

各隅角部に排気用ボイドを有した高層オフィスビルにおける自然換気性能に関する研究

第1報——自然換気性能と年間自然換気量の把握

田 辺 慎 吾^{*1}
桃 井 良 尚^{*3}

山 中 俊 夫^{*2}
相 良 和 伸^{*4}

本研究では、自然換気用に4隅に排気用ボイド及び外壁面の4面に空気取り入れ用外壁スリットを配置した高層オフィスビルにおける各自然換気口の換気性能（PQ曲線の作成）の把握を行った。また、トレーサーガス減衰法から換気量を求めた手法（濃度法）、各換気口の代表風速と開口面積から換気量を求めた手法（風速法）、外壁面及びボイド内と室内間の常時差圧計測と自然換気口PQ曲線から換気量を求めた手法（差圧法）により同時刻の各換気量を推定し、各測定法で換気回数0.5回/h以内と差異が小さいことを確認し、常時計測が可能な「差圧法」の有効性を明らかにしたものである。

キーワード：実測・BEMS・オフィス

はじめに

省エネルギー・低炭素化の実現から、オフィスビルにおいて様々な環境共生技術が採用される。本研究で対象としたオフィスビルにおいても省エネ手法が複数導入され、中でも「各隅角部に配置された排気用ボイド（コーナーボイド：CV）を用いた自然換気」は大きな目玉となるシステムの一つである。自然換気は中間期に自然エネルギーを効果的に利用できる手法であり、冷房負荷削減が期待できる。自然換気の原理は、換気駆動力によって重力換気と風力換気に分けられ、換気量はその換気駆動力と圧力損失のバランスによって決定される。重力換気は、室内外空気の温度差によって生じる圧力差により換気を行われ、無風時でも自然換気を行うことが可能である。階段室を用いた建物¹⁾、自然換気用ボイドを用いた建物²⁾³⁾など複数の建物で重力換気が活用されているが、本建物ではさらに多くの換気量が得られる様に、内部負荷による室温上昇に加え、太陽熱によるボイド内温度上昇効果も期待し、ボイドを4隅の外壁側に配置した平面形状とした。

自社ビルや低層ビルで自然換気の採用事例^{4) 5)}は多く見られるが、対象ビルの様にテナント貸かつ高層オフィスビルでの採用事例は少ない。これは実際の自然換気による熱除去効果を定量的に評価できているものが少なく、費用対効果に厳しい貸オフィスでの採用が難しいことや自然換気口からの物の落下といった安全対策が必要であることによる。Lim ら⁶⁾は風力換気を行うビルである瞬間の実測及びCFDによる検証を行い、山本ら⁷⁾はBESTを用いてシミュレーションを行い報告されているが、年間を通した実在する建物の自然換気量の把握に努めたものは少ない。本研究では実在する建物で実測された自然換気量と外部条件の関係や居住者の使われ方の実績等を明らかにする。

図-1 に示すように自然換気量は内外の様々な条件によって決定され、実測・シミュレーションと換気量予測手法も多くあり、それぞれを同時に計測されたものは少ない。

本論文では、今後の運用改善に向けた知見を得ること及び①濃度法、②風速法、③差圧法の3つの手法で実測により手法ごとの差異を明らかにする。また、差圧法による年間の自然換気量推定実績値を示す。なお、大会学術講演会での発表内容⁸⁾に加筆、再構成したものである。

^{*1} (株)日建設計	正会員
^{*2} 大阪大学	SHASE 技術フェロー
^{*3} 福井大学	正会員
^{*4} 四国職業能力開発大学校	SHASE 技術フェロー

