

夜間の室内外温度降下と粗視化仮定を用いた外皮平均熱貫流率の導出と評価に関する実験的検証

正会員 ○河野 徳郎 1*

鳥海 哲史 3***

池本 洋一 1* 正会員

北垣 亮馬 4****

正会員 山崎 俊彦 2**

熱伝導率

現場実測評価

Ua 値推定

1. はじめに

建築物における一次エネルギー消費量の節約がますます求められる近年にあつて、省エネ性能指標の一つである Q 値や Ua 値の重要性は、住宅建築の取引市場においてさらに高まりつつある。この一方で、計算に必要な情報（図面、設備情報、施工情報）は、建築物の所有者や取扱業者が網羅的に完備しているとは限らないため、既存新築区別なく性能表示を普及していくためには、今後、多大な社会コストがかかることが予想される。

この一方で、建築物の基礎情報の完備性に頼らず、実測に基づいて Q 値を得る手法として、例えば、松尾らの濾波法¹⁾やより詳細に検討した阿部・坂本らの手法²⁾があげられる。これらの優れている点は、単純な一つの空間モデルとして内外部を区画し、モデルに基づいて熱回路を方程式として解くための実測手法を工夫しながら導出する点にある。そして、その未知数の組合せである対象建築物の「総熱貫流抵抗 b_0 」を得てから床面積で除すことで Q 値を得る。また、空間モデルの表面積や表面を被覆する材料の違いが既知であるならば、当然ながら Ua 値も得ることもできる。近年では、この手法を下敷きに、実測データから簡易な評価指標を提案するような検討事例は散見されるものの、既往の検討手法を踏襲しつつ、モデル本来の成り立ちに立ち戻り、実測値から住宅の Q 値や Ua 値を得る新しい工夫について検討した研究は少ない。

そこで、本研究では、松尾、阿部・坂本らの考え方に沿って、新たに、材料学的な観点から、「みかけの比熱」を組み込む手法と、夜間の室内外の温度降下の特長を想定した粗視的な仮定をおくことで、粗視的な Ua 値を得る手法を検討することを目的とする。

2. モデル

2.1 想定するモデルの条件について

図-1 にモデルを示す。円の内部を室内、円の外部を室外、円の周縁部を建築物の内外境界部分とみなしたモデルであるとし、円内部の室内から円外部にむかって熱が移動する場合を考える。また、記号は図-1 の表記とこの後に記述する式中の説明によるものとする。

例えば夜間のように、日中に日射などの熱入力があつたため、室外よりも室内温度が高くなった後、室内には

熱源がない状態から、一晩かけて室外温度に引っ張られて室内温度が低下していく場合を想定する。夜間の任意の時刻 t に部屋の壁から単位面積 1 m^2 あたり熱 $Q(t) (\text{J/m}^2)$ が移動したとすると、以下の式が成立する。

$$-\frac{dQ(t)}{dt} = \frac{\lambda}{d_{\text{wall}}} (T_i(t) - T_o(t)) \quad (1)$$

ここで、 λ : 壁のみかけの熱伝導率、 d はみかけの壁の厚さである。さらに壁の容積比熱を $C_{\text{wall}} (\text{J/m}^3 \cdot \text{K})$ 、壁の平均温度を T_{ave} 、空気の容積比熱を C_{air} 、屋内均質空間の単位体積あたりの露出表面積を $s_{\text{exposed}} (\text{m}^2/\text{m}^3)$ とすると、単位体積あたりの均質壁の体積分率 r_{wall} によって

$$s_{\text{exposed}} \frac{dQ(t)}{dt} = C_{\text{wall}} r_{\text{wall}} \frac{dT_{\text{ave}}(t)}{dt} + C_{\text{air}} (1 - r_{\text{wall}}) \frac{dT_i(t)}{dt} \quad (2)$$

とあらわせる。ここで室内外温度の時間変化の差を調べると、 $T_o(t) < T_i(t)$ であり、外乱がない場合には、

$$\frac{dT_o(t)}{dt} < \frac{dT_{\text{ave}}(t)}{dt} < \frac{dT_i(t)}{dt} \quad (3)$$

