越屋根を有する戸建住宅の自然換気量計算

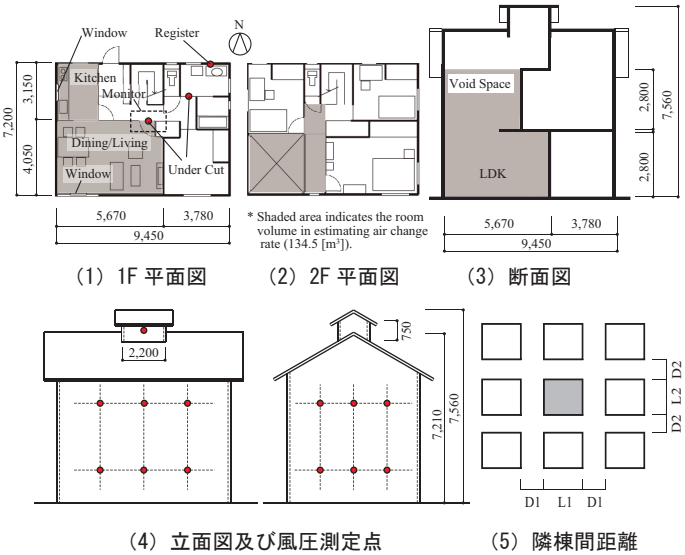
正会員　○　小林　知広 [*1]　　同　　梅宮　典子 [*2]

自然換気　　p-Q 特性　　越屋根

1. はじめに

住宅の高気密・高断熱化が進み、それに伴う換気不足によるシックハウス症候群を防止するため平成 15 年には建築基準法の改正により居室への機械換気装置の設置が義務化された。機械設備により良好な室内環境を安定して提供することは重要であるが、省エネルギー及び快適性の観点からは、パッシブな手法を利用して自然換気可能時間を長く確保することは重要である。本報では住宅の自然換気を対象として、風圧係数差が小さく換気量の確保が難しい密集市街地等においても効率的に自然換気を促進することが期待できる建築要素の一つとして越屋根に注目した。

越屋根の空気流動性状は、古くは佐藤 [1] や渡邉ら [2] により研究がなされ、石原 [3] は越屋根の換気性能が有風時に外部風向等により変化する問題を取り上げた。両側に開口を有する越屋根は、風向や換気量により全体の抵抗係数が複雑に変化するため開口の流量係数を一定とする従来の換気計算が適用できず、換気量の予測には p-Q 特性 (室内圧と換気量の関係) が必要となる。これまでに筆者ら [4] は風洞実験により p-Q 特性を整備するとともに風圧係数データを取得することで換気駆動力の評価を行った。また、定量的な換気量の評価を行うため、単室を対象とした CFD 解析により換気量を算出し、定常状態での換気量算定手法の妥当性及び越屋根を用いた換気性状の検証と評価を行った [5]。さらにこれまでに気象データを用いて年間での自然換気量の評価を行っているが [6]、これらは単室を対象としていたことから換気経路の抵抗が小さい条件下での評価と言える。そこで本報では、複数室にまたがる換気経路を設定し、気象データを使用して風力と重力を考慮した年間換気量計算を行うことで、越屋根を有する住宅の自然換気性能を評価することを目的とする。



(1) 1F 平面図　(2) 2F 平面図　(3) 断面図

(4) 立面図及び風圧測定点　(5) 隣棟間距離

図 1 計算対象建物

2. 計算対象建物

本報では、武部ら [7] の研究で用いられた住宅モデルを対象建物として使用した。**図 1** にその概要を示す。日本建築学会標準住宅問題を参考に作成された形状であるが、リビングは吹き抜けを有するプランである。計算の対象地域は大阪とし、対象建物の周辺にも建物が存在する状況を想定した。周辺建物との隣棟距離は、既報 [8] の風洞実験により取得した風圧係数データを使用するため、**図 1 (5)** 中の D1/L1 = D2/L2 = 1.0 (D: 建物間の距 離、L: 建物の幅) を想定した。**図 1(4)** 中のプロットは既報 [8] の風圧測定点を表しているが、換気量算定時の一般開口の風圧は最も近い風圧測定点の風圧係数に基づいて算定した。なお、後述の換気量算定結果を換気回数として表記する際の室容積は 134.5 m³ とするが、これは 2 層分の高さに基づいたもので勾配屋根内部の容積は考慮していない。

