

建物の気密性測定法における相当隙間面積と測定の信頼性の評価方法の再考

## Reconsideration of the equivalent leakage area and reliability evaluation methods in building airtightness measurement

正会員 ○吉浦 温雅 (神奈川大学) 技術フェロー 奥山 博康 (神奈川大学)

Hiroyasu OKUYAMA\*<sup>1</sup> Atsumasa YOSHIURA\*<sup>1</sup>

\*<sup>1</sup> Kanagawa University

Synopsis: In the Japanese Industrial Standards (JIS), the method for measuring the airtightness of buildings requires a value to be assumed for the pressure difference  $\Delta p$  before the total equivalent leakage area  $\alpha A$  can be evaluated. The JIS assume  $\Delta p = 9.8$  Pa, which gives values of  $\alpha A$  that are larger than those for the simple equivalent leakage area  $s$ . If instead we denote the air density as  $\rho$  and assume  $\Delta p = \rho/2 = 0.6$  Pa, the two leakage areas  $\alpha A$  and  $s$  become equal. Also, in buildings such as wooden houses with a layer of air inside the walls, it is difficult to obtain appropriate results in part-by-part airtightness measurements. This is because the air-leaking gaps or cracks in the walls are connected by this air layer, thereby invalidating the premise of the measurements. The discrepancy ratio  $\beta$  of the measurement premise defined in our research is able to detect this invalid situation. However, the conventional coefficient of determination of the least-squares method shows a value close to unity. The proposed evaluation of statistical reliability can be realized by our developed automatic multiple-measurement system.

### 1. はじめに

建物の性能の中で気密性は省エネルギーだけではなく、健康・快適性と耐久性等に関係し、同じ設計の建物でも施工精度や経年劣化に左右されることから、実態を測定する技術が重要となる。JIS<sup>[1]</sup>の測定標準では、最終的な性能評価指標は総相当隙間面積であるが、算出式の中に变化する差圧  $\Delta p$  が入っているので、 $\Delta p$  を仮定する必要がある。さらに、測定の信頼性評価には信頼区間等が用いられているが、隙間の变化や外乱の悪影響で測定的前提が成り立たない場合を十分に判断できない。そこで本報では、1)  $\Delta p$  を仮定せず  $\alpha A$  を算出できる単純相当隙間面積の算出式を示し、これが  $\rho$  を空気密度として従来式と  $\Delta p = \rho/2$  の場合に一致することを示す。また、2) 従来の部位別の気密性の測定法を実施し、著者らが提案<sup>[2]</sup>している前提の不適合率  $\beta$  と呼ぶ評価指標を用いて、この測定法の問題点を検討する。

### 2. 測定値の分析表計算シートと測定装置の概要

測定には、写真1に示す、PC制御で自動的に100点程度の隙間の通過隙間風量と内外差圧  $\Delta p$  を測定できるように改良した気密性測定装置を用いる。隙間特性値の回帰と不確かさと信頼性の評価は、次の三種類の回帰式モデル全てで行うように開発した表計算シート<sup>[3]</sup>を用いる。三種の回帰式モデルとは、まず次式の圧力損失の風量二次式モデルである。

$$\Delta p = D_1 \cdot q + D_2 \cdot q^2 \quad (1)$$

また次の圧力損失の式の指数則モデルである。

$$\Delta p = D_n \cdot q^n \quad (2)$$

さらに次の風量の式の指数則モデルである。



写真1 建物気密性自動多点計測システム

$$q = C_n \cdot \Delta p^\eta \quad (3)$$

本表計算シートでは、これら  $C$ ,  $D$ ,  $n$ ,  $\eta$ , 総相当隙間面積と、後述する単純相当隙間面積  $s$  を推定し、これらの信頼区間の算出だけでなく、回帰式残差および測定不確かさ標準偏差から回帰係数と指数に伝播した不確かさ標準偏差も計算する。また決定係数  $COD$  と測定の前提の不適合率  $\beta$  の計算も行い、三モデルの比較検討が可能である。さらに本分析表計算シートでは、突風等の悪影響を受けた測定点の重みを小さくする、TukeyのBiweight推定法<sup>[2]</sup>の結果も算出する。

### 3. 気密性の相当隙間面積の再考

#### 3.1 総相当隙間面積と単純相当隙間面積の算出式

JIS A 2201<sup>[1]</sup>のSI単位表現の総相当隙間面積  $\alpha A$  [ $\text{m}^2$ ]は、指数  $n$  が2で定義された下式で計算される。

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} \left( \frac{q}{\alpha A} \right)^2 \quad (4)$$

