

住宅における換気量の簡易予測法

SIMPLIFIED PREDICTION METHOD OF RESIDENTIAL BUILDING VENTILATION

趙雲*, 荏原幸久**, 吉野博***

Yun ZHAO, Yukihisa EBARA, Hiroshi YOSHINO

Ventilation calculation is important for prediction of heating/cooling load and indoor air quality in residential buildings. In past several decades, many simulation programs are developed for building research and design, but they generally need many input data and complicated modeling. A simplified and accurate prediction method is essential for speedy and convenient ventilation calculation during building design and performance evaluation. In this paper, thousands of ventilation cases are calculated by COMIS ventilation simulation program for a single room house. Using simulated results and ventilation theory, a simplified model and chart for ventilation rate is proposed in consideration of building air-tightness, type of ventilation system and climatic condition. By comparison of COMIS program and the simplified method, it can be found that there is a good agreement with relative error of less than 5%. In addition, this simplified method is used for a study on building air-tightness level of a solar house having a forced supply ventilation system of heated outdoor air by solar collectors.

Keywords: Residential Building, Ventilation Rate, Air-tightness, Type of Ventilation System, Climatic Condition, Solar House
住宅, 換気量, 気密性能, 換気方式, 気候条件, ソーラーハウス

1. はじめに

近年, 住宅の気密性能は年々向上しており, それに伴って自然換気量も減少しているものと予想され, 室内空気の汚染問題が懸念される。室内空気汚染を防止するためには, 必要な換気量を一定のレベル以上確保しなければならない。一方, 省エネルギーや快適性の向上を計るためには, 適切な範囲内で換気量を収めることが必要であると考えられる。従って, 換気量と各種建築要因との関係を明らかにすることが重要であり, これまで様々な単室や多数室の換気計算モデル^{1) 2) 3)}が開発された。しかしながら, これらの換気計算モデルは設計者や技術者にとって煩雑で使いにくいものとなっている。

また, 地球温暖化や酸性雨と言った環境問題への関心の高まりと共に, 太陽エネルギーを利用した住宅や省エネルギー住宅等の建設も盛んとなってきた。それらの住宅の設計においても衛生性や省エネルギーを予測するために, 住宅の換気量を明らかにする必要がある。

さて, 気密性能は住宅性能の一つとして重要であり, 建物全体の気密性能を延床面積当たりの相当開口面積として表示し, いわゆる住宅の省エネルギー基準⁴⁾の中でも規定されている。しかし, この指標と換気量との関係は単純ではない。そこで, 換気量と気密性能,

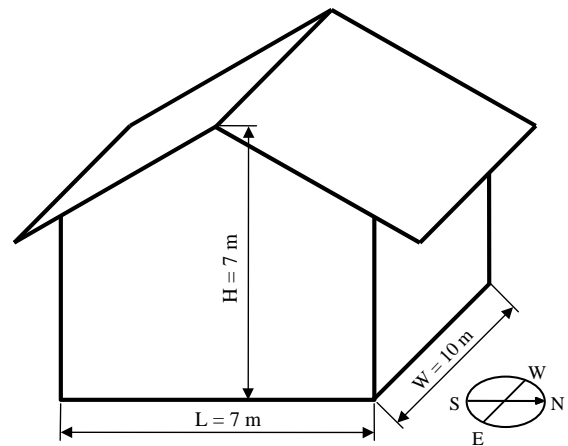


図1 対象住宅

気象状況, 換気方式との関係を明確した上で, 簡易かつ精度の良い予測法を開発する必要がある。今回, 様々な換気条件を設定した上で COMIS^{注1)}モデルを用いて換気計算を行い, その結果に基づき経験式と統計解析によって, 換気方式別の簡易予測法を提案したので報告する。

* OMソーラー協会研究開発チーム 主任研究員・工博

Senior Researcher, Research and Development Team, OM Solar Association, Dr. Eng.

** OMソーラー協会研究開発チーム リーダー

Team Leader, Research and Development Team, OM Solar Association

*** 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 教授・工博

Prof., Dept. of Architecture, Urban Planning and Building Eng., Graduate School of Eng., Tohoku Univ., Dr. Eng.