が多くの実測日に成り立つ。また、夜間の測定である場合、温度の時間変化である $dT_o(t)/dt$ と $dT_i(t)/dt$ の差は極めて近接する傾向を持つ。ここで両者の差が 10% 程度、十分近接するほど短いインターバルで測定を行ったとし、 $dT_o(t)/dt \approx dT_i(t)/dt$ として、(1)、(2) 式を連成して、

$$-\frac{C}{s_{\text{exposed}}} \frac{dT_i}{dt} \approx \frac{\lambda}{d_{\text{wall}}} (T_i(t) - T_o(t)) \quad (4)$$

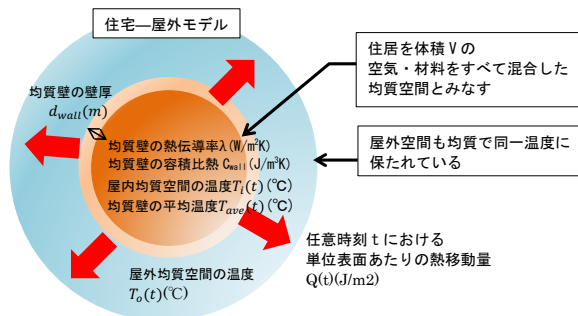
ただし、 $C = C_{\text{wall}} r_{\text{wall}} + C_{\text{air}} (1 - r_{\text{wall}})$ であり、さらに整理した以下の左辺が部屋の熱変動のしやすさである。

$$\frac{s_{\text{exposed}} \frac{\lambda}{d_{\text{wall}}}}{C} \approx \frac{-\frac{dT_i}{dt}}{T_i(t) - T_o(t)} \quad (5)$$

これは、一般的にはみかけの熱拡散率 $\lambda/C (\text{m}^2/\text{sec})$ と定義されるパラメータに近い指標となる。これを D_{para} : 熱拡散パラメータと呼び下記のように定義する。

$$D_{\text{para}} = \frac{\lambda}{d_{\text{wall}} C / s_{\text{exposed}}} \quad (6)$$

D_{para} を実験的に求めるためには、例えば、実測時に逐次算出して、その都度求めることもできるし、18 時～早朝 5 時あたりの時間帯を選んで、内外温度データを測定し、 $-dT_i/dt$ を X 軸、 $T_i(t) - T_o(t)$ を Y 軸として散布図を作製するとその回帰直線の傾きとして得ることもできる。



図—1 モデル概要

ここで、このモデルの $U_a(\text{W/m}^2\text{K})$ を考えると、この空間の被覆面積でみた単位平米あたりの熱貫流なので、

$$U_a = \frac{\lambda}{d_{\text{wall}}} = \frac{D_{\text{para}} C}{s_{\text{exposed}}} \quad (7)$$

となる。この場合、 U_a 値を得るには、建築物の容積比熱 C と単位体積あたりの表面積が必要であり、実測から D_{para} を得た場合には、さらに C と s_{exposed} が必要である。

C は住宅全体に含まれる平均的な材料（空気を含む）の見掛けの容積比熱なので、コンクリート、鉄、断熱材、空気などの容積比熱を体積分率をかけて求めなければならない。モデルの幾何学的な関係に従えば

$$C = C_{\text{wall}} r_{\text{wall}} + C_{\text{air}} (1 - r_{\text{wall}}) \quad (8)$$