3. 換気量計算

3.1 換気量計算概要

越屋根による自然換気のポテンシャルを評価することを目的として、拡張アメダス標準年データの気温、風向及び風速データと既往の研究の風圧データ [8] を用いて年間の換気量計算を行った。換気駆動力は風力のみの場合と風力 + 温度差を考慮した場合の両方の計算を実施した。

(1) 風力換気計算

圧力損失を考慮して越屋根両側開放時と越屋根片側開放時を計算する。越屋根両側開放時の換気量計算には後述する越屋根の p-Q 特性が必要であるため、既往の研究 [4] により整備された越屋根の p-Q 特性を用いて計算を行う。

(2) 風力 + 温度差換気計算

温度差と風力の影響を考慮した年間換気量計算を行う。風力換気計算時と同様に圧力損失を考慮し、室内温度については、夏期 (6 ~ 9 月)、中間期 (4 ~ 5 月、10 ~ 11 月)、冬期 (12 ~ 3 月) によって 26 ℃、24 ℃、22 ℃と季節に応じ

Prediction of Natural Ventilation Rate of a Detached House with Monitor Roof

KOBAYASHI Tomohiro, UMEMIYA Noriko

表 1 開口部の換気抵抗の取り扱い

	Opening Area [m²]	Discharage Coefficient [-]
Monitor Roof (Bottom opening)	2.4 × 1.5	p-Q curve
Monitor Roof (Window)	2.2 × 0.75	0.65
Window (Living)	1.0 × 1.0	0.65
Window (Kitchen)	1.0 × 1.0	0.65
Undercut	0.9 × 0.015	0.65
Register (150φ)	$\alpha A = 7.68 \times 10^{-3}$	
Register (100φ)	$\alpha A = 3.41 \times 10^{-3}$	

表 2 開口部において使用した風圧係数

Wind Direction	Wind Pressure Coefficient				
	Register	Monitor Roof (S)	Monitor Roof (N)	Living Window	Kitchen Window
N	-0.134	-0.243	0.298	-0.099	-0.107
NE	-0.288	-0.470	-0.018	-0.119	-0.194
E	-0.101	-0.273	-0.261	-0.072	-0.064
SE	-0.014	-0.018	-0.470	-0.160	0.017
S	-0.097	0.298	-0.243	-0.138	-0.132
SW	-0.119	-0.018	-0.470	-0.288	0.017
W	-0.072	-0.261	-0.273	-0.101	0.015
NW	-0.160	-0.018	-0.047	-0.014	0.017

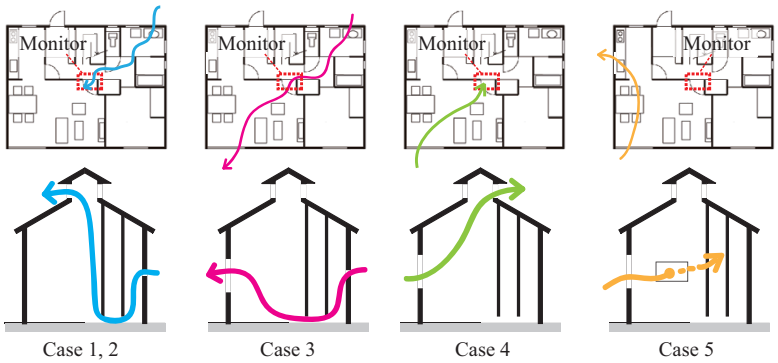


図 2 換気経路の計算条件

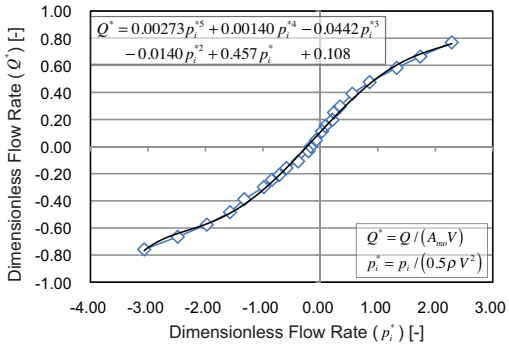


図 3 風向 0 度条件での越屋根の p-Q 特性

て一定の室温を仮定した。なお越屋根両側開放時の計算では越屋根基部高さの室内圧と静止外気圧をそれぞれ P_i と基準静圧として p-Q 特性は温度によらず共通の式を用い、風向が変化した場合のみ異なる p-Q 特性を用いる。

