

内外温度差減衰を用いた住宅の熱性能の同定手法の開発

森 太郎 [北海道大学・大学院工学研究院／准教授]
菊地 洋 [コーナー札幌／取締役専務]
佐藤 彰治 [釧路工業高等専門学校／教授]
小倉 寛征 [エスエーデザインオフィス一級建築士事務所／代表]
小笠原 一隆 [ほくでん総合研究所エネルギー利用グループ]

背景・目的

北海道では、北方型住宅事業の進展に伴い、全国で最も断熱、気密性能の良い住宅が供給されるようになってきている。この背景には、室温の上昇による、冬の生活の質的な向上や省エネルギーによる省コストに加え、昨今の地球温暖化への対応により、「断熱性能が良い」ことは、新築、中古を問わず当然の要求項目となってきている。しかし、その断熱性能の評価、検査としては熱貫流率を求め、熱損失係数を図面上で計算することに留まっており完成した建物の断熱性能を検査し、評価する手法は確立されていない。そこで本研究では、内外温度差の減衰を用いて、簡便な熱損失係数又は住宅性能の測定手法の開発を行う。

内容・方法

I 内外温度差減衰実験

釧路工業高等専門学校と北海道電力に設置されている実験住宅において下記の共通手順で実験を行う。
測定項目：室温(各建物で約50点)、室内壁表面温度(各壁面5点、貼り付けタイプ赤外線表面温度計)、外壁表面温度(各壁面5点、貼り付けタイプ赤外線表面温度計)、サーモカメラ撮影、外気温度、外気風向風速、CO₂濃度
測定方法：

1日目：住宅には手を加えずそのままの状態で行う
①測定準備(内部のドアを全て開放、測定機器設置)、②気密測定の実施(C値、換気風量算出)、③石油ファンヒーターで暖房(温度上昇)、測定開始、ファンで空気攪拌、④三時間の暖房後、出力をカット、⑤6h 後に測定終了
2日目：住宅の窓に断熱材を貼り付けた後、1日目と同様の方法で温度の減衰を測定する。

II 解析手法

住宅の内外温度差が減衰していく様子は1質点の集中常数系で解析することができる。これは非常に簡単な微分方程式で表すことができ、また、実現象と解析解也非常によく一致する。減衰を決めるのは室温変動率とよばれる、熱損失係数／熱容量である。実現象と解析解のフィッティングによって求まるのは室温変動率であり、両者のいずれかを決定するためには、いずれかを仮定しなければならないが、本手法では熱損失係数について2

種類の状態を作り出すことによって、二つの未知数に二つの方程式を作成し、両方を決定する。

結果・成果

I 開発した機器

本研究では測定を簡易に行うため以下の機器を開発した。

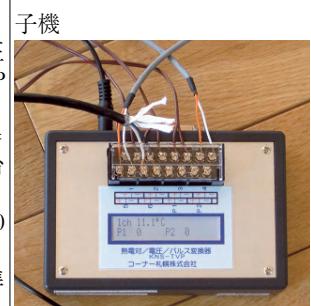
表 I-1 小型放射温度センサー

小型放射温度センサのデジタル出力を電圧に変換し汎用ロガーに出力変換する。内外の壁表面温度の効率的な測定に用いる。
1. 温度測定範囲：-25°C～95°C
2. 温度精度：0～50°Cに於いて±1°C、それ以外は±2°C
3. 温度測定角度：±20°
4. 放射率設定範囲：0.06～1.00
5. 出力電圧：測定温度×0.05V(-1.25～4.75V)
6. 電源：6V 約10mA