2. 計算条件

(1) モデル住宅

図1に示すモデル住宅を対象とする。2階建住宅の幅×奥行き×高さは10m×7m×7mで、1階の床上から2階の天井までの高さは5m、屋根の高さの平均値は6mである。床面積は140m²で、建物の容積は400m³である。住宅の間仕切り扉は開とし、建物全体は単室と見なす。建物の気密性能は壁体の隙間や換気口等の開口面積を含め、1~10cm²/m²の範囲に設定する。開口部の通気特性を示すべき指数nは通常1と2の間の値をとるが、ここでは1.5とする。隙間や開口部は外壁、床、天井に均等に分布するものとする。

(2) 外部環境条件

室内温度は20℃とし、外気温度は20, 15, 10, 5, 0, -5, -10℃の7段階で変化させる。外部風速は無風から8m/sの間で設定し、風向は北西とする。風圧係数は住宅の周辺状況を考慮して表1の3種類とする。

(3) 換気方式

4種類の換気方式を対象とする。それぞれの概要を図2(a)~(d)に示す。機械換気は強制排気型、強制給気型、強制給排気型の3種である。機械換気量は100~800m³/hの7段階に設定する。

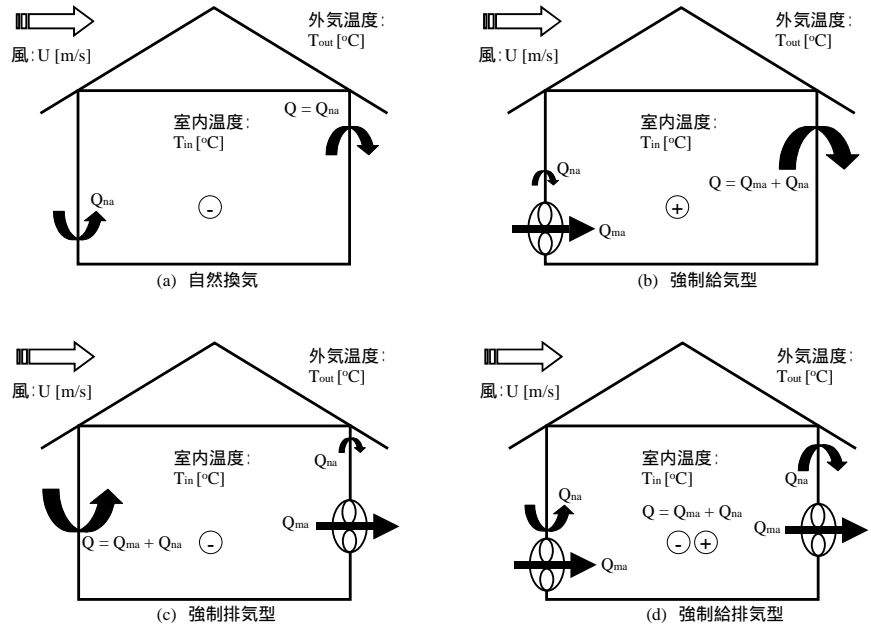


図2 換気方式とその特性

表1 計算用風圧係数

風圧係数	位置			
	風上	風下	小屋裏	床下
大	0.60	-0.40	-0.30	0.10
中	0.30	-0.20	-0.15	0.05
小	0.06	-0.04	-0.03	0.01

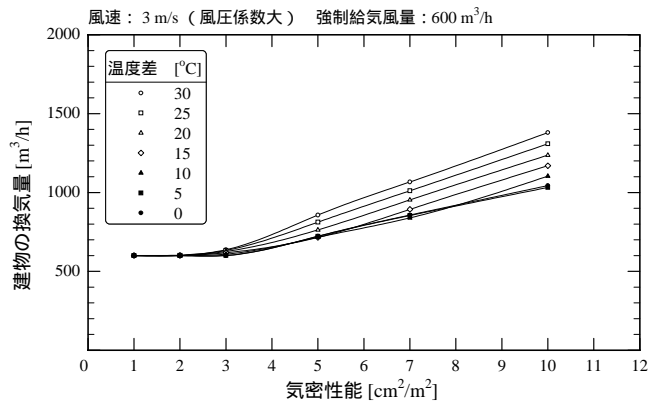
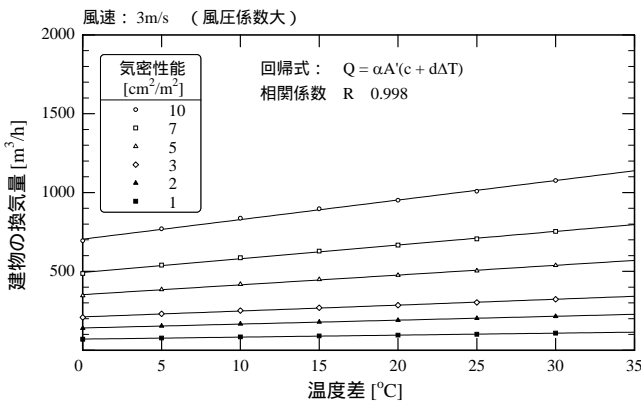
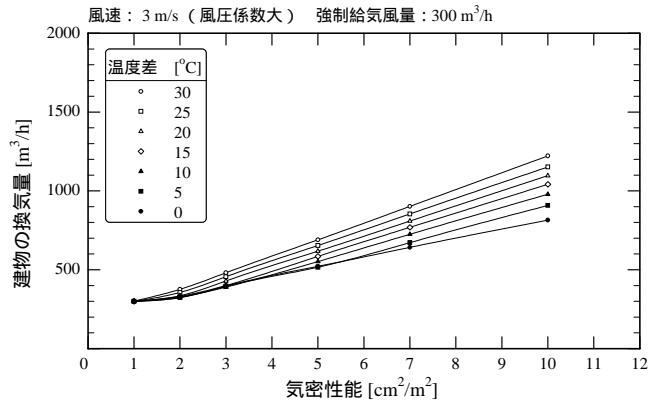
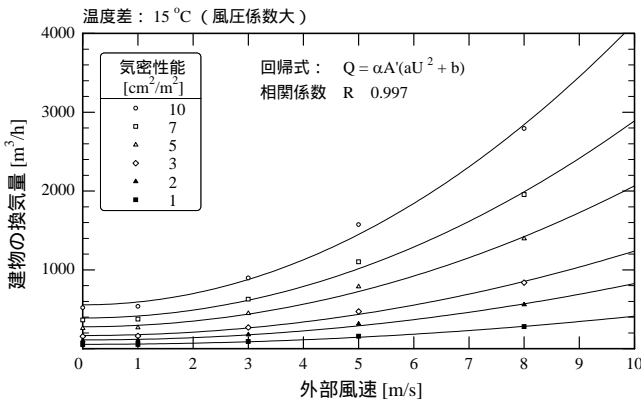