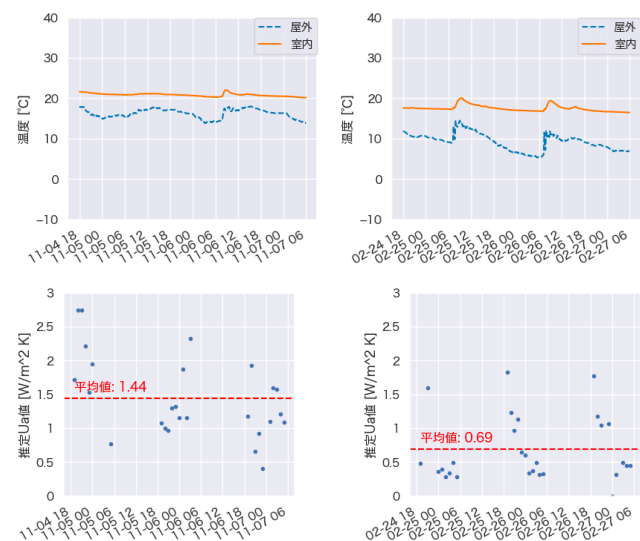
である。しかし、容積比熱の観点からみると、（コンクリート、金属類）と（空気および断熱材）はオーダーが 10^3 かけ離れており、かつコンクリートに比べて、金属類の容積比熱は、1.5~2.5 倍程度であり、かつ既知である。また、構造体や材料については延べ床面積あたりの使用体積は、一般的に躯体数量や歩掛りというキーワードで平均的に積算資料などから知られているため、これを C に用いることができる。また、同様に容積比熱が高そうな壁材などに用いられる量は少量であると考えられるが、これについても平均的な歩掛情報が積算資料などから得られる。よって、これをもとに測定した D_{para} 値に C として構造種別ごとの平均的な値を用いて、 $D_{\text{para}} C$ を用いればおおむね $U_a s_{\text{exposed}}$ を推定、あるいはそれに相当する評価値を得られることになる。

3. 実験

計測には独自開発した IoT センサを利用した。これは OMRON の 2JCIE-BL01 を利用し、温湿度、騒音（音量）、照度、気圧、加速度を 5 分毎に計測できる。データは移動体通信を介してほぼリアルタイムにサーバに蓄積される。センサの設置位置は主たる居室の屋内外の窓枠上部とし、取付治具によりセンサと窓ガラスの距離を一定にした。

RC/SRC、重量/軽量鉄骨、木造の賃貸集合住宅 102 戸に

ついて計測を行った。2021 年 7 月から 2023 年 3 月にかけて、関東の空室物件についてそれぞれ 4 日間（3 晩）以上のデータを取得した。例として、株式会社エフステージの物件（SRC 造、築 23 年）の計測結果を図—2 に示す。左カラムが断熱改修前、右カラムが断熱改修後である。上段が計測した屋内外の温度の時系列変化を示し、下段がモデルの仮定通りに温度が単調低下している時間帯について、屋内外温度差と照度が閾値以上のデータから逐次算出した推定 U_a 値を示している。推定 U_a 値の平均は断熱改修前が $1.44\text{W/m}^2\text{K}$ 、断熱改修後が $0.69\text{W/m}^2\text{K}$ となり、物件の熱特性が改善されていることがわかる。



図—2 粗視化熱貫流率の算出結果

4. まとめ

本研究では、松尾、阿部・坂本らのモデルに基づき、夜間の冷却現象を用いた仮定を行うことで、実測にもとづき粗視的な U_a 値の評価を行った。その結果、この評価値により相対的な評価が可能であることがうかがえた。

参考文献

- 1) 松尾陽、斎藤平蔵:現場測定にもとづく住宅熱特性の推定、日本建築学会環境工学論文集、第 3 号、pp.13-18、1981.4
- 2) 阿部尚史、坂本雄三：現場実測による住宅の熱損失係数の同定手法に関する研究：その 3 同定結果とその考察、日本建築学会学術講演梗概集、D-2、pp.21-22、2003.7
- 3) 山崎俊彦、大淵友暉、林遠、北垣亮馬、鳥海哲史、林幹久、酒井藍、芳賀宣仁、野村眞平、池本洋一、“IoT センシングによる不動産物件の断熱・防音性能評価、” 2019 年度人工知能学会全国大会(第 33 回)、1D2-OS-10a-01、朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター、新潟県新潟市、Jun. 4-7、2019