住宅の外壁における熱貫流率の簡易現場実測法の開発

DEVELOPMENT OF A SIMPLIFIED METHOD FOR MEASURING THE THERMAL TRANSMITTANCE OF THE BUILDING ENVELOPE

黒田麻椰 — * 1 張 晴原 — * 2
田中稲子 — * 3

Maya KURODA — * 1 Qingyuan ZHANG — * 2
Ineko TANAKA — * 3

キーワード：
熱貫流率, 簡易現場実測法, 差分法, 実測, 住宅

Keywords:
Thermal transmittance, Simplified measuring method, The finite difference method, Field measurement, A dwelling house

A simplified method for measuring the current thermal transmittance is suggested in this paper. First, temporal changes of the sectional temperatures of the building envelope were simulated by the Finite Difference Method. By using these results, the method for measuring the thermal transmittance in a state that closes to steady state was found. The accuracy was examined by comparing with the true values. Finally, the proposed method was used to measure the thermal transmittance of exterior wall of an existing house to confirm the usefulness of this method.

1. はじめに

近年、建築物の長寿命化、省エネ性能の向上、居住者の健康性及び熱的快適性の向上が求められており、既存住宅では断熱性能の検査をすることで断熱改修等の必要性を判断し、個々に適した対策を施す必要がある。2013年に施行された現在の省エネ基準においては、既存住宅の断熱性能の評価に外皮平均熱貫流率が用いられており、その算出には外壁の熱貫流率（以下「 K 値」）が必要となる。 K 値は外壁を構成する各層材料の物性値と厚さなどから求められるが、既存住宅では設計図書がない場合や、断熱材の施工精度、経年劣化、気密性などの影響があるため、現状の K 値は不明であることが多い。

これまで現状の断熱性能の検査手法として服部ら¹⁾や柳澤ら²⁾によって熱損失係数の実測法は提案されてきたが、 K 値の実測法に関する研究は少ない。 K 値の実測法は加藤らによって熱画像法³⁾が提案されているが、熱伝達率センサーや環境温度計の製作が必要であり、市販の温度計やグローブ温度計で実測できる方法が望まれる。

本研究では、冬期において K 値を簡単な現場実測によって求める方法（以下「簡易現場実測法」）を開発することを目的とする。まず、前進差分法⁴⁾（以下「差分法」）による外壁の熱挙動シミュレーションを行い、断面温度の経時変化を調べた。次に、差分法の計算結果から定常状態における K 値の算出式の適応条件を見出し、それらの条件を満たしている時間帯の室内作用温度、室内側壁表面温度、屋外気温を用いて外壁の K 値を求めた。これを真値^{注1)}と比較することによって精度を調べ、簡易現場実測法を確立した。最後に、実在家屋を用いて K 値を測定し、本実測法の有用性を確認した。

2. 簡易現場実測法の考案と精度の検討

2.1 差分法による外壁の熱挙動解析の概要

差分法による外壁断面温度の計算は、標準問題の提案住宅⁵⁾（図1）における居間の南側外壁にて行った。南側とした理由としては、暖房の使用される居間では室内外の温度差が大きくなるからである。

図1 標準住宅平面図

表1 各部材の物性値と厚さ

	熱伝導率 λ [W/m・K]	容積比熱 $c\rho$ [kJ/m ³ ・K]	厚さ d [mm]
木片セメント板	0.17	1678.59	14
			0
グラスウール 10K相当	0.05	8.37	30 70 110
せっこうボード	0.22	904.18	9

表2 検討パターン

パターン名	グラスウール 厚さ[mm]	K 値(真値) [W/m ² ・K]
無断熱	0	3.60
低断熱	30	1.14
中断熱	70	0.60
高断熱	110	0.40

¹⁾ 横浜国立大学大学院生（当時）修士（工学）
〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-1）
²⁾ 横浜国立大学大学院都市イノベーション研究院 教授・工博
³⁾ 横浜国立大学大学院都市イノベーション研究院 准教授・博士（工学）

¹⁾ Graduate Student, Yokohama National Univ., M. Eng.
²⁾ Prof., Yokohama National Univ., Dr. Eng.
³⁾ Assoc. Prof., Yokohama National Univ., Dr. Eng.