図3 換気量と気密性能, 外部風速, 温度差の関係(自然換気)

図4 換気量と気密性能, 外部風速, 温度差の関係(強制給気)

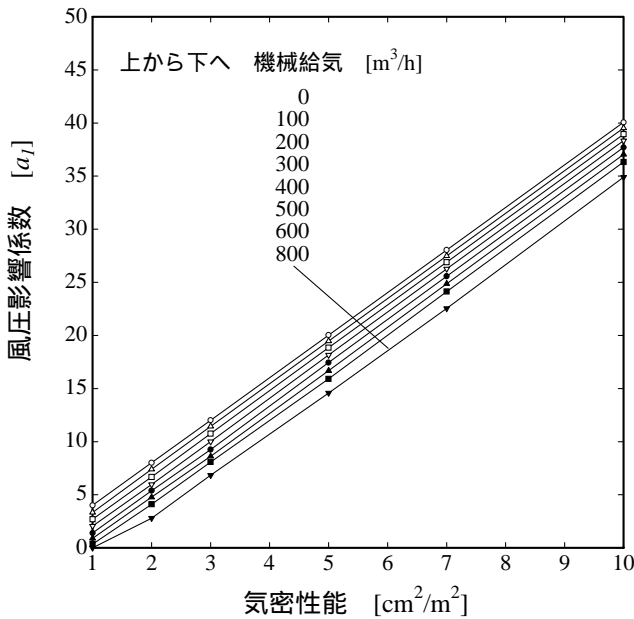


図5 風圧影響係数 a_1 (強制給気型)

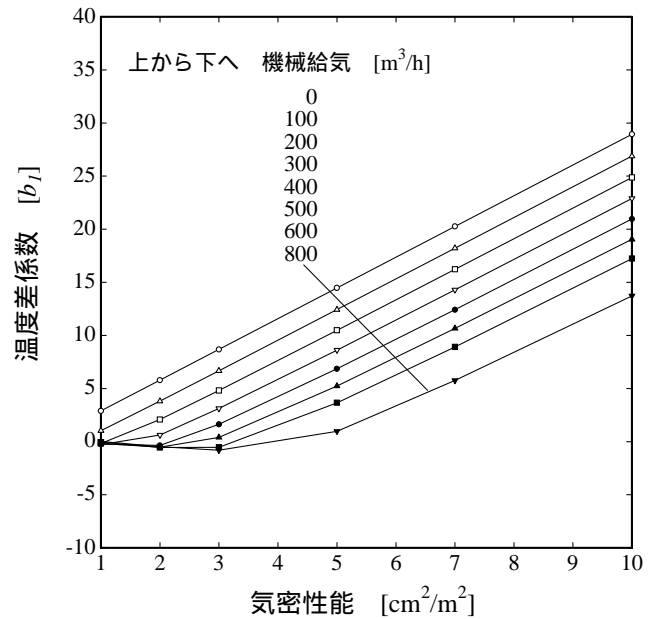


図6 温度差係数 b_1 (強制給気型)