3. 2 換気経路及び各種計算条件

換気経路は**図 2** に示す通り、Case 1 : 150φ レジスター - アンダーカット - アンダーカット - 越屋根、Case 2 : 100φ レジスター - アンダーカット - アンダー カット - 越屋根、Case 3 : 150φ レジスター - アンダ ーカット - アンダーカット - リビング側窓、Case 4: リビング側窓 - 越屋根、Case 5: リビング側窓 - キッ チン側窓の 5 パターンとして計算を行った。Case 1 ～ 3 は換気を想定して給気用レジスターを用いた経路であり、Case 4, 5 は通風を想定して窓開放を想定している。越屋根を用いる条件では片側開放 (南側開放、北側開放) と両側開放の場合を考慮するため、計算条件数は 11 となる。また、レジスターの有効開口面積はカタログ値に基づいた想定であり、アンダーカットの寸法は 900 ×15mm とした。各開口部の面積及び抵抗値等の換気量算定における諸条件を**表 1** にまとめて示す。越屋根片側開放時は一般的な換気の式に基づいて計算を行ったが，基部からの流入出に応じて拡大 / 縮小の圧力損失係数（それぞれ $\zeta = 0.57, 0.41$）を見込み、越屋根開口からの流入出時には曲がりの圧力損失係数（$\zeta = 1.25$）を与えた。また、各開口部において使用した風圧係数を**表 2** に示す。

3. 3 p-Q 特性を用いた換気量計算

既往の研究 [4] では建物模型の越屋根の越屋根開口部両側のみに開口を設け、室の下部からファンにより強制的に給排気を行うことで、室内圧と越屋根基部通過風量の関係 (p-Q 関係) を求めた。このときの室内圧を外部風による速度圧で、基部風量を越屋根基部面積及び外部風速により無次元化することで、p-Q 関係は概ね 1 本の曲線で表現されることを示した。これにより p-Q 関係は外部風向のみによって決定され、外部風速によらず予測すること可能となる。このように得られた無次元換気量 [$Q^*=Q/(V \cdot A_{mo})$] と無次元室内圧 [$P_i^*=P_i/(0.5\rho v^2)$] の関係（p-Q 特性）を多項式近似により関数で表現し、得られた近似式の係数を用いて気象データに応じて時刻ごとに有次元の p-Q 関係に戻し、越屋根基部通過風量 (Q_{mo}) を室内圧 (P_i) の関数として表す。本報では全ケースにおいて 5 次式近似とした。**図 2** に風向 0 度における p-Q 特性の例を示す。本報ではリビングから越屋根までの経路を通過する換気量（Q_{mo}）を p-Q 特性に基づいて表した式と、従来の換気の式に基づいてリビングから側窓までの経路で考えた圧力損失の式を用いて収束計算により換気量の算定を行った。なお、本研究では外部風向を 8 風向として換気量計算を行うため、対称性を仮定して風向 45 度と風向 90 度の計 3 種の p-Q 特性[註)] を使用して越屋根両側開放時の計算を行う。

4. 結果と考察

4. 1 換気量計算結果

図 4 に Case 1 ~ 5 における風力、風力 + 温度差換気時の年間換気計算結果を 24 時間ごとに平均して示す。また、**表 3** に換気量 Q [m³/h] の絶対値と換気回数 n [回 / h] の年間平均値を示す。なお、Case 5 においては両側窓の設置高さを等しいと想定したため温度差の影響はない。温度差を考慮した結果を見ると概して冬期に換気量が大きくなっているが、これは室内外の温度差が大きいためと言える。