気象データには、東京の標準年 EA 気象データ⁶⁾を使用し、対象期間^{注2)} (12月25日～12月30日)の前日からの屋外気温と水平面全日射量を図2に示す。尚、室内作用温度に必要な室温には、AE-Sim/Heat^{注3)}によるシミュレーション結果を用いた。外壁の構成部材は屋外側から、木片セメント板/ガラスウール 10K 相当/せっこうボードとし^{注4)}、部材の物性値と厚さは表1の通りである。ガラスウールの厚さは 0mm/30mm/70mm/110mm と変化させた4パターンで検討し、それぞれ無断熱パターン、低断熱パターン、中断熱パターン、高断熱パターンと名付けた (表2)。尚、居間の在室者は4名であり、19時～0時に設定温度20℃の暖房を行うものとする (図3)。時間差分間隔は安定条件より、すべてのパターンにおいて120秒とした。

2.2 K値の算出結果と精度の検討

言うまでもなく、熱貫流率は定常伝熱の概念であり、非定常伝熱を常とする実在家屋では、外壁において定常伝熱に近い (以下「準定常」) 時間帯を見出し、その時間帯における実測値を用いて K 値を求める必要がある。本実測法では室内作用温度 OT_i 、室内側壁表面温度 θ_{si} 、屋外気温 θ_o の3点の測定で K 値を算出できる定常伝熱の式 (1) を用いる。尚、式 (1) の適用は、日射の影響が小さい夜間 (20時～翌日5時) とする。

$$K = \frac{\alpha_i(OT_i - \theta_{si})}{OT_i - \theta_o} \quad (1)$$

ここで、 K :熱貫流率 [$W/(m^2 \cdot K)$]、 α_i :室内側総合熱伝達率 [$W/(m^2 \cdot K)$] (本研究では $\alpha_i=9.0$ [$W/(m^2 \cdot K)$] とする⁷⁾)、 OT_i :室内作用温度 [℃]、 θ_{si} :室内側壁表面温度 [℃]、 θ_o :屋外気温 [℃]

そこで、準定常状態とは時間変動が十分に小さいことを意味するため、室内作用温度の1時間前との温度変動幅が「 $\pm 1.0^\circ\text{C}$ 以内」、 「 $\pm 0.8^\circ\text{C}$ 以内」、 「 $\pm 0.6^\circ\text{C}$ 以内」である時間^{注5)}に場合分けをし、パターンごとに各条件にて1時間平均の K 値を算出し、それらの平均値と真値との誤差を調べた (図4～図8)。尚、対象となる冬季においては準定常状態であれば「 $OT_i > \theta_{si} > \theta_o$ 」が成り立つ必要があるため、このような時間帯を対象に検討した。

まず「 $\pm 1.0^\circ\text{C}$ 以内」では、 K 値の平均値の誤差が $-20\% \sim +6.5\%$ 程度となり、断熱性能により誤差が大きく異なり、 K 値の測定条件には適切でないと判断される。一方「 $\pm 0.8^\circ\text{C}$ 以内」においては誤差が $-4\% \sim +5.5\%$ 程度、「 $\pm 0.6^\circ\text{C}$ 以内」においては誤差が $+3\% \sim +6\%$ 程度という結果となり、誤差の面では大きな差はなかった。しかし K 値算出結果のばらつきに着目すると、全パターンで「 $\pm 0.8^\circ\text{C}$ 以内」より「 $\pm 0.6^\circ\text{C}$ 以内」の方が小さく、「 $\pm 0.6^\circ\text{C}$ 以内」の方が精度が高いと判断される。したがって、誤差とばらつきに関する検討より総合的に判断し、ここでは「 $\pm 0.6^\circ\text{C}$ 以内」を K 値の算出条件として加えた。

以上をまとめると、冬期において式 (1) により K 値を測定する場合、以下の条件①②を満たしている時間において、誤差を $+6\%$ 程度以下で計測できると言える。

- ① 「 $OT_i > \theta_{si} > \theta_o$ 」
- ② 室内作用温度 OT_i の1時間前との変動幅が $\pm 0.6^\circ\text{C}$ 以内

図2 対象期間前日からの気象条件

図3 居間の在室者数と暖房時間

図4 無断熱パターンの K 値

図5 低断熱パターンの K 値

図6 中断熱パターンの K 値

図7 高断熱パターンの K 値

図8 算出された K 値の平均値と真値との誤差

2.3 K値測定可能時間帯検討

条件①②から得られた測定可能時間の結果を、例として12月28日～31日の3日間、差分法によって計算した各部温度の結果をパターンごとに示す(図9～図12)。壁内部温度とは木片セメント板とグラスウールの界面での温度を意味する。

図中のハッチング部分に示すように、K値測定可能時間帯は、暖房稼働している19時～0時の範囲内にある。0時以降に条件を満たさなくなるのは、暖房が停止すると室内空気温度が低下し、室温、壁体温度に変化を起し条件②を満たさなくなるからである。このことは、暖房稼働時間を長くすることによって測定可能時間を長くなることを示唆されている。