3. 計算結果

換気計算は上記の条件を組み合わせた約20,000ケースに対してCOMISモデルを用いて行った。

図3に自然換気の場合の換気量と気密性能、温度差、外部風速の関係を示す。当然のことながら室内温度差 ΔT や外部風速 U の増加に伴い、換気量が増大する。また、建物の気密性能 $\alpha A'$ が大きくなると、換気量が増えることも明らかである。回帰分析の結果により、自然換気量が気密性能、室内外温度差の1乗、風速の2乗に比例することが明確であった。

機械換気の場合を図4に示す。換気量は機械換気量によって傾向が異なり、機械換気量が600 m³/hの場合には、相当隙間面積が2 cm²/m²より小さければ、建物全体の換気量は外乱状況と無関係に一定となる。一方、気密性能が低い即ち相当隙間面積が大きければ、建物全体の換気量は機械換気量と自然換気量の両方に依存し、温度差が大きいほど換気量は大きくなる。

4. 簡易予測法

(1) 換気の計算式

開口部や隙間に空気が流れる場合、室内外圧力差 ΔP が生じたとき換気量 Q との関係は次式で表わされる。

$$Q = C_m (\Delta P)^{\frac{1}{n}} = C \times \alpha A' (\Delta P)^{\frac{1}{n}} \dots\dots\dots (1)$$

気密性能 $\alpha A'$ は室内外圧力差 ΔP と換気量 Q の測定結果に基づき回帰分析によって求められ、 $\alpha A'$ が定めれば換気量が求まる。

自然換気の場合、換気の駆動力は風力と浮力であり、換気量と風速 U 、温度差 ΔT との関係は経験的に次式⁵⁾で表わされるものとする。

$$Q = Q_{na} = a \times C_p U^2 + b \times \Delta T \dots\dots\dots (2)$$

$$= \alpha A' (a_0 \times C_p U^2 + b_0 \times \Delta T) \dots\dots\dots (3)$$

機械換気の場合、換気方式によって室内外の圧力差が変わるが、建物全体の換気量は機械換気量と自然換気量を合成したものと見なすこととすれば次式のようになる。

$$\begin{aligned} Q &= Q_{ma} + Q_{na} \\ &= Q_{ma} + \alpha A' (a_1 \times C_p U^2 + b_1 \times \Delta T) \dots\dots\dots (4) \\ &= Q_{ma} + \alpha A' (\alpha_1 a_0 \times C_p U^2 + \alpha_2 b_0 \times \Delta T) \end{aligned}$$

ここで、式(4)において機械換気が無い場合には、風圧影響修正率 α_1 、温度差係数の修正率 α_2 はそれぞれ1であり、式(3)となる。

(2) 回帰分析による換気量の予測式

図3, 4に示したCOMISによる換気計算結果を用い、予測式(4)が成り立つものとして風圧影響係数 a_1 、温度差係数 b_1 を重回帰分析によって求める。自然換気の場合、風圧影響係数、温度差係数を重回帰分析によって求めると下記の通りである。

$$\begin{aligned} a_0 &= 4.0 \dots\dots\dots (5) \\ b_0 &= 2.89 \end{aligned}$$

この重回帰式から算定された値とCOMISによる計算結果との相関係数 R の値は0.975となる。自然換気の場合、換気量の予測式は次のように表せる。

$$Q = Q_{na} = 4.0 \times \alpha A' C_p U^2 + 2.89 \times \alpha A' \Delta T \dots\dots\dots (6)$$

強制給気型の場合、それらの値を図5, 6にそれぞれ示す。機械換気量が大きくなると係数 a_1, b_1 が小さくなる。また、風圧影響係数の修正率 α_1 、温度差係数の修正率 α_2 は自然換気の場合1であり、気密性能が向上すると大きな値を持つことが予想されるので次式によって表わされるものとする。

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 1 + \frac{c_1}{\alpha A'} \dots\dots\dots (7) \\ \alpha_2 &= 1 + \frac{c_2}{\alpha A'} \end{aligned}$$

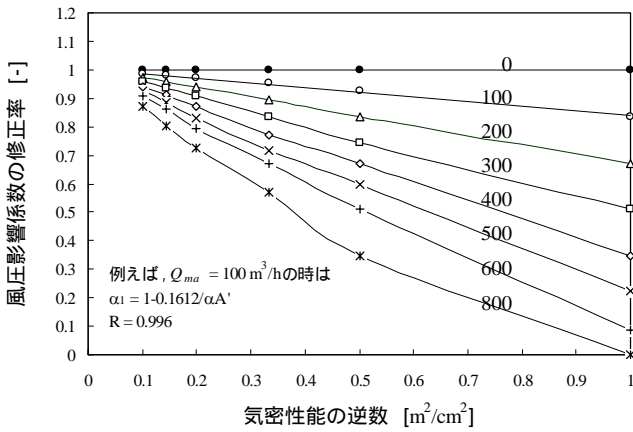


図7 風圧影響係数の修正係数(強制給気)

