

オフィスビルにおける自然換気及び機械空調の併用手法に関する研究 —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の推定—

2009MBB004 大庭 慶祐

白石研究室

The purpose of this study is to clarify the actual amounts of natural ventilation for the hybrid use method of natural ventilation and mechanical air - conditioning in the office building. The amounts of natural ventilation were evaluated based on three measurement techniques(①tracer gas technique,②estimation method by wind speed value, ③estimation method by heat balance) and numerical simulation. The numerical simulations based on CFD analysis and Thermal and Airflow Network analysis were conducted. The results are as followed: 1)It was found from the results of field measurement that ②estimation method by wind speed value was the most accurate technique. 2) The simulation results and measurement results were almost well in agreement.

オフィスビル, 自然換気, 実測調査, CFD 解析, 熱換気回路網解析, 連成解析

1. はじめに

近年では、自然換気及び機械空調の併用手法が提案されており、多くのオフィスビルで採用され始めている。しかし、同手法は省エネ効果が期待できるものの、定量的効果は建物の形状、立地環境、気象条件などに左右され、更に、実際の運用に際しては温熱・空気・音環境や知的生産性などの室内環境の質への影響も懸念される。既往の研究では、同手法を採用したオフィスにおける実測調査や数値シミュレーションによる換気性能評価や省エネルギー効果などが検証されているが、自然換気量の評価に関する検証が不十分なものが多い。従って本研究では、同併用手法を採用したオフィスビルを対象とし、試運転時における自然換気導入量の実態を明らかにすることを目的とする。自然換気量の測定では①トレーサーガス法、②給気口の風速値を用いた推定法、③空間の熱収支による推定法の計3手法を採用すると共に、数値シミュレーションも実施し、補完的且つ総合的に評価する。数値シミュレーションでは、CFD解析や熱換気回路網解析及びそれらの連成解析を行い、計算負荷を少なく且つ高精度な解析手法の検討を行う。

2. 対象建物概要

対象建物は福岡県北九州市にある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、自然換気システムのみならず、太陽光発電システム等の数多くの環境配慮技術を導入している。またBEMS (Building and Energy Management System) を活用して、建物の環境・エネルギーの各種制御を行っている。自然換気の給気口にはP-Q特性によって風量を制御する流量制御機能がある。図1、2にそれぞれ建物外観と環境配慮計画、表1に建物概要を示す。

3. 試運転時における自然換気性状の実測調査

3.1 実測概要

本実測は、2010年11/6～11/12において対象建物の4階の執務空間と執務空間の中央にある吹抜け空間を測定対象



図1 対象建物の外観

図2 環境配慮計画

表1 対象建物の概要

所在地: 福岡県北九州市	階数: 地上5階
建築面積: 2,330m ²	構造: S造
延床面積: 10,387m ²	竣工: 2010年12月

表2 測定項目

測定項目	測定機器
屋外気象条件	BEMSデータ、気象庁観測データ(八幡)
温湿度	おんどとり TR-52、TR-53T&D
給気口の風速分布	多点風速計/KANOMAX
自然換気量	光音響マルチガスモニター、マルチポイントサンブラ・ドーナザ/INNOVA、多点風速計/KANOMAX
日射量(南北鉛直面)	ML-020VM/英弘精機

として実施した。測定項目を表2に示す。一般に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、本研究では①トレーサーガス法、②給気口の風速値を用いた推定法、③空間の熱収支による推定法^{註1)}の計3手法を用いている。

3.2 実測ケース

前述の②の給気口の風速値から自然換気量を推定する場合、開口部中心1点の測定値から換気量を算出すると、給気口内の風速分布が考慮されていないため、予測精度の点で問題がある。このため、実測Case Aでは給気口の風速分布を多点風速計により詳細に測定し、中心1点の風速値から換気量推定する際の精度検証(換気量の補正方法の検討も含む)を行う。次に実測Case Bでは、まず自然換気を行う階及びエリアを限定して(4階の南側もしくは北側の執務空間)、①のトレーサーガス法により換気量の測定を行うと共に、②の給気口の風速値を用いた推定や③の空

