空調試運転時を対象とした実測・数値シミュレーションによる 自然換気量評価

流量制御機能を有する給排気口を設置したオフィスビルにおける
自然換気及び空調システムの併用手法に関する研究（第一報）

EVALUATION OF NATURAL VENTILATION RATE BY FIELD MEASUREMENT AND NUMERICAL SIMULATION DURING PRE-ACCEPTANCE PHASE

Hybrid air-conditioning system using natural ventilation in an office building
with flow control inlets and outlets (Part 1)

安永 龍一*, 芦谷 友美**, 白石 靖幸***, 打川 芳恵****, 中村 靖****
*Ryuichi YASUNAGA, Yumi ASHITANI, Yasuyuki SHIRAISHI,
Yoshie UCHIKAWA and Yasushi NAKAMURA*

A numerical model of the natural ventilation rate based on thermal and air flow network analyses was proposed for a building with flow control inlets and outlets. The prediction accuracy of this model was verified through a comparison with field measurements of a hybrid A/C system in an existing office building, which was being broken-in during the pre-acceptance phase. Moreover, the influence of the flow control function at the inlets and outlets on the natural ventilation rate, and the contributions of buoyancy and wind forces to the natural ventilation rate, were clarified by applying this numerical model to a case study. The following results were obtained: 1) The calculation errors in measurements of natural ventilation rate were less than 10%, and so predictions by this model with flow control had sufficient accuracy. 2) Flow control functions provided a considerable contribution to the ventilation rate, in particular the backflow control function of the outlets was influential. 3) Buoyancy force caused by internal heat load also provided a considerable contribution to the ventilation driving force, and the contribution became especially large under calm outdoor conditions.

Keywords : Office building, Natural ventilation, Flow control, Field measurement, CFD analysis, Thermal and air flow network analysis
オフィスビル, 自然換気, 流量制御機能, 実測, CFD 解析, 熱・換気回路網解析

1. 序

我が国のオフィスビルでは、急速な OA 化と相俟って内部負荷が増加し続け、室内における快適性確保のためにアクティブな空調設備に頼る傾向が続いている。一方、持続可能型社会の実現を目指す風潮の中、外気の有効利用によってオフィスの内部負荷を効果的に除去することで冷房負荷を低減させる方法が模索されてきた。近年では、自然換気と機械冷房を合理的に併用することで室内温熱環境や空気質環境を快適に保ちながら省エネを達成する手法（以下、ハイブリッド空調システム）が提案され実際に用いられており、BEMS（Building and Energy Management System）による建物全体の消費エネルギー・温熱環境を考慮した自然換気制御や、効果的な外気導入を行うための給排気口の流量制御等がなされている。しかし同システムにおける自然換気量は建物の形状、立地環境、気象条件などの外界条件に大きく依存し、またシステムの複雑化も相俟ってその定量的評価は困難となっている。ハイブリッド空調システムに関しては既に幾つかの研究がなされており、本田ら¹⁾は、ダブルスキ

ンを有するオフィスビルにおいて、時間あるいは環境条件によって各種の換気口・窓の開閉等を制御する熱・換気回路網解析を行い、自然換気による冷房負荷削減効果等の推計を行っている。水出ら²⁻³⁾は、ハイブリッド空調システムにシーリングファンを付加したシステムを提案し、同システムを導入したオフィスビルを対象に運用段階における実測調査・実験により基本性能を示すと共に、HASP/ACL D を用いた年間熱負荷シミュレーションによって、同システムによる年間の冷房負荷削減効果等を示している。また近本・張ら⁴⁻⁶⁾は、CFD 解析によりオフィス内の気流・温度・空気質等の評価を行い、室内温度分布生成による冷房負荷削減効果を考慮した年間エネルギーシミュレーションを行っている。更に、細井・須永ら⁷⁻⁹⁾は一般事務所を対象とした実測により、その通風性能を明らかにすると共に、通風可能な外部条件等の検討も行っている。しかしながら流量制御機能を有する給排気口を設置した実在オフィスビルを対象に、実測、更には数値シミュレーションによる性能検証を行っている研究事例は殆どなく、同システムにおける自然換気量や

本論文は既に発表した文献(17), (18)を加筆・修正したものである。

* 北九州市立大学大学院国際環境工学研究科 大学院生

** 前田建設工業

(研究当時 北九州市立大学大学院 大学院生)

*** 北九州市立大学国際環境工学部 教授・博士(工学)

**** 新日鉄エンジニアリング(株)

Graduate Student, Graduate School of Environmental Engineering, The Univ. of Kitakyushu
Maeda Corporation, M. Eng.