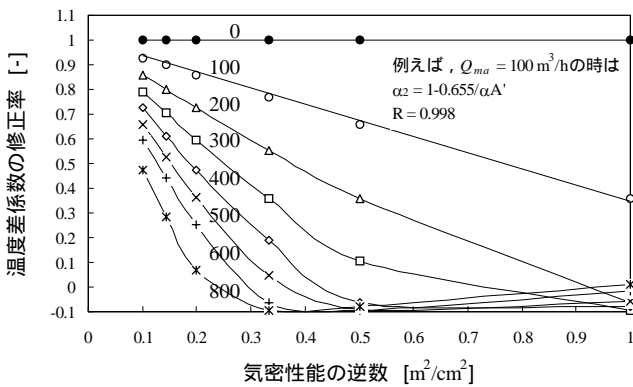


図8 温度差係数の修正係数(強制給気)

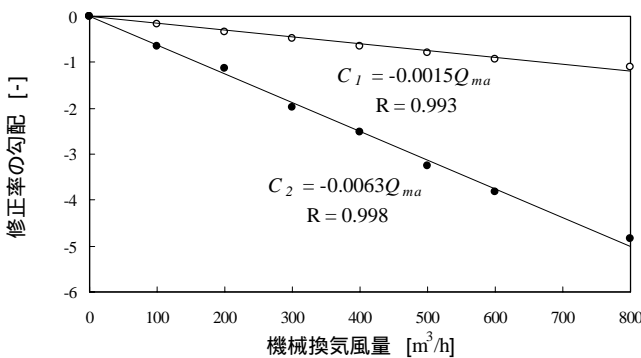


図9 修正率の勾配(強制給気)

ここで、係数 c_1, c_2 は風圧影響係数の修正率 α_1 、温度差係数の修正率 α_2 の勾配と呼ぶことにする。換気量予測式(4)の自然換気量の項を式(7)で書き換えれば次のようになる。

$$Q = Q_{ma} + \alpha A' \times \left[\left(1 + \frac{c_1}{\alpha A'}\right) a_0 \times C_p U^2 + \left(1 + \frac{c_2}{\alpha A'}\right) b_0 \times \Delta T \right] \dots\dots\dots (8)$$

修正率 α_1, α_2 と気密性能の逆数との関係は図7, 8に示す通りであり、気密性能が向上すると共に、風圧や温度差の影響が小さくなる。ここで、温度差係数の修正率 α_2 が0.1より小さいときを無視すれば、各修正率は気密性能の逆数とリニアの関係になる。これらの直線の勾配、即ち c_1, c_2 は給気量によって異なるので、給気量との関係を示すと図9のようになる。 c_1, c_2 は給気量に比例する。そこで、係数 c_1, c_2 の回帰分析の結果を式(8)に代入すると、強制給気の場合、

建物全体の換気量は次式で予測することができる。

$$Q = Q_{ma} + \left(1 - \frac{0.0015}{\alpha A'} Q_{ma}\right) \times 4.0 \times \alpha A' C_p U^2 + \left(1 - \frac{0.0063}{\alpha A'} Q_{ma}\right) \times 2.89 \times \alpha A' \Delta T \dots\dots\dots (9)$$

同様に、強制排気の場合、建物全体の換気量は次の計算式で予測することができる。

$$Q = Q_{ma} + \left(1 - \frac{0.0020}{\alpha A'} Q_{ma}\right) \times 4.0 \times \alpha A' C_p U^2 + \left(1 - \frac{0.0060}{\alpha A'} Q_{ma}\right) \times 2.89 \times \alpha A' \Delta T \dots\dots\dots (10)$$

また、強制給排気の場合、機械給排気の量がほぼ等しければ、換気量の予測式は式(11)になる。即ち、建物全体の換気量は機械換気量と無修正の自然換気量の和である。

$$Q = Q_{ma} + 4.0 \times \alpha A' C_p U^2 + 2.89 \times \alpha A' \Delta T \dots\dots\dots (11)$$

(3) 換気量の予測チャート

以上の回帰分析によって換気量の簡易予測式が得られ、計算することができるが、より使い易いチャートがあれば便利である。そこで、式(9), (10)を用い、図1の建物に対して、強制給気、排気のそれぞれの方式の換気回数予測チャートを図10, 11のように作成した。図10, 11の下半分は自然換気回数を求めるチャートであり、共通である。

自然換気、強制給気、強制給排気の場合、地域気候・気密性能・機械換気量が分かれば、それぞれの換気方式について建物全体の換気量は図10を利用して次のように推定できる。