式(4)を  $\alpha A$  [ $\text{m}^2$ ] を解く式に変形すると、

$$\alpha A = q \left( \frac{\rho}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{1}{\Delta p} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

となる。一方、気密性の回帰式は次式で表される。

$$q = a \cdot \Delta p^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

式(6)を式(5)へ代入すると、総相当隙間面積  $\alpha A$  [m<sup>2</sup>]は、

$$\alpha A = a \left( \frac{\rho}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \Delta p^{\frac{1}{n} - \frac{1}{2}} \quad (7)$$

となる。JIS<sup>[1]</sup>では、 $\Delta p$  に基準圧 9.8[Pa]と仮定することで、次の様に総相当隙間面積  $\alpha A$  [m<sup>2</sup>]を表している。

$$\alpha A = a \left( \frac{\rho}{2} \right)^{\frac{1}{2}} (9.8)^{\frac{1}{n} - \frac{1}{2}} = a (9.8)^{\frac{1}{n}} \left\{ \left( \frac{\rho}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{1}{9.8} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (8)$$

一方、開口が隙間の場合には基本式として、指数  $n$  は 1 から 2 とした次式で表す場合が多く、この場合は単純相当隙間面積  $s$  [m<sup>2</sup>]とする。

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} \left( \frac{q}{s} \right)^n \quad (9)$$

ここで式(9)を  $s$  [m<sup>2</sup>]について解けば次の(10)式となる。

$$s = q \left( \frac{\rho}{2} \right)^{\frac{1}{n}} \left( \frac{1}{\Delta p} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (10)$$

これに回帰式(6)を代入すると次の(11)式が得られる。

$$s = a \left( \frac{\rho}{2} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (11)$$

この単純相当隙間面積  $s$  [m<sup>2</sup>]は、 $\Delta p$  を仮定することなく計算できる。また、この式(11)は、総相当隙間面積  $\alpha A$  [m<sup>2</sup>]を表す式(7)において  $\Delta p = \rho/2 = \text{約 } 0.6\text{Pa}$  を代入したものと同じであることが分かる。

### 3.2 総相当隙間面積 $\alpha A$ と単純相当隙間面積 $s$ の比率

単純相当隙間面積  $s$  と JIS の総相当隙間面積  $\alpha A$  との差異について、と  $s$  に対する比率を用いて検討する。この比率は  $r$  とし次のように定義する。

$$\begin{aligned} r_{\alpha A} &= \frac{\alpha A}{s} \\ &= \frac{a \left( \frac{\rho}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot (9.8)^{\frac{1}{n} - \frac{1}{2}}}{a \left( \frac{\rho}{2} \right)^{\frac{1}{n}}} = \left( \frac{\rho}{2 \cdot 9.8} \right)^{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{n}} = \left( \frac{\rho}{19.6} \right)^{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{n}} \end{aligned} \quad (12)$$

図 1 に指数  $n$  が 1~2 の場合の比率の計算結果を示す。指数  $n$  が 2 の場合に比率  $r$  は 1.0 となり、指数  $n$  が 1 に近づくほど大きくなり、指数  $n$  が 1 の場合に約 4 倍となる。指数  $n$  が平均的な 1.5 の場合には、比率  $r$  は 1.6 とな

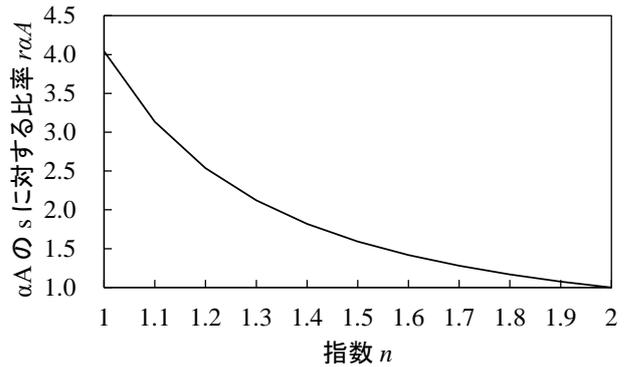


図 1 JIS 総相当隙間面積と  $s$  の比率  $r$



写真 2 測定対象の建物

表 1  $\Delta p = D_n \cdot q^n$  の単純相当隙間面積  $s$  の計算結果

	推定値
$Dn$	2647.8 (測定前提不適合率 $\beta = 0.57188$ )
$n$	1.4873 (測定前提不適合率 $\beta = 0.57192$ )
$COD$	0.99935 (決定係数)
$s$ [cm <sup>2</sup> ]	35.60 (単純相当隙間面積)