Prof., Faculty of Environmental Engineering, The Univ. of Kitakyushu, Dr. Eng.
Nippon Steel Engineering Co., Ltd.

省エネ効果の定量的評価に関しては、未だ検討の余地があると言える。

本研究では、オフィスビルにおいてハイブリッド空調システム、更には流量制御機能を有する給排気口を導入する場合の自然換気性状及び省エネ効果を定量的に示すことを主たる目的としている。本報はその第一報として、外界条件及び給排気口の流量制御機能を再現した自然換気量の解析モデルの提案を行い、実在するオフィスビルの空調試運転時（入居前）を対象とした実測との比較により、解析モデルの予測精度の検証を行う。また本解析モデルを用いたケーススタディを行うことによって、給排気口の流量制御機能の有無による換気量の差異や、風力及び浮力の両駆動力の換気量に対する寄与を明確にする。次報以降では同オフィスビルの運用段階を対象として、BEMS による自然換気の実行制御や内部負荷スケジュール等を再現した解析を試み、実測結果との比較によって、その精度検証、更には省エネ効果の推計等も行う。

2. 対象建物の概要

表 1 に対象建物の概要を、図 1～図 3 に建物外観、建物の南北断面図（自然換気経路）、基準階平面図をそれぞれ示す。対象建物は福岡県北九州市にある地上 5 階建て、両端コアのオフィスビルであり、1 階はエントランスや会議室、2～5 階は執務空間となっている。本建物は平成 21 年度「次世代省エネルギー等建築システム実証事業」（NEDO）に採択されており、2030 年のゼロ・エネルギー・ビル（ZEB）化を目指した実証事業が進められている。省エネ技術として、ハイブリッド空調システムの他、太陽光発電システム、昼光利用システム等の様々な技術が導入されている。また執務室はエリア毎に適切な空調制御を行うため、高効率ビルマルチ空調（天井吹き出し、天井吸い込み）を導入し、空調熱源として一部は地中熱利用 HP、その他は空冷 HP を採用している。建物全体では BEMS が導入されており、建物内外のセンサー情報に基づいて室内環境を制御すると共に建物の機器・設備等を自動管理することで、それらのエネルギー消費量の削減を図っている。

自然換気経路としては、図 3 に示すように、各階の南北（全面ガラスカーテンウォール）床レベルに設置された給気口より外気が導入され、導入された外気は室中央の吹き抜けを介し、建物上部の換気塔に設けられた排気口より排気される仕組みとなっている。建物周辺は春から秋にかけてこの地区特有の南風と北風が吹く。特に対象建物の南側に遮蔽物が無いことから、南風時の誘引効果による風力換気を意図した設計となっている。図 4 及び図 5 に給気口及び排気口をそれぞれ示す。各給気口位置（図 3 に示すように、1 フloor あたり南北 5 箇所設置）には図 6 に示す開口が計 3 つある。給気口は、図 15（後述）に示す P-Q 特性（メーカー提供データ）を有しており、差圧に応じて流量を制御することで過剰な外気の流入を防ぐことが可能である。また排気口には逆流防止機能が備わっており、排気口を介する建物内外の差圧が負（逆流）になると対応する排気口が閉じる仕組みとなっている。尚、本建物では自然換気有効・無効の条件に基づき BEMS による給排気口の開閉の自動制御が行われるが、本報にて検討対象とした空調試運転時は手動制御により自然換気を常時許可している。

表 1 対象建物概要

所在地	福岡県北九州市戸畑区
構造	S 造,両端コア
階数	地上 5 階（最高高さ：27.40m）
延床面積	10,388m ²
敷地面積	6,649,401m ²
竣工	2010 年 12 月