自然換気のみの場合には、 \sim で読み取れば自然換気回数が見える。即ち

右下部分において温度差と風圧係数(大, 中, 小はそれぞれ \sim , \sim , \sim で示す)に応じた曲線上で、横軸の外部風速から対応点を定める。

定めた点から左方向に水平線を引く。

左下部分において横軸の気密性能と水平線の交点を求め、換気回数の等値線から、自然換気回数を読み取る。

次に、強制給排気の場合には、式(11)のように自然換気回数に機械換気回数を加えれば、その結果は建物全体の換気回数である。一方、強制給気、強制排気の場合には、 \sim で読み取った修正換気回数を機械換気回数と自然換気回数の和から引けば、その結果が建物全体の換気回数である。即ち

強制給気、強制排気の場合:

$$Q = (q_{ma} + q_{na} - q_{mn}) \times V = Q_{ma} + Q_{na} - Q_{mn} \dots\dots (12)$$

Q_{mn} は修正換気回数である。ここでチャートの読み方は \sim の通りである。

右上部分において温度差と風圧係数に応じた曲線上で、横軸の外部風速から対応点を定める。

定めた点から左方向に水平線を引く。

左上部分において横軸の機械換気回数(給・排気風量/建物容積)と水平線の交点を求め、修正換気回数の等値線から、修正換気回数を読み取る。

表 2 換気量予測値の比較

	予測法	COMIS	簡易法	チャート法
風圧係数大	自然換気	476	469 (-1.5%)	480 (+0.2%)
	強制給気	571	585 (+2.5%)	588 (+3.0%)
	強制排気	579	585 (+1.1%)	592 (+2.2%)
	強制給排気	676	669 (-1.0%)	680 (+0.6%)
風圧係数中	自然換気	376	379 (+0.8%)	380 (+1.1%)
	強制給気	479	501 (+4.6%)	480 (-0.2%)
	強制排気	487	502 (+3.1%)	484 (-0.6%)
	強制給排気	577	579 (+0.3%)	560 (-3.0%)
風圧係数小	自然換気	325	307 (-5.5%)	320 (-1.5%)
	強制給気	429	433 (+0.9%)	448 (+4.0%)
	強制排気	432	436 (+0.9%)	452 (+4.6%)
	強制給排気	526	507 (-3.6%)	520 (-1.1%)

[注] [1] COMIS: 換気モデル COMIS による計算結果; [2] 簡易法: 換気方式別回帰式(6), (9), (10), (11)による計算結果; [3] チャート法: 図 10, 11 で換気回数を求め、建物容積をかけて得た結果; [4] 括弧内の数値は COMIS の計算結果と他の予測法の誤差割合。

例えば、気密性能 $5 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ 、容積 400 m^3 の2階建の戸建住宅で外部風速 3 m/s 、外気温度 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 、室内温度 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ の時、各換気方式の換気量を求める。但し、機械換気の場合、機械換気量は $200 \text{ m}^3/\text{h}$ とする。COMIS による計算結果、簡易予測式、換気チャートによる結果は表 2 に示す通りである。

換気量の簡易予測式とチャートによる値の誤差範囲は、COMIS による計算結果に比べてそれぞれ 5% 以内になっており、今回の換気量予測式はかなり精度の良いことが判る。

5. 予測式を用いた気密性能の最適範囲に関する検討例

空気集熱式ソーラー住宅の気密性能の最適範囲について、予測式を用いて検討する。この住宅では、集熱時には外気を屋根の通気層を通して太陽熱で暖め、その外気をファンで蓄熱床下に送り込み、床上の吹出口から室内に導入するシステム(強制給気方式に相当)が設けられている。また、非集熱時には床下の蓄熱を利用し、室内温度の低下をおさえる。このシステムでは快適性を保つ為に集熱時には隙間からの外気漏入量のある程度押さえ、非集熱時には空気汚染を防止する為に自然換気量を確保しなければならない。そこで、住宅の気密性能を地域に応じて一定の範囲内にすることが必要である。本文の簡易予測式(9)を用い、下記の目標を前提に、気密性能の範囲を求めた。