間の熱収支による推定も同時に行い、各手法の比較により測定精度の検証を行う。また、Case C として、建物全体の詳細な測定(短期及び長期実測)に先立ち、Case A 及び Case B の検証結果を踏まえ、1フロア全体の詳細な測定を行う。(ただし、実測期間中は天候に恵まれず、測定全般で良好な結果が得られなかったためここでは省略。) 実測 Case A 及び B の測定ポイントを図3、4に示す。

3.3 実測結果

1) 屋外環境 (図は省略)

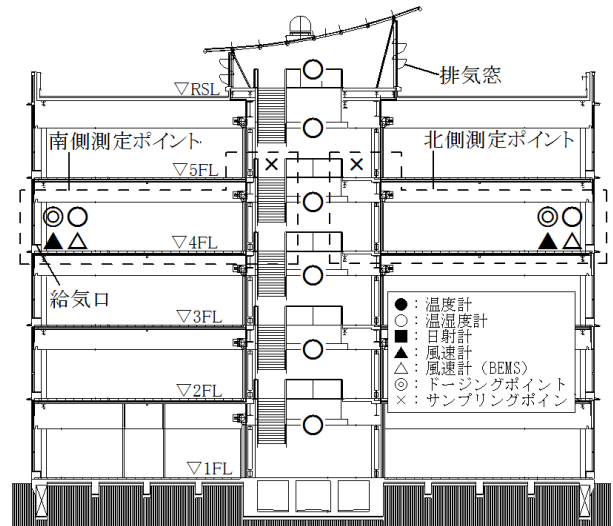
実測期間中は、外気温が 11~20°C、主風向は西南西で風速は 2~8m/s、南鉛直面日射量は最大 500W/m²であった。

2) 給気口の風速分布の詳細測定 (Case A)

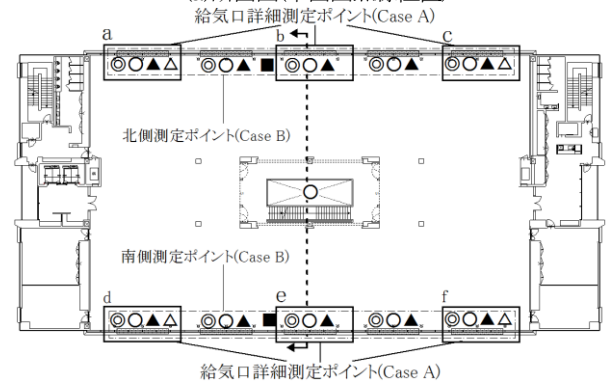
給気口の開口面の風速分布を詳細に測定した結果を(図3の平面図に示した給気口位置の a に対応する)図5に示す。尚、比較の為測定点7点の面積加重平均値^{注2)}と中央1点の風速値の相関図を示す。2つの風速値には正の相関が見られ、決定係数も非常に高い。各給気口の風量を算出する際、中央1点の代表風速から算出するのではなく、図中に示す補正式を使用することにより、多点で測定を行った風速値と同等に、より高精度に風量を推定することが可能となった。また、他の給気口でも同様の結果が得られ、以下、②の給気口の風速値を用いて自然換気量を推定する場合には、この補正式を用いて算出を行う。

3) 自然換気量の測定 (Case B)