表 2  $\Delta p$  による総相当隙間面積の計算結果

	$\Delta p = 9.8\text{Pa}$	$\Delta p = 0.6\text{Pa}$
$C_n$	0.005004	0.005004
$\eta = 1/n$	0.6719	0.6719
[cm <sup>2</sup> ]	57.46	35.57

ることから、JIS の算式は単純相当隙間面積  $s$  と比較して相当隙間面積を 6 割程度大きく評価することが分かる。

### 3.3 測定による相当隙間面積の妥当性の検証

本節では、総相当隙間面積  $\alpha A$  と単純相当隙間面積  $s$  の妥当性について、測定を実施して検証を行う。測定は、神奈川大学 12 号館のドライエリアに設置したプレファブ建物を対象とし、前述の気密測定装置を用いた。対象の床面積は 8.1m<sup>2</sup>、天井高さは 2.2m であり、室の幾何的容積は 17.8m<sup>3</sup> である。尚、対象の建物は簡易的な構造で気密性が悪いためシーล等により隙間を減らした。内外差圧を 10~70Pa 程度の範囲で 100 点の測定値を取り、分析表計算シートを用いて計算した結果を表 1 と 2 に示す。表 1 は圧力損失の式で単純相当隙間面積  $s$  を求めた結果である。表 2 には基準差圧  $\Delta p$  を従来の 9.8Pa と 0.6Pa と

した場合の総相当隙間面積 $aA$ の算定結果を示している。指数則モデルの風量の(3)式の $C_p$ と通気率 $a$ は等しい。表1の決定係数 $COD$ と不適合率 $\beta$ の値から適切な測定と言える。また(11)式による単純相当隙間面積 $s$ は $35.62\text{cm}^2$ となる。表2で、(7)式により $\Delta p = 9.8\text{Pa}$ の総相当隙間面積 $aA$ は $57.46\text{cm}^2$ であるが、 $\Delta p = 0.6\text{Pa}$ の総相当隙間面積 $aA$ は $35.57\text{cm}^2$ となり、総相当隙間面積 $aA$ は単純相当隙間面積 $s$ と同程度の値となる。両相当隙間面積の比率 $r$ は $1.613$ となる。測定データからもJISの総相当隙間面積は単純相当隙間面積 $s$ と比較して、相当隙間面積を6割程度大きく評価することが認められる。

次に(4)式を風量 $q$ について解いた右辺に含まれる $aA$ に、(8)式による $aA$ の式を代入すると次式が得られる。

$$q = a \cdot (9.8)^{\frac{1}{n} - \frac{1}{2}} \cdot \Delta p^{\frac{1}{2}}$$

(13)

この(13)式と(6)式の曲線、さらに測定値を比較した結果を図2に示す。これを見ると、総相当隙間面積 $aA$ による(13)式では、 $9.8\text{Pa}$ で(6)式と一致するが、差圧の増加につれて実態よりも小さい隙間風量を予測計算することになる。

### 3.4 相当隙間面積を算出する基準圧力の見直しの必要性

総相当隙間面積 $aA$ の算出式では、単純相当隙間面積 $s$ より6割程度大きく算定することが確認できた。しかし、総相当隙間面積 $aA$ の(8)式で、基準圧力を $p/2 = 0.6\text{Pa}$ とすれば、単純相当隙間面積 $s$ と等しくなる。従って、相当隙間面積の評価のために、何等かの $\Delta p$ の値を仮定する必要がある(7)式を使う必要があるのであれば、その値として $1\text{mmAq} = 9.8\text{Pa}$ を適用するよりも、普遍性のある隙間面積が得られる $\Delta p = p/2 = \text{約}0.6\text{Pa}$ を適用した方がよいのではないと思われる。

## 4. 部位別の気密性測定法の信頼性評価の検討

### 4.1 測定の概要

神奈川大学12号館のドライエリアに設置したプレファブ建物において測定を実施した。窓に写真1の様前述の自動多点測定システムを設置し減圧法を適用した。本測定では差圧の範囲を $10 \sim 70\text{Pa}$ 程度とした。表3に示すように、室内側からパテ等でシールして段階的に気密性を高めて測定を行った。図3に示す気密条件1とは、気密性の悪い元の状態であり、気密条件2は、床と柱の納まり6か所と天井長手方向の壁との隙間2か所を気密化した状態である。気密条件1と2の風量の差(以下、風量差と呼ぶ)を100点程算出し、同様に表計算プログラムで分析した。

### 4.2 部位別の気密性測定の結果

図3に気密条件1と2の回帰曲線を描いた。図4には(2)式と(3)式の二種の指数則の回帰式モデルによる単純相当隙間面積と風量差の回帰による単純相当隙間面積の結果を示す。気密条件2の単純相当隙間面積に、風量差