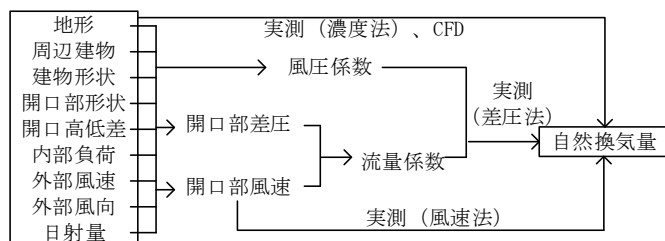


図-1 自然換気量の予測フロー

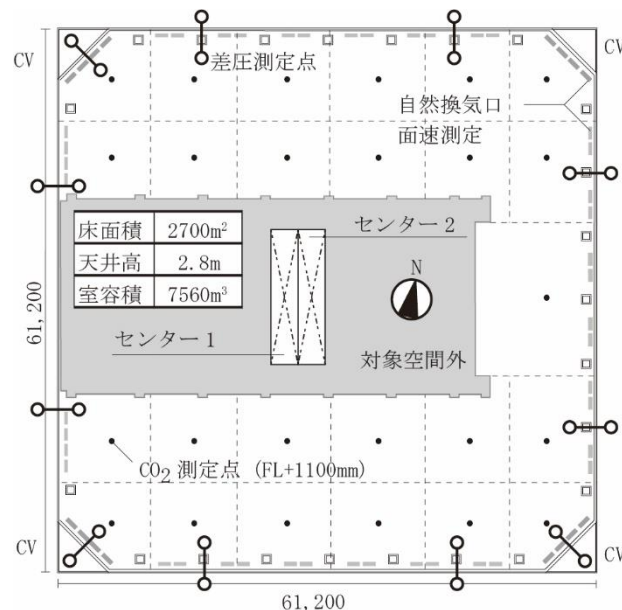
1. 自然換気システムと実測方法の概要

本建物の自然換気口は天井付近に設け自動で開閉できるものとし、各階に約 14m^2 (床面積の $1/200$ 程度) の開口を有する。また、テナント間仕切り対応のため、CVに加え、テナント割が発生した場合に追加される第1センターボイド(センター1)を有し、上階4フロアではCV及びセンター1への開口は閉鎖し、第2センターボイド(センター2)への開口が解放される。ただし、本研究ではワンフロア利用時を想定し、センター1,2への開口を閉鎖した条件で検証を行っている。図-2に対象ビルの平断面図及び各測定点を示す。CO₂、面風速測定(24F)は詳細実測時のみ、室内外差圧(14F、24F、34F)は自然換気開閉による影響がない外壁表面と室内天井内間に差圧計を設置し、BEMS上に60分ごとのデータが常時蓄積される。なお、上下階で推定されるフロア別自然換気量を均等に保つため、設計段階で換気回路網計算を行い、CVの有無及び開口面積を段階的に調整している。図-3に示すようにCVを全フロアで利用とした条件と本計画とを比較すると、低層部の換気量抑制と高層部の換気量増大により、25%程度の差に納められている。

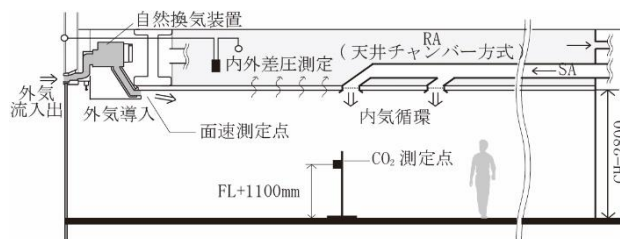
トレーサースガスとしてCO₂を用い、空調機の内気循環運転により空間内濃度が一様となった後に、空調機を止め自然換気口を開放し、室内CO₂濃度を減衰させた。FL+1.1mにてCO₂レコーダを用いて室内25点での濃度及び各自然換気口部にて小型温湿度計を用いて温度を測定し、同時に自然換気口での風速及び室内外差圧についても実測を行った。なお、外気風速及び風向は大阪管区気象台(中央区大阪城、地上高さ22.9m、海拔高さ31m)のデータを用いた。表-1のようにボイドの重力換気の効果検証のため、case1-1はボイドへの開口を閉鎖し風力みの条件とし、case2-1~5はボイドへの開口を開放し風力・重力併用の条件とした。

表-1 測定条件

	case1-1 風力	case2-1 風力+重力	case2-2 風力+重力	case2-3 風力+重力	case2-4 風力+重力	case2-5 風力+重力
測定日時	2013/1/12	2013/1/12	2013/1/13	2013/1/13	2013/1/14	2013/1/14
濃度上昇開始	14:50~15:20	11:52~12:08	13:17~13:25	17:10~17:25	10:21~10:49	13:50~14:20
空調機停止	15:55	12:33	13:59	15:55	11:17	14:40
自然換気開始	16:02~16:04	12:49~12:51	14:00~14:03	16:02~16:04	11:20~11:23	14:44~14:46
濃度減衰終了	16:40	14:00	15:00	16:40	11:55	15:28
外気風速[m/s]	3.3	3.0	1.5	1.3	2.9	0.6
風向[-]	SW	SSW	N	NNE	NNE	NW
外気濃度[ppm]	380	388	391	408	360	367
外気温度[℃]	8.6	8.1	9.3	9.0	5.2	7.5
外気湿度[%RH]	54	46	51	56	77	70



(a) 平面図及び測定点



(b) 断面での実測点

図-2 対象ビルの平面及び断面と測定点

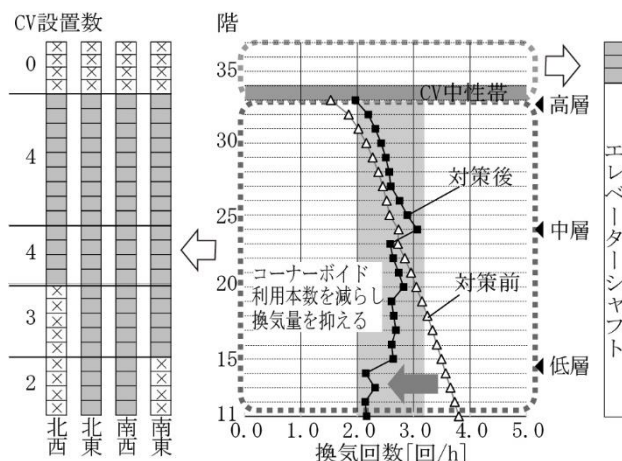


図-3 ボイド利用方法及び換気回路網計算の結果

2. 自然換気量実測結果

2.1 トレーサースガスによる換気量把握（濃度法）

トレーサースガス（CO₂）を用いた場合の減衰法における局所平均空気齢の算出式を式(1)に示す。局所平均空気齢は給気口から流入した新鮮外気が室内のある点まで到達するのにかかる平均時間として定義される。