図 1 建物外観

図 2 断面図（自然換気経路）

図 3 基準階平面図

図 4 給気口

図 5 排気口

図 6 給気口形状及び風速分布の測定ポイント

3. 実測概要

本実測は入居前の空調試運転期間である 2010 年 11/6～11/11 において、対象建物 4 階の執務空間と執務空間の中央にある吹き抜け空間を対象^{注 1)}とし、自然換気量の測定を行った。その際、測定精度を高めるため、他階と吹き抜け部を仕切る防火シャッターを閉めることで測定対象外の空間との漏気を極力防ぐように配慮している。また実測期間中は冷房を行っていない。測定項目及び測定機器を表 2 に示す。一般に実測レベルでは十分な測定精度を確保した自然換気量の測定は困難であるため、本実測では①トレーサースガス法（一定発生法）、②給気口の風速値を用いた推定法の 2 手法による測定を同時に行った。尚、対象は大空間となるため、4 階の南側のみ給気口を開いた場合（Case A：11/8～9）と北側のみ給気口を開いた場合（Case B：11/10～11）の 2 ケースにおいて測定を行った。両手法の

測定間隔は 10 分とした。また①トレーサースガス法による測定の際は、トレーサースガスが十分に拡散するようにドージングポイント及び空間全体にサーキュレータを設置している。②給気口の風速値を用いた推定法の場合、給気口内の風速分布を考慮した測定を行うべきであるが、測定機器数や精度等の問題から各給気口の中心 1 点の風速値から給気口の面積を乗じて換気量を推定する方法を採用した。ただし、同推定方法の精度検証並びに補正方法に関しては、予備実測にて各給気口内の風速 7 点 (図 6) を多点風速計により詳細に測定し、事前に検討を行っている^{注 2)} (Case C : 11/6~7)。この詳細測定は、南北面の中央と両端に位置する計 6 箇所の給気口を対象として行い、給気口の位置による風速分布の傾向も同時に把握している。図 7 に Case A,B 及び C の測定ポイントを示す。ペリメータにおける日射負荷の把握のため、室内側の南北鉛直面の日射量を測定した。インテリアでは照明の消費電力量^{注 3)}を BEMS データより把握した。その他、外気温湿度も BEMS データより、風向・風速は北九州市八幡地区の気象庁観測データ¹⁰⁾よりそれぞれ入手した。

4. 実測結果

Case A 及び B の実測期間中における外気温湿度と室内側の南北鉛直面日射量を図 8 に、屋外風速及び風向を図 9 に示す。外気気温は概ね 11~20℃であり、主風向は 11/8~11/10 が西、11/11 が南、風速は概ね 0~8m/s の範囲内であった。

4-1 給気口内の風速分布を考慮した換気量の推定 (Case C)

図 7(b)中の a 及び b 地点における給気口内 7 点の風速値の面積加重平均値^{注 2)}と中央 1 点の風速値との相関図を図 10 に示す。2 つの風速値には正の相関が見られ、決定係数も非常に高い。このことよ

り、各給気口の風量を算出する際、中央 1 点の代表風速から算出するのではなく、図中に示す補正式を使用することにより、多点で測定を行った風速値と同等に、比較的高精度に風量を推定できることが示唆された。また、他の c~f 地点の給気口でも同様の結果 (推定式) が得られているため、以下、②給気口の風速値を用いて換気量を推定する場合には、各給気口中央の風速値と推定式を用いて算出した値を使用する。

表 2 測定項目及び測定機器

測定項目	測定機器
屋外気象条件	外気温湿度 : BEMS 風向・風速 : 気象庁観測データ ¹⁰⁾ (八幡)
換気量	光音響マルチガスモニター 1412-5 型, マルチポイントサンブラ・ドーザ 1303 型 /INNOVA, トレーサースガス : R-134a
給気口の風速	多点風速計 MODEL1550/KANOMAX
日射量 (室内側の南北鉛直面)	ML-020VM/英弘精機

(a)南北断面図

(b)4階平面図

図 7 測定ポイント

図 8 外気温湿度及び南北鉛直面日射量

図 9 屋外風速及び風向

図 10 面積加重平均値と中央風速値の比較 (測定ポイント a,b)

4-2 換気量の測定 (Case A, B)

①トレーサーガス法及び②給気口の風速値を用いた推定法による自然換気量の測定結果を図 11 に示す。図に示す通り、両手法の測定結果は経時変化の傾向は概ね対応するものの、①のトレーサーガス法による測定結果の方が②の風速値を用いた推定法よりも数割程度、換気量を大きく評価する傾向にある。これは、今回の実測が空調試運転時に行われたため、試運転作業や更には仕物の搬入等によって、防火シャッター部を含めたドア等の開閉が頻繁に行われ、他の階からの漏気や給排気口以外の想定していない開口部へのトレーサーガスの排出等が生じたためと推察される。一方、②の風速値を用いた推定法に関しては、前述の通り風速値の補正を行っており、給気口からの外気導入量としては、比較的高い精度の数値であると考えられる。上記の通り、実測期間中は 4 階の給気口以外から外気導入もしくはトレーサーガスの排出がなされていた点や両手法の測定精度を勘案すると②の風速値を用いた推定法による結果が、給気口からの外気導入量を精度良く捉えているものと推察される。よって、以降の解析における精度検証の際には②の値を用いる。