換気を目的に越屋根を用いる Case 1 と Case 2 について

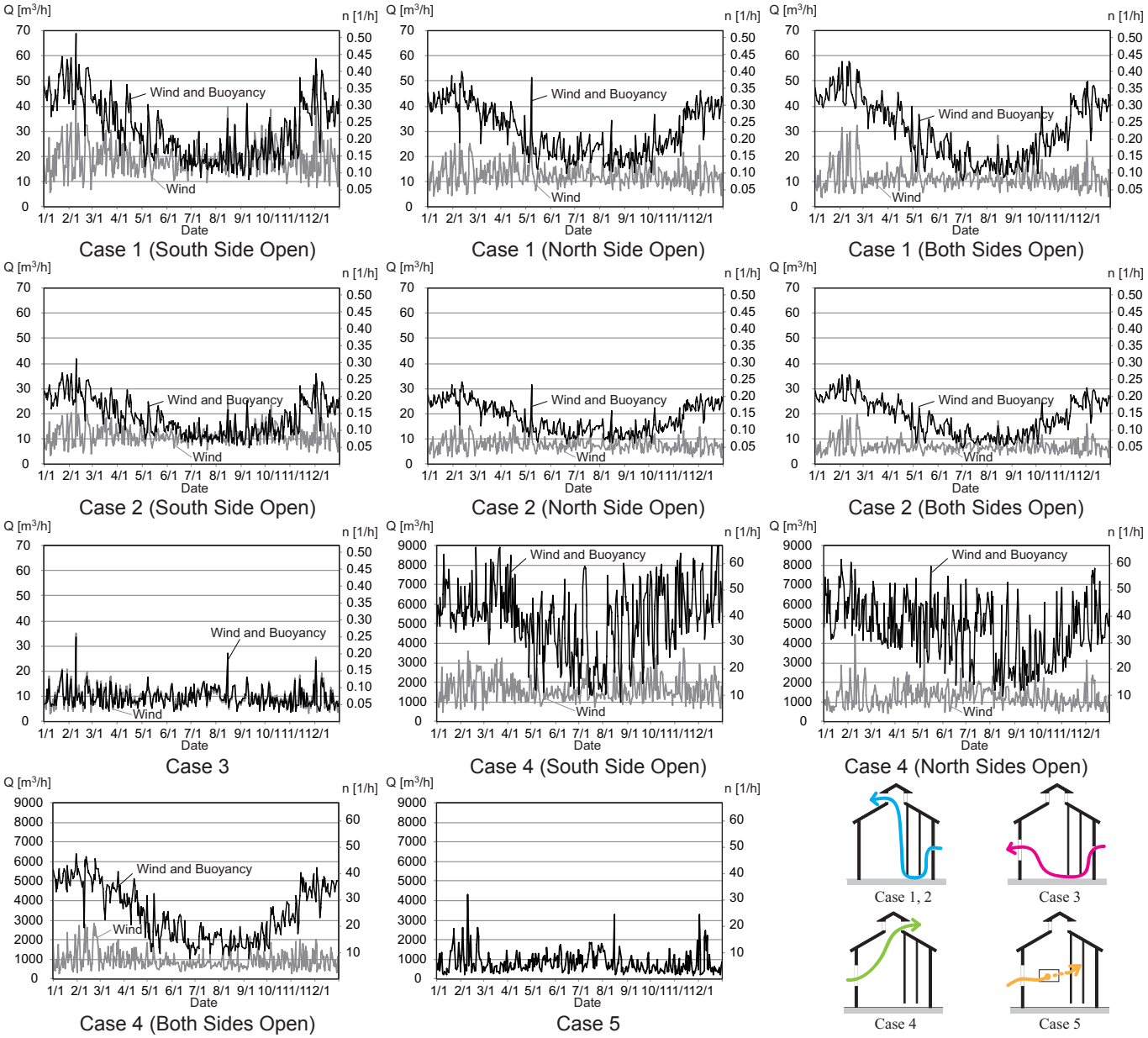


図 4 換気量及び換気回数の年間計算結果

見ると、風力 + 温度差換気では南北の越屋根側窓のどちらを開放しても結果に大きな差は見られないが、風力のみの場合では北側開放と比べて南側開放の方が 1.5 倍程度大きくなっている。これはレジスターを対象住宅北面に設置したために南側開放の方が風圧係数差が大きい時間帯が多かったためと考えられる。両側開放と片側開放を比較すると、換気量に大きな差異は見られなかった。これについては片側開放時の換気抵抗等の評価に精度向上の余地があるとは言えるが、両側開放と片側開放で基部面積が変わらないことと、レジスターやアンダーカットが相対的に大きな換気抵抗になっているため、このような条件下では比較的大きな開口部の抵抗の違いによって換気量に大きな差異が生じなかったものと考えられる。また、Case 1 と Case 2 の違いに着目すると、同じ開閉条件で Case 1 では換気量が 1.5 倍強となっているが、大きな抵抗となる箇所の有効開口面積の違いが影響したと言える。

