

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

正会員 ○奥山博康*¹
正会員 吉浦温雅*²最小二乗法 測定不確かさ 移動平均曲線
指数則モデル 二次式モデル 信頼性評価法

1. はじめに

建物の気密性は、必要な換気を省エネで効果的に行うため重要であるが、実態の気密性は不明な場合が多く、現場測定法が重要である。この測定法は標準にもなっているが、信頼性評価と精度の向上に関する課題等が残っており、例えば奥山等^[1]による研究が行われている。風量と差圧の測定不確かさ標準偏差は、システム同定の前提の不適合率 β ^[1]を計算するため必要であるが、従来は、測定器の精度とされる $\pm X\%$ 等の値から仮定していたので、より合理的な推定法が必要である。また現状の基礎式は指数則が用いられているが、水理学で Prony が導いた物理学的な意味が明確な二次式モデルの可能性を検討する。そこで従来よりも大量の測定値を得て、統計的に有意な分析をする新たな方法により検討した。

2. 測定値分析の表計算プログラムの概要

2.1 移動平均曲線による測定不確かさ推定

表計算は最大 200 組の差圧と風量の測定値を処理可能とした。図 1 には測定点と移動平均折れ線の一部を描いた。差圧の測定不確かさを推定する方法を、移動平均個数が 10 個の場合を例にとり説明する。風量 q を横軸に、差圧 Δp を縦軸にとり、風量の大小順に測定点をプロットする。風量が最小の a 点から 10 個目の b までの風量と差圧のそれぞれの平均値を計算し、これにより移動平均点 c をプロットする。次に 2 番目に小さい d 点から 10 個目の e 点までの平均値を計算し f 点をプロットする。この手順を、風量が最大の点が移動平均に含まれるまで繰り返す。こうして移動平均点を折れ線で結ぶ曲線が描かれる。この移動平均曲線の範囲は、測定点の分布範囲よりも狭くなる。この曲線を測定不確かさ平滑化曲線とも呼ぶ。この曲線と測定点の間で差圧軸方向の偏差が取れる測定点については、全ての偏差を用いて標準偏差 $\sigma_{\Delta p}$ を計算する。この図では偏差が取れる最小の測定点は g である。次に偏差が取れる測定点は h である。点 h と偏差が取れる移動平均曲線の区間は、点 i と点 j を結ぶ線分で計算できる。この区間内を比例配分の計算をすることで、折れ線上の点 k が得られる。そして点 k と測定点 h の間で偏差 l が計算できる。一方、風量については、横軸は差圧に、縦軸は風量にして、同様な手順を繰り返し、風量測定の標準偏差 σ_q を計算する。以上をアルゴリズムにして表計算に組み込んでいる。

2.2 最小二乗法推定の不確かさと信頼性評価

基本的な理論は既報^[1]に述べている。biweight 法の重みがありと、普通の無しの二種の最小二乗法を用いて、ISO 式と JIS 式の従来の指数則モデル、さらに Prony 式とも呼ぶ二次

式モデルの其々 2 種のパラメータを推定する。ここに biweight 法の重み付き最小二乗法では繰り返し収束計算となる。なお ISO 式は具体的には $q=C \cdot \Delta p^n$ 、JIS 式では $\Delta p=D \cdot q^n$ 、Prony 式では $\Delta p=Di \cdot q^2+Dv \cdot q$ と表せる。