図 12 及び図 13 に 11/9 における自然換気量(②の風速値による推定値)と室内側南北鉛直面の日射量及び屋外風速の関係をそれぞれ示す。今回の測定では、換気量は日射量や屋外風速とは別の要因(例えば、給排気口の流量制御機能や風向)に強く影響を受け、結果として図に示す通り、日射量や屋外風速との相関がなかったものと考えられる (R^2 値はそれぞれ 0.02、0.04)。

5. 解析概要

数値シミュレーションにより自然換気量を高精度に予測するには建物内外の空間を CFD 解析により同時に解く等の精緻な対応が必要となるが、今回のような大規模なオフィスビルで長いタイムスケールを対象とするような場合は現実的ではない。また給排気口の開閉制御等を再現するにはより簡便な手法が望ましい。一方、熱・換気回路網解析では年間の非定常解析を行うことが可能となり、またフィードバック制御を組み込むことで給排気口の開閉等が再現できるが、導入外気の動圧が室内空間にて保存されるような条件下での適用には、予測精度の点で問題がある^{11)・12)}。しかし、今回対象とした建物では南北の外表面積に対する給気口の面積比は極めて小さく、また全ての給気口は流量制御機能を有しているため、室内気流の動圧は殆ど消散される^{注4)}。よって本研究では、自然換気量の評価には熱・換気回路網解析¹³⁾を採用する。ただし、事前に対象建物及び周辺建物を再現した CFD 解析^{注5)}(屋外 CFD 解析)を行うことで対象建物の給排気口位置における 16 風向別の風圧係数を算出し、これを熱・換気回路網解析に反映させることで同解析手法の高精度化を試みている。また本解析ではフィードバック制御を用いることで給排気口の流量制御機能を再現している。

5-1. 屋外 CFD 解析

表 3 に解析条件を、図 14 に解析モデルをそれぞれ示す。図 14 に示すように建物周辺を含む広領域を計算の対象とし、開口を再現していないモデル(建物内の換気経路の解析を行わないモデル)を用いて 16 風向別に給気口と排気口の開口位置における風圧係数の算出を行う。流入面の鉛直風速分布は $1/5$ べき乗則^{注6)}を仮定しており、流出面は表面圧力を 0 Pa と設定した。

a) Case A : 10/8~9 (南側給気口のみ開放した場合)

b) Case B : 10/10~11 (北側給気口のみ開放した場合)

図 11 換気量の測定結果

図 12 換気量と日射量の関係

図 13 換気量と風速の関係

図 14 屋外 CFD 解析モデル

図 15 給気口の P-Q 特性

5-2. 熱・換気回路網解析

本解析では屋外 CFD 解析にて求めた風圧係数を各給排気口に与え、実測時の条件下 (Case A,B) にて熱・換気回路網解析を行い、実測値と比較することで解析モデルの予測精度の検証を行う。次に、ケーススタディとして表 5 に示す通り、それぞれの実測ケース (Case A,B) に対して、1) 給排気口の流量制御機能を再現しない場合^{注 7)} (CaseA-1,B-1) 及び 2) 浮力を考慮しない場合^{注 8)} (CaseA-2,B-2) の解析を行い、各要因の対象建物の自然換気性状への寄与を定量的に評価する。

熱・換気回路網解析の条件を表 4 に示す。対象建物の東西 (コア部) 及び上下階は断熱であると仮定し、4F 及び吹抜け部を解析対象として、10 分間隔の非定常計算を行った。室内発熱として日射 (実測値) 及び照明による発熱量を与えており、実測期間中は常時照明を ON にしていたため照明による発熱量は一定値 (38.5 kW) とした。以下ではフィードバック制御による給排気口の流量制御手法の概要を示す。