$$\overline{\tau_p} = \int_0^{\infty} \frac{C_r(t) - C_o}{C_r(0) - C_o} dt \quad \dots\dots (1)$$

図-4のように測定データから濃度減衰を外気濃度まで回帰し、台形積分を用いて濃度減衰曲線と外気濃度直線に囲まれた部分の面積を求め、局所平均空気齢を算出した。

図-5に各条件における局所平均空気齢の分布を示し、各条件での室内25点のCO₂濃度変動を図-6に示す。なお、図中の矢印は自然換気口の流入出方向を示し、自然換気口に設置したタフトから推定している。case1-1では、風上の南西側において局所平均空気齢が小さく、新鮮外気が早く到達し、風下の北側では局所平均空気齢が大きく、外気の到達に時間がかかる。南西側の建物外皮の自然換気口から流入した新鮮外気の一部が北側まで到達することなく他面の自然換気口から流出することが原因と考えられる。case2-1では、風上の南西側と風下の北側で分布はあるものの、全体的に局所平均空気齢が減少し、分布が小さく、新鮮外気が全方位の自然換気口から流入し室内空気が各CVに誘引され流出することで、流入外気が室全体に行き渡る結果となる。case2-5では、室内各点における局所平均

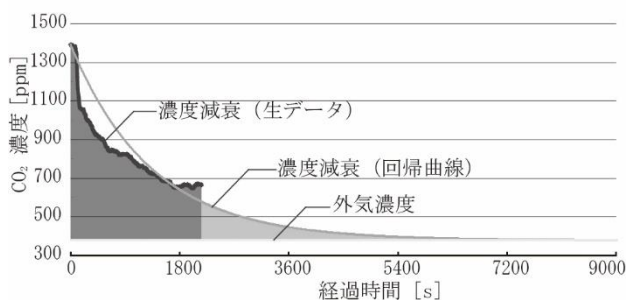


図-4 局所平均空気齢の算出方法

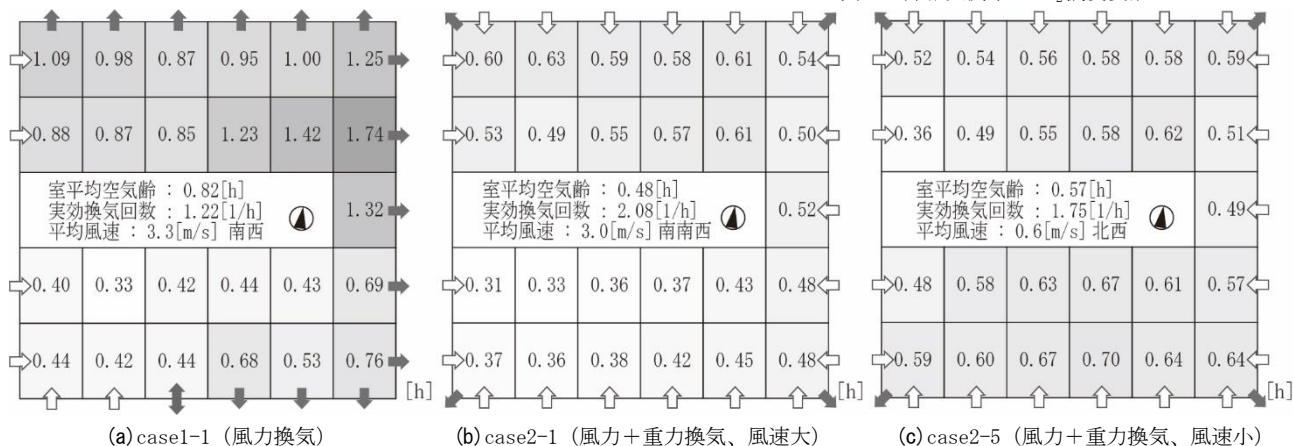
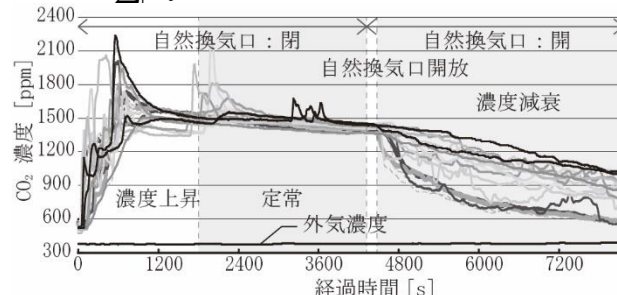