集熱時: 自然漏入量 / 機械換気量(集熱量) $1/3$

非集熱時: 自然換気回数 0.5

住宅の構成は予測式検討用のモデルと同じとし、集熱風量は

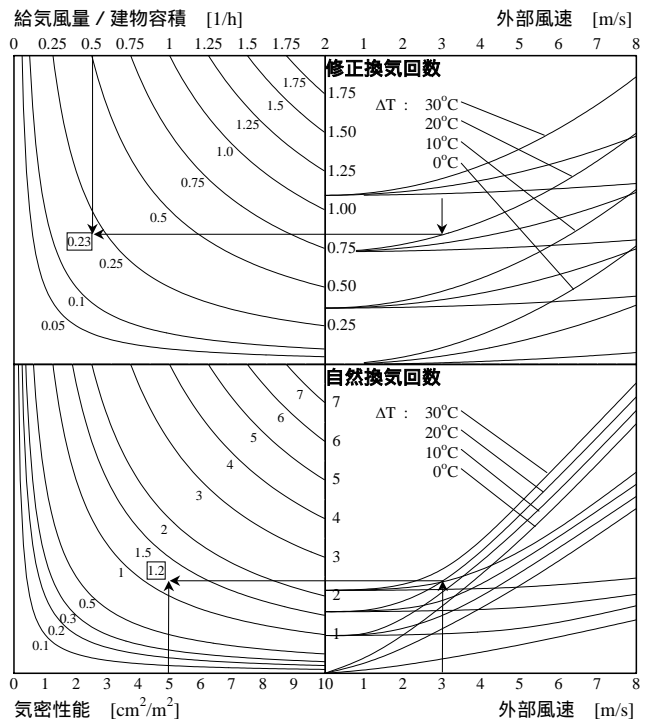


図 10 強制給気換気方式の換気量予測図

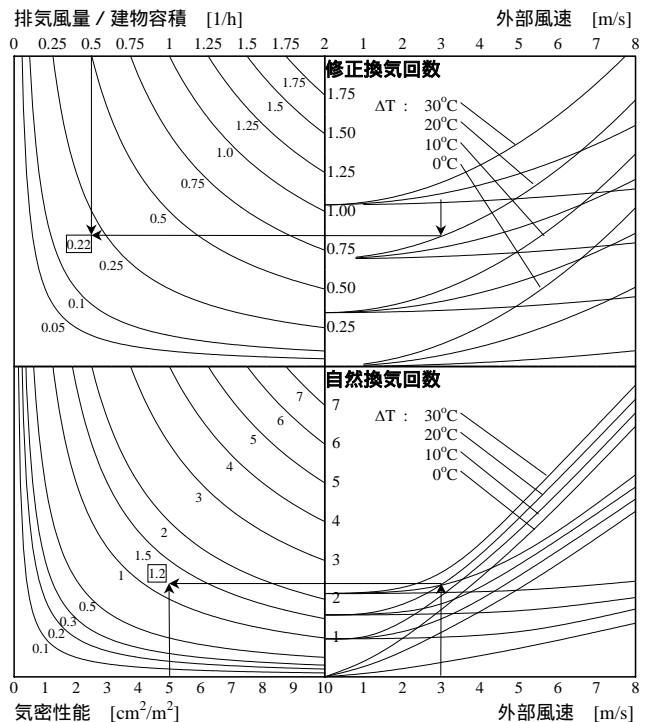


図 11 強制排気換気方式の換気量予測図

$600 \text{ m}^3/\text{h}$ とする。従って、集熱時には $Q_{ma}=600 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_{na}-Q_{mn} 200 \text{ m}^3/\text{h}$; 非集熱時には $Q = 200 \text{ m}^3/\text{h}$ を満足するような気密性能を求めることになる。その結果を表 3 に示す。住宅の新省エネルギー基準^[4]による地域の区分を対応させれば表 3 の下欄ようになる。風の影響を考慮しない場合には、寒冷地(, 地域), 温暖地(~ 地域), 亜熱帯地(地域)の目標値はそれぞれ $3 \sim 5, 5 \sim 7, 7 \sim 15 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ が適当と言える。

表 3 空気集熱式ソーラー住宅の気密性能目標値

風の影響		室内外温度差						
風速	周辺状況	5	10	15	20	25	30	
無風	各地	13.8~ 17.6	6.9~ 10.7	4.6~ 8.4	3.5~ 7.2	2.8~ 6.5	2.3~ 6.1	
	一般 ($\beta m/s$)	広開地 (風圧係数大)	4.0~ 5.7	3.1~ 5.3	2.5~ 5.0	2.1~ 4.8	1.8~ 4.7	1.6~ 4.6
		住宅地 (風圧係数中)	6.2~ 8.3	4.3~ 6.9	3.3~ 6.2	2.6~ 5.7	2.2~ 5.4	1.9~ 5.2
強い ($5m/s$)	市街地 (風圧係数小)	11.1~ 14.3	6.2~ 9.6	4.3~ 7.8	3.3~ 6.9	2.6~ 6.3	2.2~ 5.9	
	広開地 (風圧係数大)	1.7~ 3.0	1.6~ 3.1	1.4~ 3.2	1.3~ 3.2	1.2~ 3.3	1.1~ 3.3	
		住宅地 (風圧係数中)	3.1~ 4.6	2.5~ 4.5	2.1~ 4.4	1.9~ 4.3	1.6~ 4.2	1.5~ 4.2
市街地 (風圧係数小)	8.2~ 10.8	5.1~ 8.2	3.7~ 7.0	2.9~ 6.3	2.4~ 5.9	2.1~ 5.6		
	地域の区分		,	,	,	,		