①トレーサースガス法、②給気口の風速値を用いた推定法及び③空間の熱収支による推定法による自然換気量の測定結果(4階北側)を図6に示す。図に示す通り、①トレーサースガス法による換気量の測定結果が他の測定結果より数割程度、換気量を大きく評価する傾向になる。これは、試運転作業や什器の搬入に伴い、作業員によるドアの開け閉めが頻繁に行われ、他の階からの漏気や想定していない開口部へのトレーサースガスの排出等が生じたためと推察される。②の風速値を用いた推定法に関しては、前述の通り図5に示した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。③空間の熱収支による推定法に関しては、全体的な傾向として②の風速値を用いた推定法と概ね一致している。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がなされていた点や各手法の測定精度等を勘案すると②の風速値を用いた推定法による結果が最も実現象に対応するものと思われる。また、今回の実測では、日射、風速共に換気量との相関性は確認できなかった(R²値はそれぞれ0.07、0.27)。この結果より、室内外の温度差や風向・風速、日射等の様々な要因が重なり、給気口の P-Q 特性の下に換気が行われていることが示唆された。



(a)断面図(平面図点線位置)



(b)4階平面図

図3 実測 Case A 及び B の測定ポイント

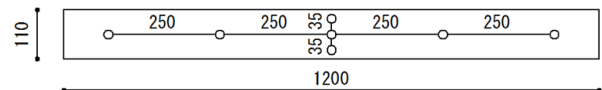


図4 実測 Case A の給気口の風速分布測定ポイント

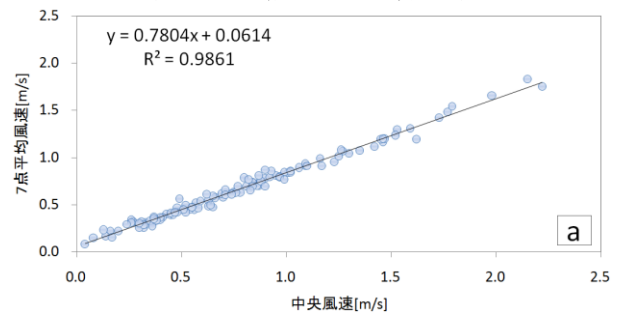


図5 7点の面積加重平均風速と中央風速の比較

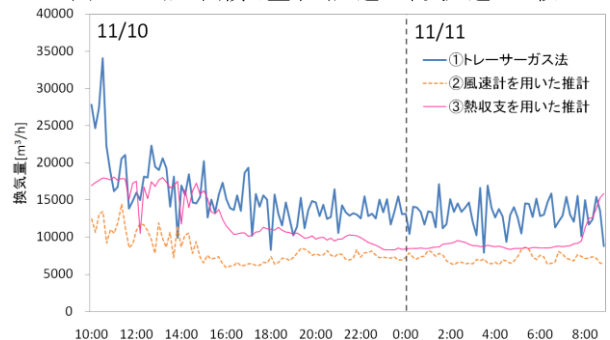


図6 4階北側の換気量測定結果(11/10-11)

4. 数値シミュレーションによる自然換気性状の検討

4.1 解析概要

屋外環境に依存する自然換気の定量的評価においては、換気量の算出方法が重要となる。正確な換気量の評価には、建物内外の空間を CFD 解析により同時に解く必要があるが、今回のような大規模なオフィスビルを対象とした場合、現実的ではない。そこで、本研究では、建物内外をそれぞれ別々に解析し、屋外側の解析(以下、屋外解析)結果を室内側の解析(以下、建物内解析)に反映させるマルチスケール CFD 解析によって建物全体での自然換気量及び流れ場を算出する。ここでの解析結果により、建物内での自然換気性状の詳細を把握し、その特性を熱換気回路網解析に反映させる(屋外解析で算出した風圧係数を開口部の境界条件として与える。又、室内のゾーン分割を行った際のゾーン間の圧力損失係数等を与える)ことによって解析手法の計算負荷を小さくし且つ高精度化を目指す。本解析では、その第一段階として、換気量評価の予備的検討と位置付けており、①一般的な換気性状を把握するための簡易モデルと②同併用手法を導入したオフィスビルを対象とした実モデルの2タイプを解析対象とし、1)マルチスケール CFD 解析と2)屋外解析(CFD)+熱換気回路網解析の2つの手法によって自然換気性状の評価及び風向依存性に関する検討を行う。(簡易モデルによる検討は省略³⁾)