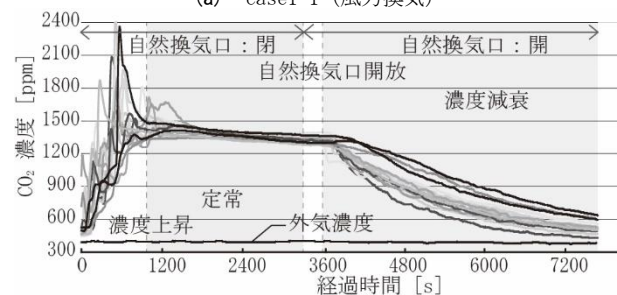
図-5 各条件における局所平均空気齢

配性状がさらに一様となる。外部風が弱いため CV の誘引空気齢の分布はほぼ見られず、新鮮外気の室内各所への分効果が卓越し、全方位から外気が均一に流入したと言える。本研究では式(2)のように局所平均空気齢の平均値の逆数を実効換気回数と定義し、他の測定手法と比較を行う。ただし外気導入分のみの換気効率を評価するため、厳密な意味での換気回数とは異なることには留意が必要である。

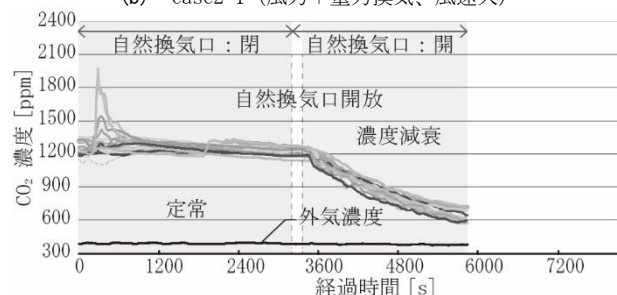
$$N = \frac{25}{\sum_{i=1}^{25} \tau_p} \quad \dots\dots (2)$$



(a) case1-1 (風力換気)



(b) case2-1 (風力+重力換気、風速大)



(c) case2-5 (風力+重力換気、風速小)

図-6 詳細実測中のCO₂濃度変動

2.2. 換気口面風速による換気量把握（風速法）

自然換気時の流入・流出状況は小型温湿度計により各自然換気口部の温度測定し把握した。図-7のように流入側では空気温度が外気温近くまで低下し、流出側では室内空気が流れるため、温度はあまり低下しない。執務室に流入する外気量を把握するため、図-8に示すように自然換気口における風速測定を行う。測定時の風向に合わせ、無指向性熱式風速計を北面12個、東面12個、西面の北側4個の換気口に設置した。換気口部温度測定より流入出を判断し、測定風速に換算係数及び開口面積を乗じて、換気量を算出した。なお、自然換気口において21測定点の風速と分割した領域の面積から算出した換気量を代表測定点の風速と自然換気口面積で除した面積重みづけ平均と換算係数とする。図-9で平均風速2.9m/s、0.6m/sの測定結果について検討を行う。case2-4では測定時の主風向は北北東であり、西面南側を除き、風速測定点で流入側となり、風速結果から総流入量は25,912m³/h、西面の南側も北側同様の値と推定すれば27,412m³/h (25,912+1,480) となる。北面においては開口部ごとに換気量にばらつきがある。case2-5では測