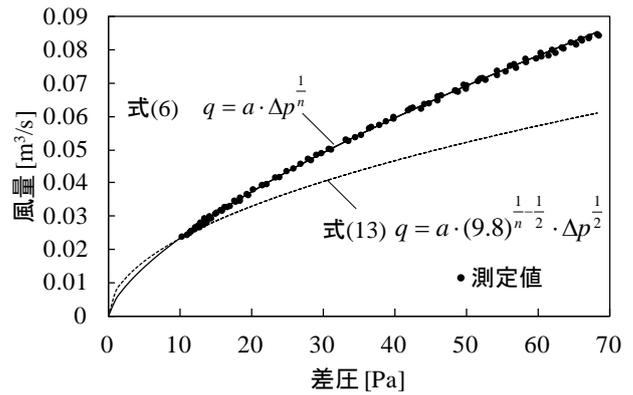


図2 単純相当隙間面積の(6)式とJIS総相当隙間面積の(13)式と測定値の隙間風量の比較

表3 部位別の隙間特性測定の気密条件

	気密化した部位
気密条件1	元のまま気密化した部位なし
気密条件2	床：柱との納まり6か所 天井：長手方向の壁との隙間2か所
気密条件3	壁：入隅部4か所、窓サッシ：壁との納まり、その他：照明等の配線の穴をシール

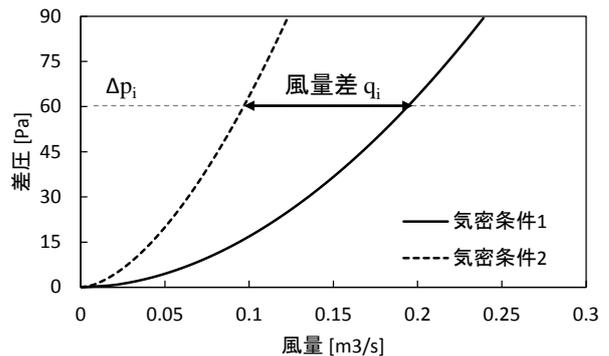


図3 気密条件1と2の回帰曲線

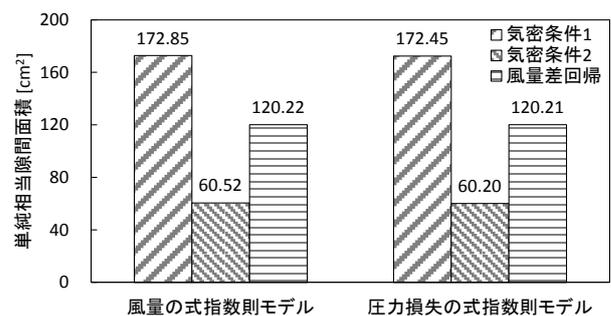


図4 各気密条件の単純相当隙間面積

回帰の単純相当隙間面積を加えれば、気密条件1の単純相当隙間面積に等しくなると思われる。どちらの指数則モデルでも、ほぼこの関係が成り立っており、妥当な部位別気密性測定がなされている様に思われる。

しかし表4と5から、実は不合理が生じていることが分かる。表5は各気密条件での指数 $n$ を比較したものである。風量差による回帰結果を見ると、本来 $1 \sim 2$ の範囲であるはずの指数 $n$ が不合理な $2.2$ となっている。表4

表4 各気密条件の決定係数  $COD$  と指数  $\eta$  と  $n$  の  $\beta$

		風量式指数則モデル	圧力損失式指数則モデル
気密条件1	$\beta$	0.70467	0.70457
	$COD$	0.99897	0.99897
気密条件2	$\beta$	0.98413	0.98391
	$COD$	0.99772	0.99773
風量差回帰	$\beta$	3.23732	3.23734
	$COD$	0.99997	0.99997

表5 各気密条件の指数  $n$  の比較

	気密条件1	気密条件2	風量差回帰
指数 $n$	1.9001	1.6562	2.1986

は、二つの気密条件と、風量差回帰での、決定係数  $COD$  と指数  $\eta$  と  $n$  に対しての  $\beta$  を示す。風量差回帰における前提の不適合率  $\beta$  の値が 3.2 程の大きな値になっており不合理を検出している。しかし  $COD$  は約 0.9999 であり、不合理は検出できていない。