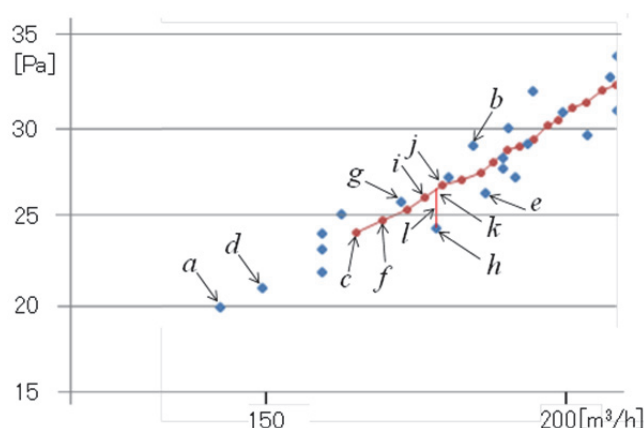


図 1 移動平均曲線による測定不確かさ推定

そして標準法の信頼区間等の算出をするだけでなく、回帰式残差からの不確かさ伝播として得られた推定パラメータの不確かさ標準偏差 $v\sigma_c$, $v\sigma_\eta$, $v\sigma_D$ と $v\sigma_n$ を求め、一方、測定不確かさだけからの伝播としてのパラメータの不確かさ標準偏差 $m\sigma_c$, $m\sigma_\eta$, $m\sigma_D$ と $m\sigma_n$ も求める。後者の標準偏差に対し前者の比率 $v\sigma/m\sigma$ が前提の不適合率 β であり、信頼性評価指標とするが、通常決定係数 COD も算出する。指標 β は 1 程度か多少小さいぐらいが正常と考えられる。測定の前提とは、推定パラメータの時間不変性や回帰式の構造的適合性等を意味する。従って圧力差によって隙間の大きさが変化したり、外風圧の変動が大きければ β は 1 よりもかなり大きくなることを数値実験で確かめている^[1]。ただし今回の実験ではこうした状況は見られなかった。なお指数則モデルでは回帰が対数尺度で行われるため、決定係数では判断し難い^[1]。

3. 実験の概要

横浜キャンパス内に設置した床面積約 8m² の小規模プレファブ建物に市販の気密性測定装置を取り付けて測定した。予備測定により、気密性が悪いことが分かり、窓と戸と隅部等にテープで目張りをを行い隙間を減らした。現状の気密測定装置は沢山の多点自動測定が困難なので手動で 100 点程測定したが、各測定点の間は定常に近づく様に数分間置いた。本報の測定日は 2015 年 10 月 2 日で室温 27°C、外気温度 25°C で内外温度差は約 2°C であった。

4. 測定不確かさの推定法の実験結果と考察

内外差圧を 25 から 75Pa の範囲で測定した。前述した様な移動平均曲線を測定点 10 個ずつで作り図 2 に示す。

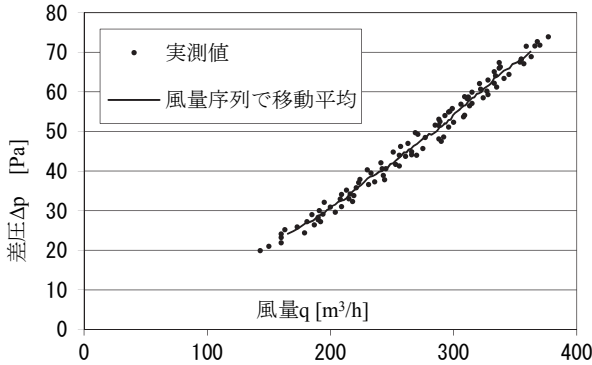


図 2 測定点と 10 個ずつの移動平均曲線

さらに様々な移動平均個数で測定不確かさを計算して、差圧に関しては図 3、風量に関しては図 4 のグラフにした。

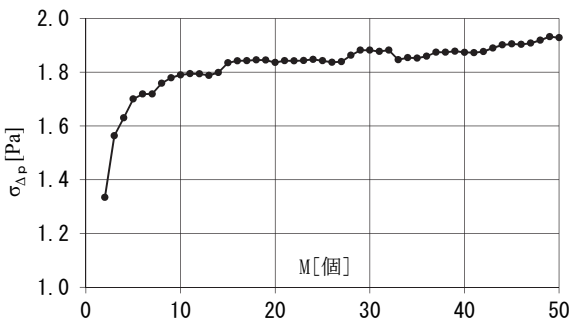


図 3 差圧測定不確かさ標準偏差と移動平均個数 M

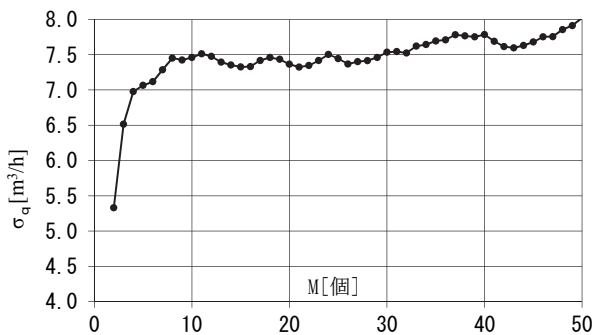


図 4 風量測定不確かさ標準偏差と移動平均個数 M

移動平均曲線は変化性状を表現するため、なるべく少ない個数で曲線を得ることが望ましい。図 3 と 4 を見ると、移動平均個数が 10 個より多くても、測定不確かさ標準偏差は大きく変化しない。従って本測定では、またおそらく一般的にも、10 個程度の移動平均が良いと思われる。表 1 に 5 個と 20 個の場合を含め測定不確かさを示す。