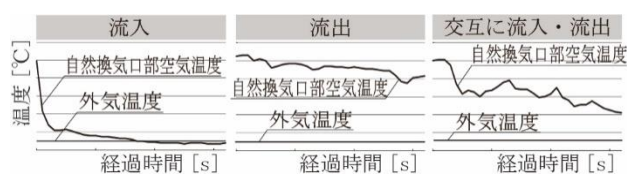
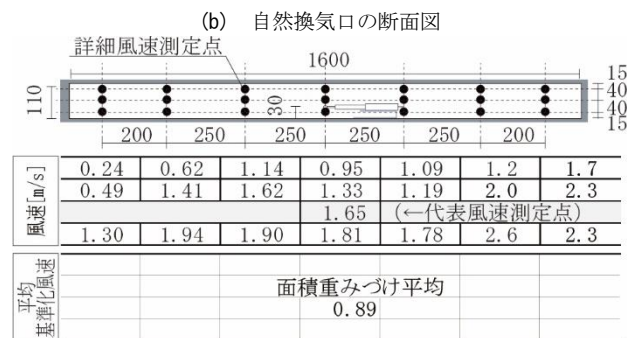
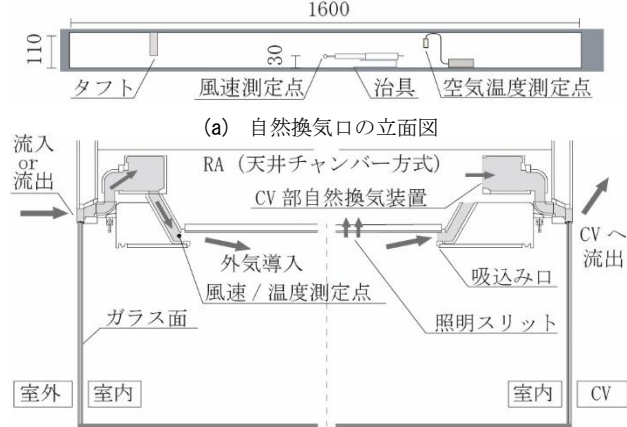
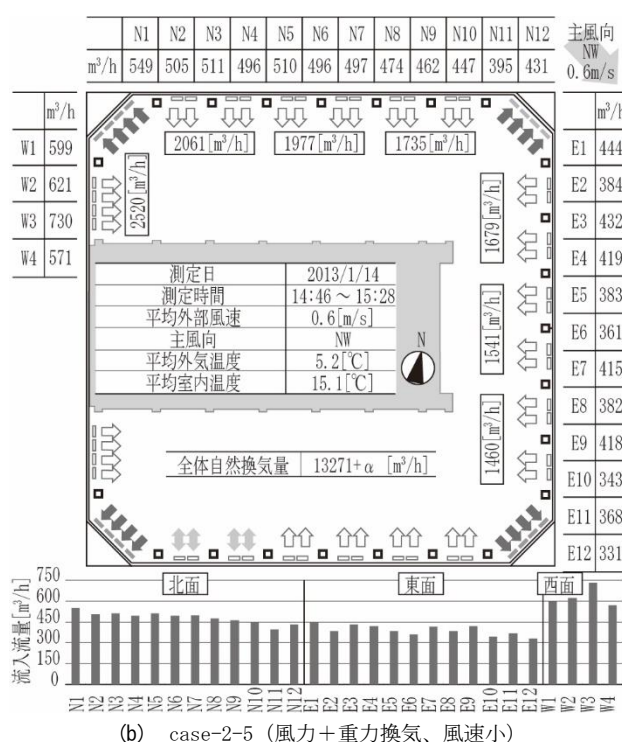
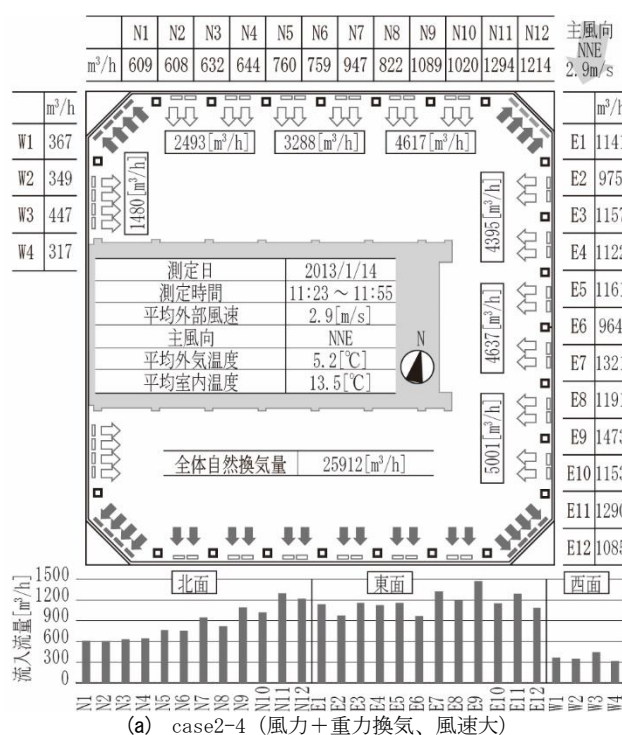


図-7 流入流出の判断方法



(c) 面風速詳細測定位置と結果
図-8 自然換気口の面風速測定点

定時の主風向は北西であるが、換気口部での温度推移から東西南北の全面から外気が流入し、壁面ごとの換気量のばらつきは少ない。仮に流入流量にばらつきがなく、南面1,500m³/h×3、西面(南側)2,500m³/hの外気が流入していれば、総流量は20,271m³/hとなり、case2-4の74%に相当し、外部風速比0.21(0.6÷2.9m/s)に比べ非常に大きく、換気量が低下していないことがわかった。



2.3. 差圧計測による換気量把握（差圧法）

式(3)により換気量は計算でき、自然換気装置の流量係数を実物大模型実験及び運用前実測により求めることで、運用後の室内外差圧（オフィス低層（14F:65m）、中層（24F:105m）、高層（34F:150m）の各壁面2点×4方位及び4つのCV面）の測定結果から換気量を推定できる。

$$Q = 3600 \times \alpha A \sqrt{\frac{2}{\rho} |\Delta P|} \quad \dots\dots (3)$$