同様に換気を目的として、越屋根ではなくリビングの側窓を開放した Case 3 では、温度差を考慮した条件で換気量の平均値が 10 [m^3/h] 程度となっており、30 [m^3/h] 程度を示した越屋根を用いた場合（Case 1）の 1/3 程度の換

表 3 換気量及び換気回数計算結果の年間平均値

Flow Path Condition	Opening Direction of Monitor	Wind		Wind + Buoyancy	
		Air Flow Rate (Q) [m^3/h]	Air Change Rate (n) [1/h]	Air Flow Rate (Q) [m^3/h]	Air Change Rate (n) [1/h]
Case 1	South Side	19.01	0.141	31.07	0.231
	North Side	12.79	0.095	29.96	0.223
	Both Sides	11.45	0.085	30.39	0.226
Case 2	South Side	11.62	0.086	18.95	0.141
	North Side	7.81	0.058	18.29	0.136
	Both Sides	7.04	0.052	18.66	0.139
Case 3	N/A	9.86	0.073	9.55	0.071
Case 4	South Side	1642	12.21	5273	39.2
	North Side	1273	9.46	4694	34.9
	Both Sides	957	7.12	3392	25.2
Case 5	N/A	825	6.14	825	6.1

気量に止まっている。このことから、2 層吹き抜けの勾配屋根部に越屋根を設置した場合の換気促進効果に関しては風力も期待できるが、温度差も大きな駆動力と言える。このように越屋根を何らかの給気口や換気経路とともに用いた場合、機械換気装置ほど十分な換気量を安定的に供給することはできないものの、一定の自然換気促進効果を期待することができると言える。

一方、通風を目的として越屋根とリビングの側窓を開放した Case 4 では、周辺建物が存在する条件であっても年間平均値では25～40 [回/h] 程度の換気量が得られており、換気駆動力を確保し難い Case 5 と比較すると換気量に大きな差異が見られた。また、主に通風を必要とする夏期のみに着目して見ても越屋根を用いる Case 4 で概ね 20 [回 / h] 程度、側窓間で通風を行う Case 5 で 6 ～ 7 [回 /h] 程度の換気回数となっており、通風促進の効果も十分に期待することができると言える。

4.2 建物内の換気抵抗の影響

本報ではアンダーカットやレジスターを通過する Case 1 ～ 3 のように、ボトルネックとなるような抵抗を複数通過する際の換気量評価を主な目的としている。そこで新たに Case 6 としてリビングに 150φ レジスターを設置した条件を設定しの、150φ レジスター - 越屋根の経路を設定し、Case 1 と比較することでアンダーカット ×2 を通過することの影響を確認する。**図 5** に Case 6 における換気量算定結果を示す。また、**表 4** に換気量の年間平均値を示す。

風力と温度差を考慮した条件において、Case 6 は夏期で概ね 30 [m^3/h]、冬期も含めた年間平均で 45 [m^3/h] 強の換気量となっており、Case 1 と比較すると大きな換気抵抗が削減されたことで概ね 1.5 ～ 2 倍程度の換気量となることがわかった。この条件であっても室内の空気質を良好に保つために十分な換気量を常に確保できるとは言い難いが、自然換気補助装置としては有効に働くとが言える。

表 4 換気量及び換気回数計算結果の年間平均値（Case 6）

Flow Path Condition	Opening Direction of Monitor	Wind		Wind + Buoyancy	
		Air Flow Rate (Q) [m^3/h]	Air Change Rate (n) [1/h]	Air Flow Rate (Q) [m^3/h]	Air Change Rate (n) [1/h]
Case 6	South Side	29.48	0.219	49.10	0.365
	North Side	18.53	0.138	46.88	0.349
	Both Sides	20.21	0.150	48.12	0.358

5. まとめ

本報では、越屋根付設住宅を対象として換気と通風のそれぞれ想定した換気経路で自然換気量の年間計算を行った。越屋根を用いた換気は側窓等を用いた条件と比較して年間平均で 2 ~ 3 倍の換気量が得られる結果となった。越屋根開口と給気口の併用した場合でも 24 時間機械換気と同等の安定した換気効果を確保することは難しいと考えられるが、複数の室を通過する経路でもパッシブな自然換気補助装置として一定の効果は期待することができる。