(1) 給気口の流量制御機能

本解析では、給気口の圧力損失係数及び指数の異なる二つの換気回路を作成し、給気口を介する内外の圧力差に応じて換気回路 (圧力損失係数 α [-] 及び指数 β [-]) をフィードバック制御により切り替えることで給気口の P-Q 特性を再現している。図 15 に給気口の P-Q 特性及び解析にて用いた 2 パターンの α 及び β の組み合わせを示している。室内外の差圧 10 Pa を判定値として 10 Pa 未満であれば $\alpha=5.4$, $\beta=2.5$ とし、10 Pa 以上であれば $\alpha=2.9$, $\beta=4.0$ としている。10 Pa 以上の場合、差圧 Δp が大きくなると解析値の方がメーカー提供値よりも若干大きくなる傾向にあるが、本解析における給気口の平均差圧は 8.6 Pa、標準偏差 4.7 Pa、最大値 28.8 Pa であったため、換気量の予測精度には殆ど影響しないものと考えられる。本解析におけるフィードバック制御機能の概念図を図 16 に示す。フィードバック制御では 1 ステップ前の結果 (室内外の差圧等) に基づき、回路網を選択して解析を行っている。そのため、非定常時における 1 ステップの計算時間間隔を大きくすると解析が安定せず、適切な結果が得られない可能性がある。本解析を行うにあたり、計算時間間隔を 30 分、15 分、10 分に変化させた解析を事前に行い、15 分と 10 分の解析結果では差異が殆ど無いことを確認している。よって、本解析では計算時間間隔として 10 分を採用している。

(2) 排気口の流量制御機能

排気口の逆流防止機能についても図 16 と同様のロジックによって、排気口を介する内外の差圧が負 (逆流) になれば流路面積が 0 m² となるような解析を行い、実現象を再現している。尚、排気口の圧力損失係数及び指数は、メーカー提供値を参考にして $\alpha=2.4$, $\beta=2.0$ と設定している。

6. 解析結果

6-1. 屋外 CFD 解析結果

図 17 に 4 階南北中央の給気口位置及び屋上南北中央の排気口位置における風圧係数を示す。また図 18 及び図 19 に南北風向時における建物周辺の水平面風速分布及び鉛直面静圧分布をそれぞれ示す。図 17 の (a)(b) を比較すると、風向が北の場合においても北側の給気口の風圧係数が小さい (図 17(b))。これは対象建物の北側に多く建物

表 3 屋外 CFD 解析条件

流入面 ¹⁴⁾	$u(z) = u_s \left(\frac{z}{z_s} \right)^n$, $I(z) = 0.1 \left(\frac{z}{z_G} \right)^{-(n+0.05)}$ $k(z) = (I(z)u(z))^2$, $\varepsilon(z) = \sqrt{C} k(z) \frac{u_s}{z_s} n \left(\frac{z}{z_s} \right)^{(n-1)}$
流出面	表面圧力(圧力: 0[Pa])
乱流モデル	LK モデル ¹⁵⁾
上空面・側面	Free-slip
地表面	1/5 乗則壁面応力境界
建物表面	一般化対数則
解析領域	624m(x)×430m(y)×125m(z)
要素数	1,815,068 : 181(x)×109(y)×92(z)

$u(z)$: 流入風速の鉛直分布[m/s], u_s : 基準高さ z_s における風速(=2.0)[m/s], z_s : 基準高さ(=20)[m], z : 地表面からの高さ[m], n : ベキ数(=5), $I(z)$: 乱れ強さの鉛直分布[-], z_G : 上空風高度(=450)[m], $k(z)$: 乱流エネルギーの鉛直分布[m²/s²], $\varepsilon(z)$: $k(z)$ の散逸率[m²/s³], C : モデル定数[-]

表 4 熱・換気回路網の解析条件

気象データ	外気温: BEMS データ ^{注 9)} (図 8) 風速, 風向: 気象庁観測データ ^{注 9)} (図 9)
計算期間	2010/11/08~11/09 (Case A: 南側のみ開) 2010/11/10~11/11 (Case B: 北側のみ開)
室内発熱	日射: 実測値 (図 8) 照明: BEMS データ (38.5kW)
節点数(熱回路)	117 点
流路数(換気回路)	給気 10 流路, 排気 6 流路
計算間隔	10min (非定常)