運用前実測で空調機により強制的に外気を導入し自然換気口を開放させ排気した状態で、室内外差圧と換気口面風速を測定し換気装置の性能を示す流量係数を図-10のように求めた。ここではCVの両端の2ケのみを示し、その他CVの中央、スリットについて同様に行った。表-2のように外壁スリット部分で0.42程度の流量係数を有し、コーナー部分では0.52程度と大きな流量係数となる。CVは外気に直接接していないため、突風対策及び漏水対策が不要であり、クランクが少なく大きな値となる。階ごとのCV有無により壁面スリット数及びセンター1の開口面積を変更し換気量をある程度均一にしている。図-11に2014/4/1～2015/3/31までの差圧計測結果を示す。低層では凸部は±0Paであるが、中層で-15Pa程度、高層で-25Pa程度と上階ほど内外差圧が負側へと移行する。対象ビルが高層であるため、エレベーターシャフト・階段等のドラフトにより上階ほど室内圧自体が大きいことによると考えられる。また、上階ほど最大最小の圧力差が大きく・突度が小さくなっており、風速が上階ほど速く、強弱も大きいことによる。各条件での流入量（正）、流出量（負）及び平均値を表-3、図-12に示す。流入流出の風量に差が生じたが、天井内と室内に圧力差が生じていること及び各差圧計位置での室内圧が同一でない可能性が考えられる。本研究では流入流出の平均値を自然換気量とみなす。

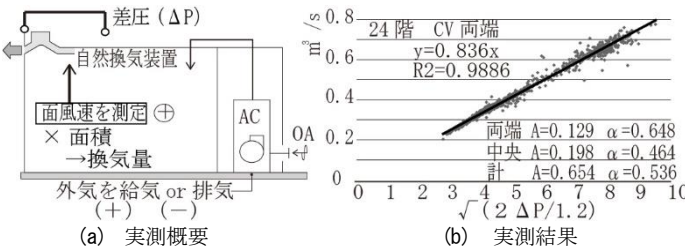


図-10 自然換気口PQ測定

表-2 自然換気口概要

場所	階	開口面積[m²]				流量係数 [-]	
		北	南	東	西		
壁面スリット	11~37	1.60 ~1.86	1.60 ~1.86	1.60 ~1.86	1.06 ~1.33	0.412	
センター1	11~33	4~19.2				-(ガリ)	
センター2	34~37	19.2				-(ガリ)	
CV	24~33	0.654×4本				0.536	
	20~23	0.524×4本					
	15~19	0.524×3本					
	11~14	0.524×2本					

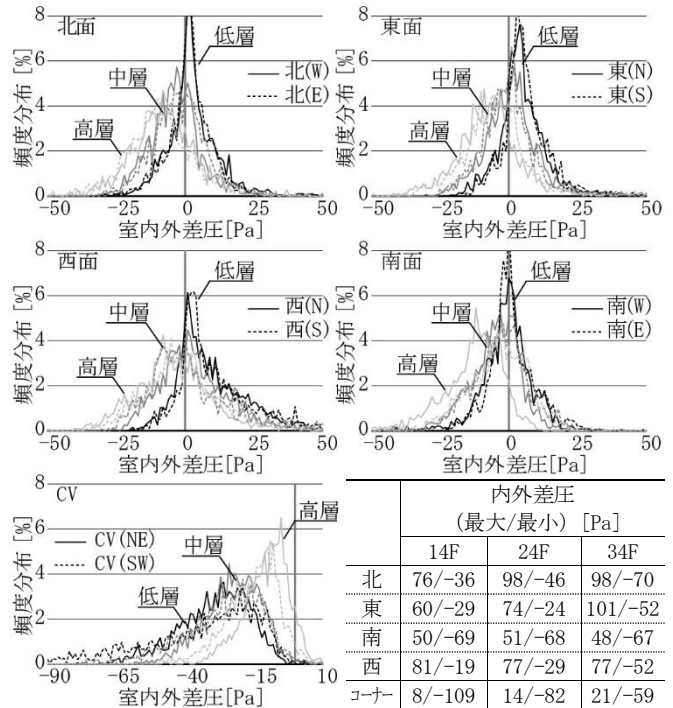


図-11 室内外差圧結果

表-3 各ケースにおける差圧計測の結果

case	方式	流入[m³/h]	流出[m³/h]	平均[m³/h]
1-1	風力	+10,071	-11,010	10,541
2-1	風力+重力	+17,180	-24,575	20,878
2-2	風力+重力	+13,708	-21,621	17,665
2-3	風力+重力	+14,486	-22,382	18,434
2-4	風力+重力	+18,348	-28,817	23,583
2-5	風力+重力	+10,202	-21,950	16,076

CV (NW)	北 (W)	北 (E)	CV (NE)	北 (W)	北 (E)	CV (NE)
-	-2,228	-3,				

3. 各測定法で求めた自然換気量の比較

図-13 に示した 6 ケースについて、各手法で求めた換気量を比較した。風力換気による換気量は外部風速に比例し、重力換気による換気量は内外差圧の平方根に比例する。