#### 4.3 天井面の隙間風経路の変化

気密条件1と2の其々の測定は問題が認められない。しかし、風量差からの回帰結果を見ると不合理な結果となった。これは部位別測定法的前提は、隙間は壁体の法線方向に隙間風が流れる互いに独立した流路の並列だけとするが、実際には、壁体内の空気層や屋根裏空間があるので、隙間流路は合流や分岐や直列が起り、前提が成り立たないからと思われる。本建物では、狭いが天井裏空間があるので、天井の周囲をシールしても、天井裏空間につながる別の隙間を隙間風が流れるからであろう。従って、壁体内部に空気層があることが多い木造建築に部位別気密性測定法を適用する場合には、注意を要すると思われる。

#### 4.4 気密条件3の測定結果

気密条件2の後も、表3の気密条件3の気密化工事を行い、測定を実施し、図6に示す測定結果を得た。測定は、10~70Pa間を自動往復で100点測定したが、10~20Paの範囲で、往と復の風量が異なっている。室内減圧によりパテがとれたと思われる。本測定システムは、リアルタイムで図6の様なグラフを見ることができ、こうしたトラブルを察知可能である。表6に、圧力損失式指数則モデルの決定係数  $COD$  と指数  $n$  に対する  $\beta$  を示す。回帰式残差により重み変化して回帰されることで、パテ破損の悪影響は小さくなるが、重みが全て1の場合には不適合率  $\beta$  は1より大きくなり、測定の前提の不成立を検出している。

#### 5. まとめ

従来の総相当隙間面積  $aA$  の算出には、差圧  $\Delta p$  の仮定を要し、これに基準差圧として 9.8Pa を用いていたこ

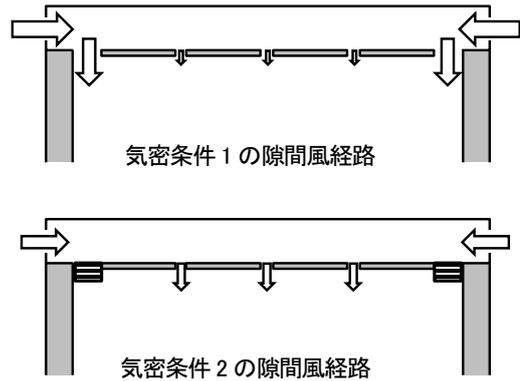


図5 気密条件1と2の天井面隙間風経路の変化

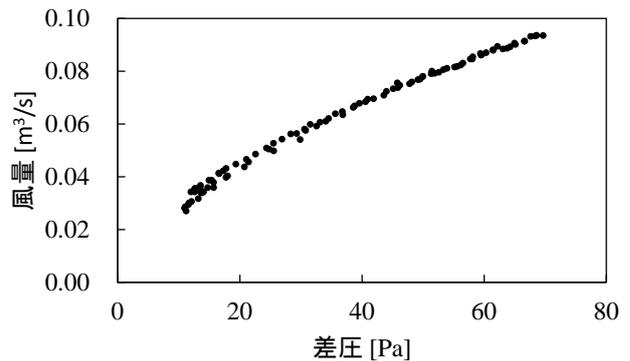


図6 気密条件3の測定結果

表6 気密条件3の決定係数  $COD$  と指数  $n$  に対する  $\beta$

		圧力損失式指数則モデル	
		重み $w_j=1$	重み $w_j$ 変化
気密条件3	$\beta$	1.08406	0.85029
	$COD$	0.99273	0.99597

とで、単純相当隙間面積  $s$  よりも大きめに評価される様である。基準差圧には、両者の相当隙間面積が等しくなる  $\rho/2$  約 0.6Pa を用いるのが良いと思われる。一方、部位別気密性測定法を、壁体内部に空気層が多い木造建築に適用する場合には、注意を要する。また何らかの測定の前提が成り立たない状況の判断には、決定係数  $COD$  では不十分であり、前提の不適合率  $\beta$  は有用である。適切な統計的評価を行うには、測定を自動で百点程行なえる装置が有用である。部位別気密性測定法で、測定の前提が成り立たなかった仕組みについては、換気回路網計算等を用いて検討してみたい。

#### 謝辞

本論の気密測定は、神奈川大学2016年度の卒業研究として、森優一と中村雅信により行われました。本研究は JSPS 科研費 JP16K06623 の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- [1] JIS A 2201: 送風機による住宅等の気密性能試験方法 (2003年版)
- [2] Hiroyasu Okuyama, et al., Reconsideration of parameter estimation and reliability evaluation methods for building airtightness measurement using fan pressurization, Building and Environment, 47 (2012), p373-384
- [3] 奥山博康, 吉浦温雅, 気密性能の測定不確かさ標準偏差推定法と基礎式の再検討, 日本建築学会(九州)大会学術講演梗概集, 環境工学II, 2016年8月, pp833-834