3. 外部風速と有効放射のK値への影響

3.1 外部風速がK値へ与える影響

前章で述べた差分法による壁内熱挙動シミュレーションの際、

屋外側の総合熱伝達率を $23.0[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ 一定としているが、外部風速がK値へ与える影響について明らかにする必要がある。そこで、ユルグスの式⁸⁾による普通面の強制対流熱伝達率を用いて、風速 $0[\text{m/s}] \sim 10[\text{m/s}]$ におけるK値の真値を断熱性能ごとに算出した。図13に示すように、低断熱、中断熱、高断熱の場合には外部風速に関わらずK値はほとんど一定の値を示している。このことから、断熱材を使用している場合には、外部風速がK値へ与える影響は十分小さいことが確認され、屋外の総合熱伝達率を $23.0[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ 一定にしても実務的に問題がないと考えられる。また、無断熱の場合の低風速時には外部風速が大きくなるにつれてK値も大きくなる傾向が見られたが、断熱材の施した外壁のK値測定には影響が限定的である。

3.2 屋外の有効放射がK値へ与える影響

差分法によるシミュレーションでは、屋外において有効放射(夜間放射)を考慮しているが、実測の簡易化を図るため、有効放射を考慮しない場合にK値へどれほどの差が出るのかを調べた。検討は、2章

図9 無断熱パターンの断面温度とK値測定可能時

図10 低断熱パターンの断面温度とK値測定可能時間

図11 中断熱パターンの断面温度とK値測定可能時間

図12 高断熱パターンの断面温度とK値測定可能時間

の結果より「室内作用温度 θ_{ti} の1時間前との変動幅が $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$ 以内」を満たす場合において行い、有効放射以外の条件は全て同様とした。屋外における有効放射を考慮した場合と考慮しない場合の K 値の算出結果を断熱性能のパターンごとに図14～図17に示す。

有効放射を考慮した場合の K 値の平均値よりも、有効放射を考慮しない場合の K 値の平均値はやや小さい結果となり、その差は無断熱において $0.29[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ (図14)、低断熱において $0.09[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ (図15)、中断熱において $0.04[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ (図16)、高断熱において $0.03[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ (図17)であり、許容範囲内の誤差と考えられる。

4. 実在家屋を用いた簡易現場実測法の有用性の検証

4.1 実測概要

本研究で簡易現場実測法の有用性を明らかにするために、実在家屋を用いて K 値を実測した。実測は2019年11月15日から3日間、神奈川県相模原市（省エネ地域区分：VI地域）の築20年の木造2階戸建て住宅（写真1）における1階居間の南側外壁と2階寝室の南側

外壁で行った（表3）。期間中の降雨はなく、屋外風速は穏やかであった。また、対象壁には断熱材として、厚さ不明のグラスウールが使用されていた。式（1）では室内作用温度が含まれているが、気流が静穏^{注6)}な場合、作用温度がグローブ温度にほぼ等しいため、本実測法の測定項目は室内グローブ温度 θ_g 、室内側壁表面温度 θ_{si} ^{注7)}、屋外気温 θ_o の3項目とし、それぞれグローブ温度計、熱電対、サーモレコーダーにて各部温度を測定した（表4、写真2～4）。

4.2 各部温度の測定結果と K 値測定可能時間

各部温度の測定結果と式（1）の条件①と②が満たされる K 値測定可能時間帯を図18、図19に示す。1階は全期間夜間において暖房を使用しており、また居住者の生活活動により θ_g と θ_{si} の温度差が不安定であった。一方2階では、暖房は使用していなかったものの、日中

表3 実測概要

所在地	神奈川県相模原市
構造	木造2階建
竣工	1999年（築20年）
延床面積	93.78 m^2
K値測定対象壁	1F南側外壁/2F南側外壁
居住者人数	4名
測定期間	2019/11/15 0:00～ 2019/11/17 23:55
測定間隔	5分

表4 測定項目と使用機器

測定場所	測定項目	使用機器	設置高さ
1F	室内グローブ温度 θ_g	グローブ温度計 （黒色つや消し中空銅球＋ サーモレコーダー【RS-13】）	950
	室内側壁表面温度 θ_{si}	熱電対【TR-55i】	1300
2F	室内グローブ温度 θ_g	グローブ温度計 （黒色つや消し中空銅球＋ サーモレコーダー【RS-13】）	950
	室内側壁表面温度 θ_{si}	熱電対【TR-55i】	1300
屋外	屋外気温 θ_o	サーモレコーダー【RS-13】	1200