各ケースの外部風速と換気量の相関について、風力換気時には 0 を切片とし回帰直線を作成した。測定手法別のグラフは外部風速の増大とともに換気量が増加し、回帰直線の傾きはほぼ風力換気のみと同様で切片の位置分だけ換気量が得られる。

風速法による推定値が差圧法に比べて相対的に大きくなっており、風速測定点が全開口ではないため多少過大に見ている可能性がある。濃度法による推定値が差圧法より小さくなり、自然換気口が流入、流出口共に天井面付近であるため、居住域まで外気が落ちることなく室天井付近での流れがある可能性がある。いずれの値も換気回数 0.5 回/h 以内と差異は小さく差圧法による風量推定は有効といえる。

各ケースの内外温度差の平方根と換気量の相関について、水平風力換気時は温度差による変化はないものとし傾きを 0 とした。重力換気併用時はいずれも内外温度の増大とともに換気量が増加し風力換気のみとの差は大きい。なお、case2-5 は外部風が著しく小さく、換気量が小さくなり、case2-1, 2-4 は風速が大きく換気量が大きくなる。

4. 差圧を用いた年間の自然換気量の把握

データは'14 年 4 月～'15 年 3 月ですべて 1 時間平均値を用いた。なお、ここでは年間自然換気量のポテンシャルを知るため差圧測定値には未入居などによる自然換気口が閉鎖された条件のデータについても流入流出量が等しくなる室内圧を想定し、各開口内外差圧差を設定しなおし自然換気量を求めた。図-14 に差圧結果から求めた自然換気量と出現頻度をフロアごと、ボイド有無について計算を行った。ボイドを用いることで自然換気量平均値の大幅な増大及び換気量の小さな領域が減り、一定以上の換気が得られる。ボイド利用時、低層ではなく中層で換気量が最大となり、換気回路網計算で確認した通りであり、平均値の差異も低層/中層で 82% (18,583/22,662)、高層/中層で 72% (16,233/22,662) となり概ね計画通りの結果となった。