6. まとめ

換気計算プログラムCOMISモデルを用い、各種の換気方式を持つ単室からなる住宅を対象として様々な気候条件と気密性能の下で換気量の数値計算を行った。これらの結果を用いて換気理論に従って、簡易予測式を求めた。又、機械換気の場合、換気方式別に機械換気量の自然換気量に及ぼす影響を明らかにした。また、換気回数を求めるチャートを提案した。簡易予測式とチャートを使い、ある条件の換気量予測値をCOMIS計算結果と比較したところ、良く対応していることが判った。

最後に、簡易予測式を用い、空気集熱式ソーラー住宅の気密性能について室内快適性と空気質を確保する為の目標範囲を検討した。その結果、寒冷地、温暖地、亜熱帯地について住宅の目標気密性能はそれぞれ3~5, 5~7, 7~15 cm^2/m^2 が適当であることが判明した。

記号

a	: 風の影響度	[-]
a_0	: 自然換気時風圧影響係数	[-]
a_1	: 機械換気時風圧影響係数	[-]
b	: 温度差の影響度	[-]
b_0	: 自然換気時温度差係数	[-]
b_1	: 機械換気時温度差係数	[-]
C	: 隙間や開口部の通気率	[-]
c_1	: 風圧影響係数の修正率の勾配	[-]
c_2	: 温度差係数の修正率の勾配	[-]
C_m	: 建物の換気係数	$[m^3/h @ Pa^{1/n}]$

C_p	: 風上と風下の風圧係数差	[-]
n	: 隙間や開口部の特性を示す係数	[-]
q_{ma}	: 機械換気回数	[1/h]
q_{na}	: 自然換気回数	[1/h]
q_{mn}	: 修正換気回数	[1/h]
Q	: 建物全体の換気量	$[m^3/h]$
Q_{ma}	: 機械換気量	$[m^3/h]$
Q_{na}	: 自然換気量	$[m^3/h]$
Q_{mn}	: 修正換気量	$[m^3/h]$
R	: 回帰分析の相関係数	[-]
T_{in}	: 室内温度	$[^{\circ}C]$
T_{out}	: 外気温度	$[^{\circ}C]$
U	: 外部風速	$[m/s]$
V	: 建物の容積	$[m^3]$
α_1	: 風圧影響係数の修正率	[-]
α_2	: 温度差係数の修正率	[-]
$\alpha A'$: 建物全体の気密性能	$[cm^2/m^2]$
ΔP	: 開口部両側の圧力差	[Pa]
ΔT	: 室内外温度差	$[^{\circ}C]$

注

1) COMIS (Conjunction Of Multizone Infiltration Specialists) モデル⁹⁾は、国際エネルギー機構 (IEA) の「建築物及びコミュニティーシステムの省エネルギー研究開発計画」の一つである ANNEX 23 (多数室換気計算モデルの開発研究) プロジェクトにおいて開発された室内換気と汚染物質移動のシミュレーションプログラムである。また、多数の実験結果や他の換気モデルと比較したところ⁷⁾、COMIS は精度の高い換気計算モデルと評価された。

参考文献

- [1] 吉野博他: 木造戸建住宅を対象とした自然換気量の予測法に関する検証実験, 間仕切扉を開放して単室とした場合, 日本建築学会計画系論文報告集, No.412, pp.19-29, 1990.6
- [2] ASHRAE Standard, 119-1988: Air Leakage Performance for Detached Single Family Residential Building, 1988
- [3] H. E. Feustel et al: A Survey on Air Flow Models for Multizone Buildings, Energy and Buildings, Vol. 18, No.2, 1992, Lawrence Berkeley Laboratory Report, LBL-30288, 1991
- [4] 建設省住宅局住宅生産課 (監修), (財)住宅・建築 省エネルギー機構: 住宅の新省エネルギー基準と指針, 平成4年3月
- [5] 吉野博他: 試験家屋を用いた自然換気量の予測手法に関する検証実験, 日本建築学会建築環境工学論文集, pp.61-68, 昭和59年11月
- [6] H. E. Feustel et al: Fundamentals of the multizone air flow model COMIS, Conjunction of Multizone Infiltration Specialists, AIVC TN-29, May, 1990
- [7] J-M. Furbtinger et al: Evaluation of COMIS, IEA-Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme, Annex 23: Multizone Air Flow Modeling, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, LESO.PB, Institute of Building Technology, 1996