図 16 フィードバック制御の概念図

図 17 各開口部における風圧係数の一例

が立地していることが原因と考えられ、図 18(b)より対象建物の北側に位置する建物の影響で対象建物北側の風速が減衰している様子を確認できる。

一方、図 17 の(c)(d)における排気口の風圧係数をみると、風向が南の場合においても南側の排気口の風圧係数の方が小さい(図 17(c))。これは対象建物の南側に建物が無く開けていることが理由として考えられる。図 19 に示す通り(b)の風向が北の場合よりも(a)の南の場合の方が剥離の影響によって建物上部及び換気塔周辺の圧力が低くなっている様子が確認できる。

以上のことから、本建物においては設計意図通り、風向が南の場合に効果的に自然換気が行えるものと推察される。

6-2. 予測精度の検証

実測期間中における給気口の風量平均値[m³/h]の実測値及び解析値を表 5 に示す。また給気風量[m³/h]の実測値と解析値(Case A,B)の時系列変化を図 20 に示す。尚、図中には流量制御無しの場合の解析結果(CaseA1, B1)も併せて示している。表 5 及び図 20 に示す通り、風量平均値ベースの実測値との誤差が Case A で+7.0%、Case B では-4.5%程度となっており、また給気風量の時系列変化もその傾向を良く捉え、再現している。

以上より、対象期間において本解析モデルにより精度良く自然換気量を予測できることが確認できた。また建築基準法に基づく計算式より算出した必要換気量は 6553.6[m³/h] (床面積 1638.4m²、占有面積 5.0m²/人、換気回数換算 1.4 回/h) であり、図 20 を見ると南北どちらかの給気口を閉じた条件下であっても、概ね必要換気量を満たしていることが確認できる^{注11)}。

6-3. 給排気口の流量制御機能の寄与

図 20 に示す通り Case A,B と流量制御機能を再現していない Case A1,B1^{注7)}を比較すると CaseA1,B1の方がともに風量平均値が低い値を示している。これは特に排気口の逆流防止機能によって Case A では 20.8(=13.8+7.0)%, Case B では 11.4(=15.9-4.5)%程度、風量の低下が抑制されているためである。また図 20 における風量の実測値の推移をみると、図 20(a)では風量が大きく変動しているが、図 20(b)の後半では風量が安定している。これは、実測期間の前半(図 9 参照)は卓越風向が西(給排気口面に平行)であるため、風向のわずかな変化に応じて排気口の風圧係数が大きく変化し、排気口の開閉が頻繁に切り替わった結果、風量が大きく変動したものと推察される。一方、図 20 の解析値の Case A 及び A1 では、使用した風向・風速の気象データが 1 時間毎であるため^{注9)}、全体的に挙動が緩やかとなる傾向にある。ただし、排気口が常に開いている Case A1 では、Case A よりも風量のピーク値が抑制される。

以上より、流量制御機能を解析に考慮することによって実際の自然換気の挙動を概ね再現できることを確認した。

(a) 風向が南の場合

(b) 風向が北の場合

図 18 水平面風速分布 (Z=13.5m)

(a) 風向が南の場合

(b) 風向が北の場合

図 19 南北鉛直面の静圧分布 (X=153m)

表 5 解析ケース及び給気口の風量平均値の結果

解析ケース	ケースの説明	風量平均値×10 ² [m ³ /h] (実測値)	風量平均値×10 ² [m ³ /h] (解析値)	風量平均値の 実測値との差[%]	RMSE ^{注10)} ×10 ² [m ³ /h]
Case A	流量制御有り	102.5	109.5	+7.0	33.5
Case A1	流量制御無し		88.3	-13.8	34.0
Case A2	浮力無し		94.9	-7.4	
Case B	流量制御有り	99.0	94.6	-4.5	14.7
Case B1	流量制御無し		83.3	-15.9	21.0
Case B2	浮力無し		67.1	-32.2

(a)南側のみ給気口を開いた場合

(b)北側のみ給気口を開いた場合

図 20 給気口風量の時系列変化（実測値との比較）

(a)南側のみ給気口を開いた場合

(b)北側のみ給気口を開いた場合

図 21 給気口風量の時系列変化（浮力なしの場合との比較）

6-4. 浮力と風力の寄与

図 21 に Case A,B 及び Case A2,B2（浮力無し）の給気風量の時系列変化を示す。図 21(a)では実測期間中の風速が常に 4m/s 程度と風力が卓越していたため（図 9 参照）、Case A と Case A2 に大きな差異は見られない。一方、図 21(b)ではほぼ無風状態となる時間帯