ま と め

差圧法は年間計測が可能であり、自然換気の運用如何に関わらず換気量が推定できる。室内の新鮮外気量分布の把握には濃度法が有効である。その他、以下の知見を得た。

1) トレーサーガスによる換気量把握

風力換気のみでは風下側で空気齢が小さくなる箇所が現れる。風力+重力換気では外部風が小さければ全方位から均等に外気が流入し均一な空気齢となる。

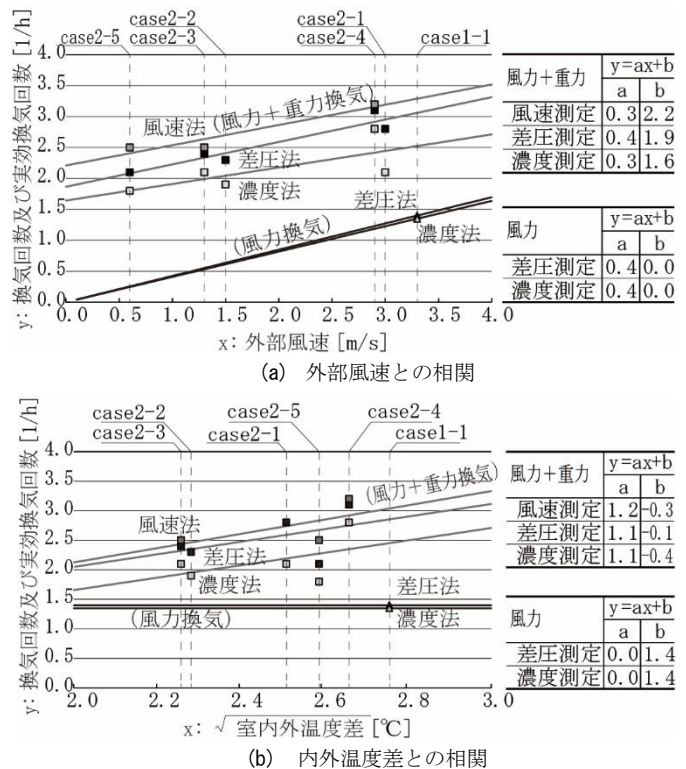


図-13 手法ごとの自然換気量と各条件の関係

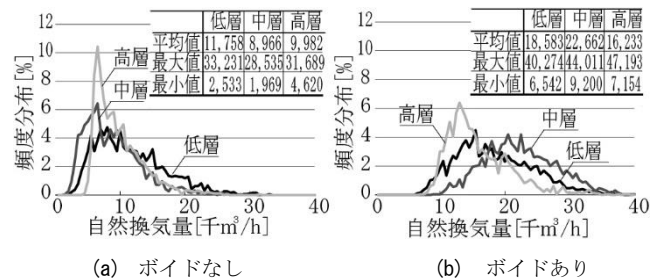


図-14 年間自然換気量と頻度分布

2) 換気口面風速による換気量把握

開口部ごとの流量が把握でき換気量が予測できた。

3) 差圧計測による換気量把握

流量係数は自然換気口で外壁面 0.42、ボイド面 0.52 程度となった。詳細実測を行った 24 階以外においても常時換気量の把握が行える。

4) 3 手法ごとの換気量推定値の違い

差圧法に比べ、風速法は大きめに、濃度法は小さめに出現しているが差異は小さく自然換気開閉条件、外部条件の変化に合わせて推定換気量が同様に変化した。

5) 差圧を用いた年間自然換気量

ボイドの有無により換気量は大きく変わる。ボイド利用本数などを変更したことで各階の自然換気量の差異は小さくなる。

今後は自然換気時の内部環境の実測・アンケート調査、自然換気運用の実績

記 号

τ_p	: 局所平均空気齢	[h]
C_r	: 室内 CO ₂ 濃度	[ppm]
C_o	: 外気 CO ₂ 濃度	[ppm]
N	: 実効換気回数	[1/h]
Q	: 自然換気量	[m ³ /h]
α	: 流量係数	[-]
A	: 自然換気開口面積	[m ²]
ρ	: 空気の密度	[kg/m ³]
ΔP	: 室内外差圧	[Pa]

謝 辞

本研究において熱心なるご指導、ご助言を頂いた故甲谷寿史教授（大阪大学）に深謝いたします。本研究の遂行に当たり、当該ビルのオーナーのご理解とご協力に感謝します。また、大阪大学元大学院生の大森啓充、田中俊祐の各氏には、実測及び本論文で使用したデータの整理に多大な助力を得た。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 水出喜太郎, 石野久彌, 郡公子, 永田明寛, 長井達夫, 大高一博, 大原千幸: 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, pp69-76, 2006, 06
- 2) 落合奈津子, 山中俊夫, 甲谷寿史, 桃井良尚, 相良和伸, 長

谷川巖, 豊村幸毅: テナントオフィスビルにおける太陽熱とファンを併用した自然換気システムに関する研究, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.89-92, 2013.9

- 3) 左勝旭, 菊池卓郎, 和田一樹, 田中規敏, 堀慶朗, 直井康二: ダブルスキンプファサードによる日射遮蔽と室内自然通風の一体的な計画と実施 (第 1 報) ~ (第 2 報), 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.265-268, 2012
- 4) 日本建築学会: 実務者のための自然換気設計ハンドブック (2013), 技術堂出版
- 5) 高村秀紀, 青山純也, 中川滋, 西本真道: 大平面オフィスに導入された自然換気システムの性能評価, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, No.253, pp.9-21, 2018.04
- 6) LIM EUNSU, 相良和伸, 山中俊夫, 甲谷寿史, 杭瀬真知子, 山際将司, 堀川晋: 自然換気併用空調を有するオフィス空間における温熱・空気環境形成メカニズム, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, No.141, pp.19-27, 2008
- 7) 山本佳嗣, 村上周三, 石野久彌, 郡公子: 温度差を利用した自然換気及びハイブリッド空調の省エネ効果に関する研究, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, No.233, pp.1-10, 2016.08
- 8) 田辺慎吾, 高山眞, 山中俊夫, 甲谷寿史, 桃井良尚, 相良和伸, 大森啓充, 田中俊祐, 岡本尚, 和田一樹, 田中規敏: コーナーボイドを有する高層オフィスビルの自然換気性能に関する研究 (その 3) ~ (その 5), 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.129-140, 2013

(令和 2.6.10 原稿受付)

Natural Ventilation Performance of High-rise Office Buildings with Corner voids

Part1—Ventilation Rate by Differential Pressure Measurement

by Shingo TANABE ^{*1}, Toshio YAMANAKA ^{*2}, Yoshihisa MOMOI ^{*3} and Kazunobu SAGARA ^{*4}

Key Words: Experiment, Measurement, BEMS, Office

Synopsis : This study aimed to establish a method for operating the natural ventilation systems for high-rise office building with corner voids. A case study on the existence of voids was also performed by evaluating the natural ventilation rate and its frequency. It was found that by providing the natural ventilation voids a relatively large natural ventilation rate would be stably

obtained, and the system could work effectively to remove internal sensible heat load.

In addition to the flow rate estimation based on pressure difference measurement, other methods to measure flow rate, i.e., the tracer gas technique and velocity measurement at the NV openings, were also used to verify that there were no significant differences in the estimation based on pressure measurements.

(Received Jun 10, 2020)

^{*1} Nikken Sekkei Ltd., Member

^{*2} Graduate School of Engineering, Osaka University, Fellow Engineer

^{*3} Graduate School of Engineering, Fukui University, Member

^{*4} President, SHIKOKU Polytechnic College, Fellow Engineer