった。

記号表

n : ポイント①～④を表す添字	t : 時間 (s)
Hr : 室内顕熱取得量 (J/s)	Cp : 空気定圧比熱 (J/(kg·K))
Ti : 室内空気絶対温度 (K)	To : 外気絶対温度 (K)
Q : 換気量 (kg/s)	g : 重力加速度 (m/s ²)
Vm : 室内体積 (m ³)	C : 風圧係数 (-)
α : 開口部流量係数 (-)	A : 開口面面積 (m ²)
ρ_o : 外気質量密度 (kg/m ³)	ρ_i : 室内空気質量密度 (kg/m ³)
h : 開口面間垂直距離 (m)	ho : G.L.からの高さ (m)
Vo : 外部風速 (m/s)	v : 通風開口面通過風速 (m/s)

注 1)

西側通風開口面はフラットかつ、付近に障害物となる建物が無いため、他の通風開口面においても同様の傾向があると考えた。なお、風上側開口は同一開口面内において風圧変動により流入と流出が生じるとの報告⁹⁾がある。補足図1は超音波風向風速計により計測した測定期間中の開口面内の気流の出入頻度分布である。X軸が正は流入、負は流出を表す。流出は流入頻度の約3%と少ないため、誤差を考慮しないものとした。

補足図1 通風開口面の気流の出入り

注 2)

$(Q/\rho_o \cdot Vm)dt = dT/(T1-Td)$
 ただし、 $T1 = Hr/(Cp \cdot Q)$ 、 $Td = Tin - To$ これを積分すると、
 $(-Q/\rho_o \cdot Vm)t = \ln(T1-Td) + \ln C$ C : 積分定数
 $t=0$ で $Tin = Ts$ とすれば、 $C = 1/(T1-Td)$

注 3)

各パラメーターは文献 14) を参考に決定。ただし C_{s3} は事前の気流シミュレーションにより決定した。 Hr_{n0} は 5 章の方法で推定し、 $Hr_{n0} = 47.5 \text{ W/m}^2$ 。

注 4)

外部風が通風開口面に対し垂直に流入しない場合、通過風速から単純に通風量を算出できないが、相対的な比較のため通過風速と窓面積の乗算から通風量を算出した。

注 5)

勝田ら⁷⁾は外部風速で室内の平均風速を基準化した値を平均通風率と定義し、風洞実験により風向や開口面積等と通風率の関係を明らかにしている。実験結果のうち、風向が45°の場合を引用すると、本建物の事務室に相当すると考えられる「風上室」の平均通風率は0.24である。模型形状が本建物と異なる等の理由から単純な比較はできないが、外部風速が速い領域ではP部、I部共に上述の実験結果に近づく。

注 6)

補足図2に通風時の室内温度と外気温度の変動例（5月15日）を示す。

補足図2 室内温度と外気温度の変動例 (5/15)

参考文献

- 1) 近本智行, 他 6 名: ボイドを有する高層大学校舎における自然換気ハイブリッド空調システムに関する研究 (その 1, その 2) 空気調和衛生工学会学術講演会論文集, p77-p84, 2000
- 2) 石原正雄: 建築換気設計, 朝倉書店, p211-p218
- 3) 赤林伸一: 通風時の室内外の流場・圧力場に関する実測及び風洞実験, 日本建築学会第1回空気シンポジウム, p9-p16 1990
- 4) 清田誠良: 有風時の模型開口部圧力損失に関する風洞実験, 日本建築学会第1回空気シンポジウム, p37-p44 1990
- 5) 加藤信介: パワーバランスモデルに基づく通風量算出モデル, 日本建築学会第1回空気シンポジウム, p45-p50 1990
- 6) 越智景子, 山中俊夫, 甲谷寿史: 直列配置された複数開口を持つ建物における通風量算定法に関する基礎研究 (その 5, その 6), 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, p635-p638, 2001
- 7) 勝田高司: 自然換気に関する実験的研究, 東京大学生産技術研究所報告, 第一巻, 第二号, 昭和 25 年 8 月
- 8) 磯田憲生: 気流と温冷感, 日本建築学会環境工学委員会熱小委員会第16回熱シンポジウム, p69
- 9) 窪田英樹: 室内気流と体感, 空気調和衛生工学, 第 58 巻, 第 3 号, p33
- 10) 李克欣, 田中雅之, 伊藤尚寛, 祝家燕, 中原信生: 非等温変動気流下における被験者の温冷感心理反応の要因解析と適切な設計条件の選定に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第 489 号, p 57-p66, 1996.11
- 11) 深井一夫, 他 3 名: 新標準有効温度 (SET*) と日本人の温熱感覚に関する実験的研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No.51, 1993
- 12) 西安信: 人体と環境の熱交換, 温熱生理学, p67, 理工学社, 1983
- 13) 細井昭憲, 成田樹昭: 自然通風ハイブリッド空調システムに関する研究 (その 2), 日本建築学会大会学術講演集, D-2, p489, 2001
- 14) 彰国社: 「換気設計」 p49-p65

(2002年3月10日原稿受理, 2002年11月20日採用決定)