5. 指数則と二次式モデルの違いの検討と考察

同じ測定データにより、指数則式と二次式の 2 種類の回帰式の適合度を検討した。図 5 に示す両回帰式は、実際の隙間風が起こる微差圧で比較的大きな違いを示す。指数則式は差

圧 0 での微分係数が 0 になる特徴がある。

表 1 移動平均個数による測定不確かさ

| | 5 個 | 10 個 | 20 個 |
|--------------------------|-------|-------|-------|
| $\sigma_{\Delta p}$ [Pa] | 1.700 | 1.790 | 1.836 |
| σ_q [m³/h] | 7.065 | 7.460 | 7.365 |

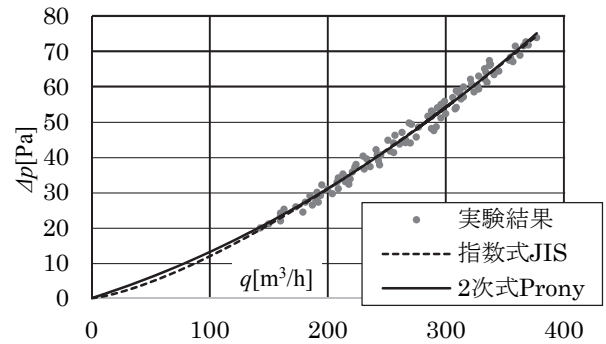


図 5 指数則式と二次式の回帰式と測定値の比較

これらの回帰式の推定係数と信頼性の評価指標を表 2 に示す。適合度の優劣を不適合率 β や決定係数 COD で比較しても明確な違いが表れていないのは、重要な微差圧域での検討ができなかったことが大きな原因と思われる。ここで相当隙間面積を a [m²] とする。指数則式では $\Delta p = (\rho/2)(q/(3600a))^n$ から $a = (1/3600)(\rho/(2D))^{1/n}$ である。従って $a = 6.03 \times 10^{-4}$ [m²] = 6.03 [cm²] となる。一方、二次式モデル $\Delta p = D_i \cdot q^2 + D_v \cdot q$ で本間^[2]等の式を参考にすると、 $a = (1/3600)(27 \cdot \rho / (35 \cdot D_i))^{1/2}$ であるから、 $a = 169 \times 10^{-4}$ [m²] = 169 [cm²] となり、相当隙間面積が大きく異なるので、既往の研究の再検討が必要と思われる。

表 2 指数則式と二次式の回帰係数・指数と信頼性評価指標

| | 指数則モデル $\Delta p = D \cdot q^n$ | | 二次式(Prony)モデル | |
|--------------|---------------------------------|----------|---------------|----------|
| | D | n | D_i 動圧 | D_v 摩擦 |
| 推定値 | 0.0205743 | 1.38079 | 0.00024863 | 0.105270 |
| 不適合率 β | 0.935440 | 0.568757 | 0.602213 | 0.602707 |
| 決定係数 | 0.987397 | | 0.987197 | |

6. まとめ

測定信頼性評価指標の計算に必要な測定不確かさを求める方法を考案し実験で確かめた。今後は、従来の指数則式に対して、二次式モデルの可能性を検討していきたい。

【謝辞】 本実験と測定データ分析は、神奈川大学 2015 年度の卒業研究として、山崎一二三と瀧田湧基が行った。

＜参考文献＞

- [1] H. Okuyama, Y. Onishi, Reconsideration of parameter estimation and reliability evaluation methods for building airtightness measurement using fan pressurization, Building and Environment, vol. 47, pp373–384 (2012)
- [2] 本間宏, 建築壁体すきまの通気量計算式中の指数項について, 日本建築学会論文報告集, 78 号, 1984 年 1 月, pp67-78

*1 神奈川大学・教授・工博

*2 神奈川大学・特別助教・工博

*1 Professor, Dr. Eng., Kanagawa University

*2 Assistant Professor, Dr. Eng., Kanagawa University