表 I-2 無線データロガー

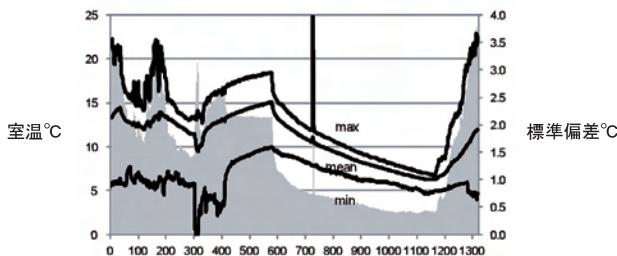
本測定は室内に多点の様々な物理量の測定が必要となる。効率のよい測定のため、無線機器を用いてデータを収集するシステムを開発した。子機では熱電対／電圧／パルス変換器KNS-TVPの測定データを回収記録し、そのデータをXeeで親機に送信し記録を行う。
1. 親機性能
①測定項目：熱電対／電圧／パルス変換器KNS-TVPを最大14台記録できる。
③記録容量：使用回数=カード容量÷(70×子機台数)
④測定間隔：10秒から60分まで設定可能
⑤通信(有線)：RS232C準拠、通信条件：9600 bps、8 BIT、STOP 1、NON-PALITY
⑥通信(無線) XBeePRO無線機を内蔵。
2. 子機性能
①アナログ6チャンネル、パルス2チャンネルの変換器で、「XBee-PRO ZB組込みRFモジュール」を内蔵又はRS232CI/Fを利用して外付けする。
②入力仕様：アナログ(T熱電対、直流電圧)6チャンネル、パルス2チャンネル
③インターフェース：a.内蔵XBeeモジュール、b.RS232C



II 実験結果

①測定の概要

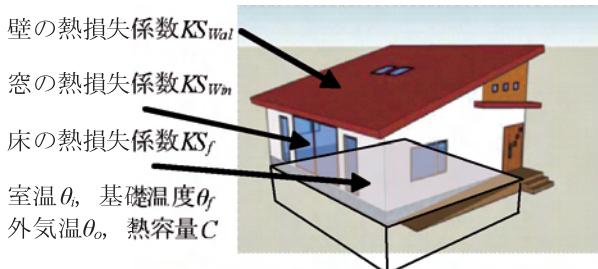
図II-1は実験住宅1の室温の推移である。350分後から加熱を開始し約4時間後の600分までに約5°C温度上昇をさせることができた。図中の三本の線は同時刻の最大値、平均値、最小値を表している。加熱中に比べ減衰中は建物内の温度差が小さくなっているのがわかる。それを表しているのが室温の標準偏差で加熱終了後、同時に室温の標準偏差は速やかに減少し1°C以下となっているのがわかる。これは室温の自然温度減衰時には室内の温度を一点で代表できることを表しており、熱性能値の実測をおこなう際には、自然温度減衰時の室温変動は非常に適していると言える。



図II-1 温度差減衰時の室温変動の様子

②実験住宅1の熱損失係数の算出

実験住宅1についての微分方程式を作成すると(1)のようになる。この住宅の場合、基礎が大きく、その熱容量のために1Fとは全く違う減衰をしてしまうと考え、基礎部分は別に取扱い(一定温度とした)1Fについての熱損失係数のみ求めることにした。この微分方程式を θ_i について初期条件を $t=0$ at θ_{i0} として解くと(5)式のようになる。式中のA、Bは(3)、(4)式に示されているとおりで、 KS_{wal} 、Cは未知、その他の KS_{win} 、 KS_f 、 $c\varphi Q$ はそれぞれ求めることができる。特に KS_{win} は断熱材貼り付けなしと断熱材貼り付けありの二種類の値を取り扱うことになる。また、それぞれ減衰の形式が異なるので、



$$C \frac{d\theta_i}{dt} = KS_{wal}(\theta_o - \theta_i) + KS_{win}(\theta_o - \theta_i) + c\varphi Q(\theta_o - \theta_i) + KS_f(\theta_b - \theta_i) \quad (1)$$

$$C \frac{d\theta_i}{dt} = -A\theta_i + B \quad (2)$$

$$A = KS_{wal} + KS_{win} + c\varphi Q + KS_f \quad (3)$$

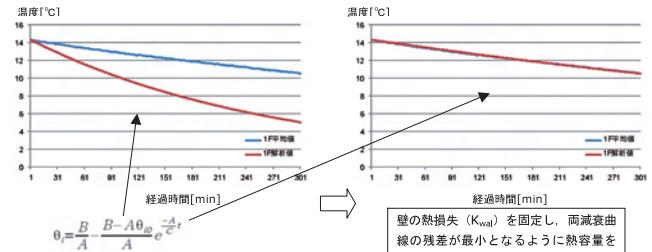
$$B = (KS_{wal} + KS_{win} + c\varphi Q)\theta_o + KS_f\theta_b \quad (4)$$

$$\theta_i = \frac{B}{A} + \frac{B - A\theta_{i0}}{A} e^{-\frac{t}{C}} \quad (5)$$