4.1.1 屋外解析の概要

図7に示すように、建物周辺を含む広領域を計算領域とし、開口のないモデル(建物内の換気経路の解析を行わない)を用い、16 風向別に給気口と排気窓の開口位置の表面静圧、風圧係数の算出を行い、その特徴を把握した。屋外解析条件を表3に示す。流入条件として、鉛直風速分布は1/5 べき乗則を仮定した。また、解析領域は、624m(x)×430m(y)×125m(z)とした。

4.1.2 建物内解析の概要

図8に示すように建物全体を簡易に作成し、開口位置に屋外解析で算出した表面静圧を境界条件として与えている。今回の解析では、実測と同じ条件となるように、4 階執務空間と吹抜け部分のみを解析領域としている。また、室内熱負荷として実測の条件と同様に照明のみ天井面に与え、日射負荷として南ブラインド面とトップライトに発熱条件を与えた。モデルの開口部は、対象オフィスビルで導入されている給気口を再現し、P-Q 特性を考慮している。排気窓は、形状は再現していないため、面積圧力損失境界(メーカー提供データの圧力損失係数)として開口部に設定している。本解析は、風力換気と温度差換気による換気性状評価を目的としているため、熱貫流、輻射は無視し、対流成分のみによる解析とした。建物内解析の条件を表4に示す。

4.1.3 熱換気回路網解析の概要

解析対象は、建物内解析と同様に4 階執務空間と吹抜け部分のみとしており、室内のゾーン分割等は行っていない。表5にモデル概要を示す。給気口と排気窓の風圧係数は、屋外解析により16 風向において算出している。計算期間

表3 屋外解析条件

流入面	$U(z) = U(z/z_0)^{0.2} \quad \varepsilon = C_u k_m^{1.5} U_a / 4(C_u k_m^{0.5}) z_0^{0.25} z^{0.75}$
流出面	表面圧力(圧力: 0[Pa])
乱流モデル	LK モデル
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: 流入風速[m/s], *k_m*: 乱流エネルギー[m²/s²], *e*: *k_m*の散逸率[m²/s³], *C_u*: モデル定数(=0.09), *Z₀*: 基準高さ(=0)[m], *U_a*: *Z₀*における基準風速[m/s]

表4 建物内解析条件

流入・流出面	屋外解析より求めた表面静圧	
乱流モデル	LK モデル	
壁面境界条件	温度	一般化対数則 又は 対流熱伝達率指定 9W/m ² K
	速度	一般化対数則
発熱条件	照明負荷: 39,000W、日射負荷: 112,352W	
解析領域	66.17m(x)×32m(y)×27.45m(z)	
要素数	1,020,600 : 189(x)×72(y)×75(z)	

表5 熱換気回路網解析条件

気象データ	気象庁観測データ (八幡) ※実測期間中のデータ
計算時間	11/8,21:00~11/9,17:00、11/10,10:00~11/11,8:00
発熱条件	照明: 39,000W、日射 ※実測期間中のデータ
開口部	屋外解析によって求めた風圧係数を与える
接点数/流路数	熱回路網: 358 点 換気回路網: 62 流路