図13 風速を変化させたときの K 値

図14 無断熱パターンの K 値

図15 低断熱パターンの K 値

図16 中断熱パターンの K 値

図17 高断熱パターンの K 値

写真1 実測住宅の南側外観

写真2 サーモレコーダー

写真3 熱電対

写真4 グローブ温度計

図 18 1 階各部温度の測定結果と K 値測定可能時間

図 19 2 階各部温度の測定結果と K 値測定可能時間

図 20 K 値の測定結果

に南側窓のカーテンを一部開けていたため日射が取り込まれ、 θ_g と θ_{si} が上昇した。

4.3 K 値の算出結果

K 値測定可能時間帯(図 18 と図 19 のハッチングされた部分)における 1 階と 2 階の K 値の時間平均を算出した(図 20)。この結果、1 階は $0.42[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ 、2 階は $0.36[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ であり、2.2 節での検討によれば、式(1)による K 値は真値より最大 6%高いことを踏まえると、1 階では $0.40 \sim 0.42[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ 、2 階では $0.34 \sim 0.36[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ となった。

5. まとめ

本研究では、冬期夜間における K 値の簡易現場実測法を開発し、その有用性を明らかにした。以下に得られた知見をまとめる。

- ① 断熱材を使用している軽量壁において、室内グローブ温度、室内側壁表面温度、屋外気温の測定値から K 値を求めることができる。
- ② 式(1)を用いて K 値を求める際の時間帯は、以下の 2 つの条件を満たす必要がある。
 - ・「 $OT_i > \theta_{si} > \theta_o$ 」
 - ・室内作用温度 OT_i の 1 時間前との変動幅が $\pm 0.6^\circ\text{C}$ 以内
- ③ この実測法による誤差は最大 6%程度である。

今後、建材物性値が既知の建築物と壁体を用いて本実測法の有効性をさらに検証し、実用化を目指していく所存である。

謝辞 実測に快くご協力くださった居住者の方々に感謝の意を表します。

注釈

- 注1) $K = 1/(\frac{1}{\alpha_o} + \sum \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_i})$ に表 1 の値を代入したもの(屋外側総合熱伝達率 α_o は $23.0[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ 、室内側総合熱伝達率 α_i は $9.0[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ とする)
- 注2) 対象期間の前に 1 か月の助走期間を設けている
- 注3) 建築環境ソリューションズによる温熱環境シミュレーションプログラム
- 注4) 定常計算の適用に際しては木造や鉄骨造などの軽量壁を対象とする
- 注5) $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以下においては機器の測定誤差の影響も出てくるため、「 $\pm 0.6^\circ\text{C}$ 以内」までの条件設定とした
- 注6) 風速が $0.15 \sim 0.20\text{m/s}$ のとき(本実測では、グローブ温度計と同地点の高さ 1300 にて風速計で計測し、範囲内であることを確認した)
- 注7) 壁表面の熱画像を撮影し、表面温度を代表できる点において測定した

参考文献

- 1) HATTORI, T., SAKAMOTO, Y. and FUKUDA H.: DEVELOPMENTS AND EXAMPLES RELATED TO PRACTICAL FIELD MEASUREMENTS OF THE HEAT LOSS COEFFICIENTS OF DETACHED HOUSES, AIJ Journal of Technology and Design, Vol.14, No.28, pp.491-496, 2008.10 (in Japanese)
服部哲幸, 坂本雄三, 福田秀朗: 戸建住宅の熱損失係数に関する実用的現場実測法の開発と実測例, 日本建築学会技術報告集, 第 14 巻 第 28 号, pp.491-496, 2008.10
- 2) YANAGISAWA, Y., INAYAMA M., MAE M., AOKI K., and SAWAI H.: STUDY ON PRESUMPTION OF HEAT LOSS FACTOR BY SIMPLE FIELD MEASUREMENT OF WOODEN HOUSES, AIJ Journal of Technology and Design, Vol.22, No.51, pp.591-596, 2016.10 (in Japanese)
柳澤泰男, 稲山正弘, ほか 3 名: 木造住宅の簡易な現場実測による熱損失係数推定に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第 22 巻 第 51 号, pp.591-596, 2016.6
- 3) 加藤信介, ほか 3 名: 既存住宅の断熱性能診断に関する技術検証, 生産研究 研究速報, 第 65 巻, 第 1 号, pp.5-8, 2013
- 4) 宇田川光弘: パソコンによる空気調和計算法, 株式会社オーム社, 1986.12
- 5) 宇田川光弘: 標準問題の提案住宅用標準問題, 日本建築学会環境工学委員会熱分科会 第 15 回熱シンポジウム, pp.22-23, 1985
- 6) 日本建築学会編著: 拡張アメダス気象データ, 日本建築学会, 2000
- 7) 三浦昌生: 基礎力が身につく環境工学, 森北出版株式会社, 2006.3
- 8) McAdams, W.H.: Heat Transmission 3rd Ed., McGraw Hill, pp.249, 1954

[2020 年 4 月 13 日原稿受理 2020 年 8 月 25 日採用決定]