もあるため、浮力を考慮していない Case B2 では風量が一時的に 0 となる。一方、浮力を考慮した Case B の解析では必要換気量を満たす程度の十分な風量を確保できている。

以上より、外部風による風力が卓越している場合は、浮力による寄与は小さいが、無風時においては室内発熱による浮力の影響で一定の換気量が常に確保できることが示唆された^{注 1)}。

7. 総括

本報では、ハイブリッド空調システムを採用した実在するオフィスを対象として、給気口及び排気口の流量制御機能を考慮した自然換気量の解析モデルを提案した。更に、対象建物の空調試運転時における実測と数値シミュレーションを行い、両結果を比較することで解析モデルの精度検証を行うと共に解析によるケーススタディを通じて、対象建物の自然換気性状の把握を試みた。以下に得られた知見を示す。

- 1) 給気風量の実測値と解析値の誤差が 1 割以下となっており、今回の条件下では流量制御機能を再現した解析モデルにより精度良く換気風量を推定できることを確認した。
- 2) 周辺建物の立地及び対象建物上部の形状によって、風向が北の場合よりも南の場合において効果的に自然換気が行えることが示唆された。
- 3) 今回の解析条件下では、南側もしくは北側のどちらかの給気口を閉じた場合においても、ほぼ全ての時間帯において必要換気量を満たす風量が供給されており、対象建物では自然換気によって十分な風量を確保できることが示唆された。
- 4) 排気口の逆流防止機能によって、換気量の低下を抑制していることが確認できた。
- 5) 対象建物では、無風時においても室内発熱による浮力の影響によって一定の換気量が確保されることが確認できた。

今後、対象建物の運用段階における実測及び解析を行い、提案する解析モデルの更なる精度検証を踏まえ、ハイブリッド空調システムの省エネ効果の推計等を行う予定である。

謝辞

本研究を行うにあたり、北九州市役所の大庭慶祐氏(当時、北九州市立大学大学院生)に甚大なるご協力を頂いた。記して、感謝の意を表する。

注

注 1) 本実測では自然換気量の測定精度を高めるために、対象空間及び給気口の開放も南北のどちらかに限定し、更に防火シャッターを閉鎖して対応している。ただし、実際の運用段階の換気経路と異なるといった問題も懸念されるが、本報にて示す実測の測定精度及び数値シミュレーションの予測精度の検証結果を踏まえて、次報以降にて運用段階における自然換気量及び省エネ効果の定量的な検証を行う予定である。

注 2) 風速の測定点は給気口 1 箇所あたり 7 点ではあるが、予備測定により給気口中央部の短辺方向の速度分布は長辺方向においてもほぼ同様の分布を有するということを確認している。このため、長辺方向の中央を除く 4 箇所においても中央と同様に短辺方向に速度分布が生じているものと仮定し、実際には測定を行っていない計 8 点（短辺 3 点×長辺 5 点－実際の測定箇所 7 点）の風速を推定し、計 15 箇所の面積加重平均値として平均風速の算出を行っている。

注 3) 入居前の空調試運転時のため OA 機器等は搬入されておらず、内部負荷としては照明負荷のみである。

注 4) 給気口形状及び流量制御機能を詳細に再現した単室レベルの CFD 解析によると¹⁰⁾、室内気流の動圧が殆ど消散し、熱・換気回路網解析の結果と概ね一致することを確認している。

注 5) 株式会社ソフトウェアクレイドルの STREAM ver.7 を用いた。

注 6) 文献 14) を参考に、地表面粗度区分をⅢ（建築物が密集する地域、あるいは中層建築物が散在している地域）と仮定した。

注 7) 流量制御を行わない場合の給気口の圧力損失係数が不明なため、今回の解析では流量制御なしのケースにおいては、図 8 の $\Delta P < 10 \text{ Pa}$ の圧力損失係数及び指数 ($\alpha = 5.4$, $\beta = 2.5$) を用いた。よって、他のケースで行っているような換気回路の切り替えは行っていない。この点は、今後の検討課題として位置づけている。

注 8) 室内発熱（日射及び照明）を 0 として解析を行った。厳密には躯体等の蓄熱による浮力の影響が働いているが、その影響は相対的に極めて小さい。

注 9) 外気温、風向・風速共に 10 分間隔で測定を行っているが、解析ツールに取り込む気象データのフォーマットに合わせて、実際の解析に際しては 1 時間毎のデータを用いた。