表6 解析ケース

	Case1	Case2.1	Case2.2
解析条件	風向: 8 方向 風速: 2~8m/s	実測 Case B 南側測定時	実測 Case B 北側測定時

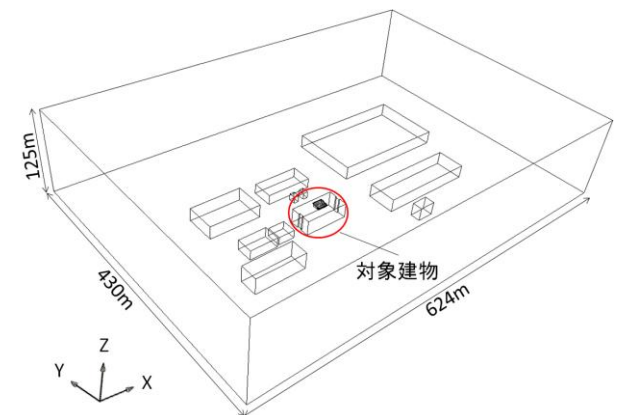


図7 屋外解析モデル図

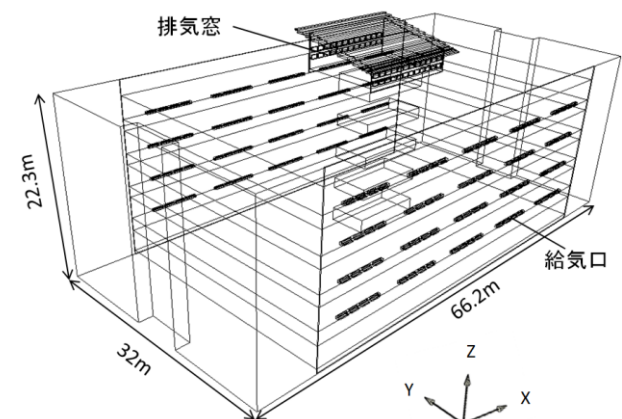


図8 建物内解析モデル

は実測 Case B 測定時である 11/8,21:00~11/9,17:00(南側測定時)と 11/10,10:00~11/11,8:00(北側測定時)で、気象データは実測期間中の八幡の気象庁観測データを用いて解析を行う。給気口には簡易的に P-Q 特性を与えている。

4.1.4 解析ケース

解析ケースを表 6 に示す。Case1 では、実測結果との比較を行う前に、2)屋外解析(CFD)+熱換気回路網解析の予測精度を検証するため、1)マルチスケール CFD 解析との比較を行う。その際、風向・風速を変化させた時の自然換気性状の評価及び風向依存性について検討する。Case2 では、Case1 での結果を踏まえ、実測 Case B 測定結果を基に 2)屋外解析(CFD)+熱換気回路網解析によって換気量を算出し、実測値との比較・検証を行う。

4.2 解析結果

Case1 の解析結果を図 9 に示す。なお、比較のために熱換気回路網解析とマルチスケール CFD 解析の解析値を相関図として示している。熱換気回路網解析の方が若干換気量を大きく評価しているが、風向・風速の変化による誤差はほとんど見られず、解析結果は概ね一致しており予測精度の高さが確認できる。これは、簡易モデルの事前検証により示した P-Q 特性を考慮することによって、開口部の風向依存性の問題が解消されているためであると考えられる。また、本解析での熱換気回路網解析はゾーン分割等を行っていないが、試運転時における状況を再現しているため、人為的な熱負荷等が無く、室内環境が安定しているため比較的高精度に解析できたものと考えられる。以上の結果より、試運転時における換気量の算出には、ゾーン分割等を行っていない熱換気回路網解析でも精度良く検証できるものとして、Case2 の解析を行う。

Case2.2(実測 Case B 北側測定時)の解析結果を図 10 に、解析値と実測値の相関図を図 11 に示す。図 10 に示す通り、解析値が実測値と概ね一致している。また、図 11 を見ると R²値が 0.78 と高く、本解析手法が精度良く実現象を再現できていると考えられる。尚、実測値は風速計による換気量推定値を用いており、風速値を用いた推定法の精度の高さが示唆された。

以上の結果から、試運転時における換気量の定量的評価は、本解析手法でも十分に精度よく算出できることが確認できた。しかし、熱換気回路網解析においては、ゾーン分割やシャフト部の圧力損失に関する詳細な検討は行っておらず、運用時に同様の結果が得られない可能性もある。従って、今後は CFD 解析によって 16 風向条件下における建物全体の詳細な換気特性(シャフト部と室内空間の圧力損失や室内のゾーン分割)を把握し、短期・長期実測を対象とした予測精度の検証を行うと共に、その特性を熱・換気回路網解析に反映させることによって、更に高精度な熱換気回路網解析を行う必要がある。