註）

p-Q 特性は無次元室内圧（P_i*）が概ね -3.0 ～ 1.5 となる範囲で近似しており、風向 45 度と 90 度の近似式はそれぞれ以下の式で与えた。

・風向 45 度 : $Q^* = 7.58\times10^{-4} P_i^{*5} - 6.21\times10^{-3} P_i^{*4} - 4.32\times10^{-2} P_i^{*3} + 2.52\times10^{-2} P_i^{*2} + 4.84\times10^{-1} P_i^* - 1.01\times10^{-1}$

・風向 90 度 : $Q^* = -3.96\times10^{-4} P_i^{*5} - 1.04\times10^{-2} P_i^{*4} - 4.84\times10^{-2} P_i^{*3} + 9.01\times10^{-2} P_i^{*2} + 4.86\times10^{-1} P_i^* + 2.22\times10^{-1}$

謝辞

本研究を推進するにあたり、竹本梨花氏（研究当時 大阪市立大学卒論生、現大和ハウス工業（株））に多大なる尽力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1) 佐藤鑑 :「在來モニターと遮光併用モニターとの風力による自然換氣の比較試驗」, 建築學會論文集 第 13 号 , pp.360-369, 1939.4
2) 渡邉要 , 勝田高司 :「南方住居の斷面型と通風徑路 (第 2 部)」, 日本建築學會論文集 第 32 ～ 35 号 , pp.43-36, 1947.6
3) 石原正雄 : 建築換気設計 , 朝倉書店 1969
4) 小林知広 , 山中俊夫 , 甲谷寿史 , 相良和伸 , 丸橋靖明 , 田辺慎吾 : 勾配屋根を有する独立住宅に設置された越屋根の換気特性 , 日本建築学会環境系論文集 , 第 653 号 , pp.595-601 , 2010.7.
5) T. Kobayashi, T. Chikamoto, K. Osada : Evaluation of Ventilation Performance of Monitor Roof in Residential Area based on Simplified Estimation and CFD Analysis, *Building and Environment*, Vol. 63, pp.20-30, 2013. 5.
6) 長田啓志 , 小林知広 , 近本智行 : 風力換気促進装置を有する住宅の換気性能に関する研究（第 4 報）装置周辺の気流性状の把握と単室の換気量計算 , 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集 , pp.33-36, 2013.3
7) 武部敬輔 , 近本智行 : 吹き抜けを持つ戸建住宅における自然エネルギー利用に関する研究（その 3) : 夏期昼夜におけるハイブリッド換気の有効性の検討 , 日本建築学会学術講演梗概集 , D-2, pp.707-708, 2008.9.
8) 長田啓志 , 小林知広 , 近本智行 : 風力換気促進装置を有する住宅の換気性能に関する研究（第 1 報）風洞実験による風圧係数分布の検討 , 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 , pp.1151-1154, 2011.9.

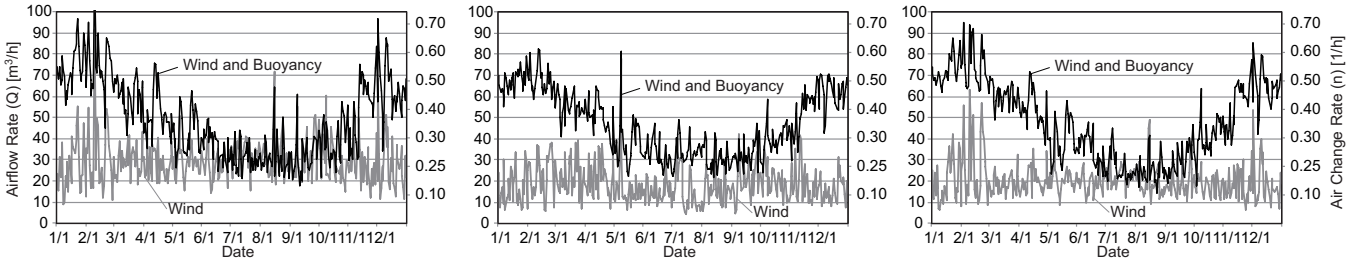


図 5 換気量及び換気回数の年間計算結果（Case 6）

*1 大阪市立大学大学院工学研究科　講師・博士（工学）　Lecturer, Graduate School of Eng., Osaka City University , Dr. Eng.
*2 大阪市立大学大学院工学研究科　講師・博士（工学）　Professor, Graduate School of Eng., Osaka City University, Dr. Eng.