注 10) RMSE とは、2 乗平均平方根誤差(Root Mean Square Error)のことであり、以下の式を用いて算出している。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2 / n} \quad \bar{x} : \text{実測値}, x_i : \text{解析値}, n : \text{データ数}$$

注 11) 空調試運転時を対象とした解析であるため、OA 機器や人体発熱が本解析では考慮されていない。よって、運用段階においては換気駆動力である浮力の寄与がより大きくなるものと推察される。

参考文献

- 1) 本田公宏 他 4 名：ダブルスキンを有する建物における熱性能シミュレーションの検討事例，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-2，pp. 231-234，2001. 08
- 2) 水出喜太郎 他 6 名：自然換気・シーリングファンを併用した空調換気システムの制御手法と性能評価に関する研究，日本建築学会環境系論文集，第 604 号，pp. 69-76，2006. 6
- 3) 水出喜太郎 他 6 名：自然換気・シーリングファンを併用した空調換気システムの制御手法と性能評価に関する研究 第 2 報，日本建築学会環境系論文集，第 620 号，pp. 59-66，2007. 10
- 4) 近本智行，加藤信介，村上周三他：冷房時のオフィス空間における自然換気ハイブリッド空調に関する研究（その 1 ～ 17），日本建築学会大会学術講演梗概集，D-2，pp. 597-598，1997 ほか
- 5) 張 賢在，加藤信介，村上周三他：オフィスにおける自然換気ハイブリッド空調に関する研究（第 1 報），空気調和・衛生工学会論文集，No. 83，pp. 81-90，2001. 10
- 6) 張 賢在，加藤信介，村上周三他：オフィスにおける自然換気ハイブリッド空調に関する研究（第 2 報），空気調和・衛生工学会論文集，No. 88，pp. 63-72，2003. 1
- 7) 細井昭憲，成田樹昭，須永修通：自然通風に関する実測研究 その 1 風圧力と浮力が同時に作用する建物における通風特性，日本建築学会計画系論文集，第 564 号，pp. 25-31，2003. 02
- 8) 細井昭憲，成田樹昭，須永修通：自然通風に関する実測研究 その 2 自然通風の温熱快適性に基づく制御方法と省エネルギー効果，日本建築学会環境系論文集，第 577 号，pp. 7-12，2004. 03
- 9) 細井昭憲，須永修通，宮本麻理子，成田樹昭：自然通風に関する実測研究 その 3 建物の熱性能が自然通風の有効性におよぼす影響，日本建築学会環境系論文集，第 588 号，pp. 27-34，2005. 02
- 10) 気象庁：気象統計情報，
<http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>（2011. 12. 6）
- 11) 加藤信介：パワーバランスモデルに基づく通風量計算モデル，日本建築学会第 1 回空気シンポジウム，pp. 45-50，1990
- 12) 樋山恭助，加藤信介，高橋岳生，河野良坪：開口面積比及び開口位置関係が通風時気流性状に与える影響の分析，日本建築学会環境系論文集，第 596 号，pp. 21-27，2005. 10
- 13) 奥山博康：熱・換気回路網計算プログラム NETS の検証，IBPSA-Japan，講演論文集，2002

- 14) 日本建築学会：市街地風環境予測のための流体数値解析ガイドブック，p. 158，2007. 7. 20
- 15) Kato, M. and Launder, B.E., The modeling of turbulent flow around stationary and vibrating square cylinders, Proc. of 9th Symp. Turbulent Shear Flows, (1993), pp. 1041-1046
- 16) 大庭慶祐 他 5 名：オフィスビルにおける自然換気及び機械空調の併用システムに関する研究，（その 3）マルチスケール CFD 解析による建物全体の自然換気性状評価，日本建築学会研究報告 九州支部，2，環境系 (50)，pp. 309-312，2011. 03
- 17) 安永龍一，白石靖幸 他 4 名：北九州市におけるゼロ・エネルギー・ビルを目標とするオフィスビルの性能検証と運用改善，（その 4）空調試運転時における自然換気性状の実測結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-2，pp. 1093-1094，2011
- 18) 安永龍一，白石靖幸 他 4 名：北九州市におけるゼロ・エネルギー・ビルを目標とするオフィスビルの性能検証と運用改善，（その 5）建物内外の連成解析による自然換気性状評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-2，pp. 1095-1096，2011

（2012 年 2 月 8 日原稿受理，2012 年 5 月 1 日採用決定）