5. まとめ

1) 各給気口の風量を算出する際、中央 1 点の代表風速値に事前に行った給気口内の詳細測定より算出した補正式を使

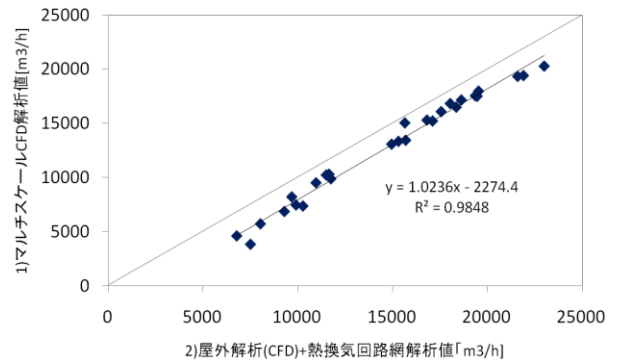


図 9 Case1 の解析結果

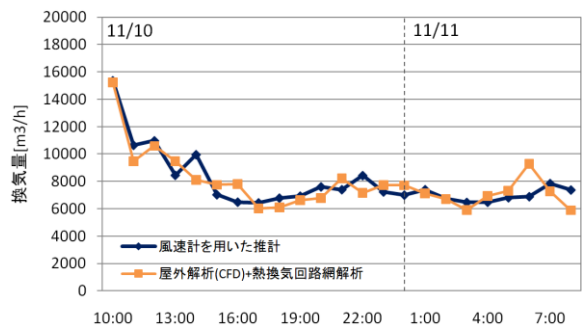


図 10 実測と解析による換気量の比較(Case2.2)

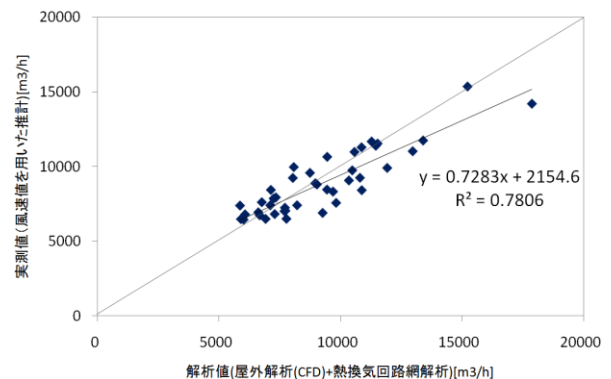


図 11 実測値と解析値の相関図

- 用することにより、多点で測定を行った風速値と同等に、より高精度に風量を推定することが可能となった。
- 2) 3つの手法により換気量の推定を行ったが、②風速値を用いた推定法が実現象に最も対応するものと思われる。
 - 3) 実モデルによる検証では、解析値が実測値(風速値を用いた推定法)に近い値を示し、風速値を用いた推定法の精度の高さを確認できた。

【注釈】

1) 空間の熱収支による換気量算出には以下の式を用いて計算した。
 なお、総熱量 W の算出の際には、内部負荷(照明発熱)と日射負荷のみを考慮し、貫流分は無視している。

$$Q = W / C_p \rho (t_i - t_o) \quad [1]$$

(記号) Q: 換気量[m³/s], W: 総熱量[W], C_p: 空気比熱[J/kgK], ρ: 比重[kg/m³], t_i: 排気温度[°C], t_o: 外気温度[°C]

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短辺方向の速度分布は長辺方向においても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計 4 点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。

3) 簡易モデルによる換気量評価の予備的検討では、開口部の風向依存性によって予測精度の低下が問題となっていたが、P-Q 特性を考慮することによってその問題が解消されることが確認できた。この結果より、実モデルにおいても精度よく換気量を算出できるものとしている。