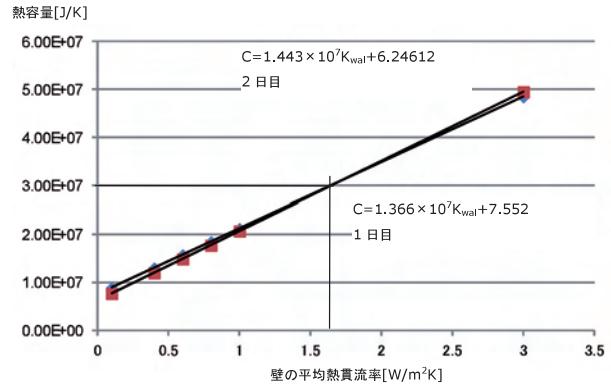
図II-2 解析モデル

KS_{wal} とCのそれぞれの関係を求めることができ、二つの未知数に対して、二つの関係式を求めることができるため、両者が交差するところで両者に共通する KS_{wal} とCの関係を求めることができる。

図II-3は1Fの測定点の平均値と解析値を表している。左側は熱容量の最適化前、右側は熱容量の最適化後のグラフである。左図は熱容量の最適化をおこなったため、実測値と解析値(式5)が非常に良く一致している。この作業を幾つかの熱貫流率について行い、それぞれ熱容量の最適値を求めた結果が図II-4である。◆が1日目(断熱材なし)■が2日目(25mmEPS)の結果である。1日目の方が切片値が大きく、また傾きが小さいため両者が熱貫流率1.7W/m²Kの位置で交わっている。つまり1日目と2日目に共通の熱貫流率と熱容量の関係は1.7W/m²K、 3.0×10^7 J/Kということになる。実際の図面から読み取った熱貫流率は1.0弱程度であるので約2倍の値となってしまっている。このケースの場合、窓に設置したEPSの断熱性能が良くなかったため、どの位置で交わるのかの判断が非常に難しかったと考えられる。



図II-3 熱容量の最適化の様子



図II-4 実験住宅1の測定結果

図II-5は実験住宅1と同様の手法で算出した壁の熱損失係数である。4本の近似直線が0.4W/m²K周辺で交わっているのがわかる。この0.4W/m²Kという値はGW100mmに内外の一般的な総合熱伝達率を加えた値であり、よい精度で再現できていると考えられる。また、近似直線を一本ずつみても2日間で計測した断熱材ありの値がほぼ同じ直線となっていること、断熱材なしの直線と断熱材ありの直線の位置関係がズれていない(断熱材ありは傾きが大きく、切片値は小さい)ことから再現性もあると考えられる。

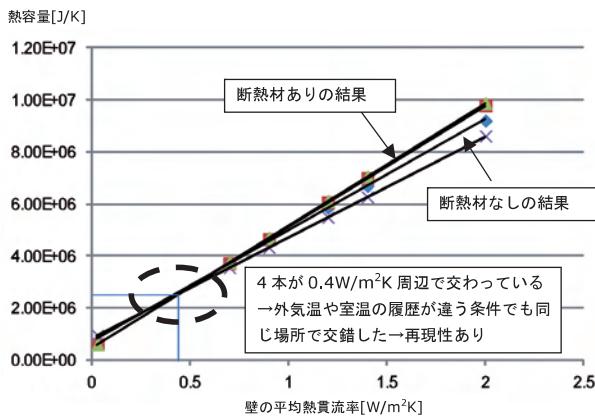


図 II-5 実験住宅2の測定結果

今後の展望

本手法は住宅の一部の断熱性能を変化させ、その一部の違いが温度差減衰に与える影響から未知の場所の熱損失係数を求める手法である。したがって、その一部の違いが全体の熱損失に比べて影響が小さいと減衰曲線に変化が生まれず、熱損失係数の算出が難しくなってしまう。

また、どの時間帯の温度差減衰をとるのかによって値が変わる可能性がある。これは、建物の種別等によっても異なってくるであろうし、測定を始めるまでの温度履歴等も問題になるかもしれない。

今後は、さらに a. 様々な住宅において実績を増やすとともに、数値解析を実施し、b. この時間帯の温度差減衰をとるべきなのか、c. 前日までの温度履歴の影響等について検討をつづけ、2年後をめどに測定手法のパッケージ化を目指す。