

令和元年6月17日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06619

研究課題名（和文）熱画像法による断熱性評価の適用性の拡大に関する研究

研究課題名（英文）Development of applicability of thermography for evaluation of insulation performance of a house on site

研究代表者

長井 達夫（Nagai, Tatsuo）

東京理科大学・工学部建築学科・教授

研究者番号：00316001

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の実施内容は大きく3つに分けられる。外皮の部位熱貫流率の測定法、断熱レベルの異なる住戸の定性的比較、表面結露や隙間風の影響の判定の可否に関する検討である。

最初の課題については、開口部に熱抵抗が既知の断熱材等を設置する方法について、ETセンサーを用い、かつ熱画像による測定を行うことにより一般部の平均熱貫流率の測定が可能との見通しを得た。2番目に対しては全体としては断熱性の差を定性的に識別可能であるものの、1時刻のみの簡易な観測では断熱性レベルの判定結果が逆転する可能性があることが示唆された。3番目については、結露の危険性のある部位、結露の発生頻度をある程度把握可能な判定法を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の省エネルギー基準改正により、従来の床面積あたりの熱損失係数による評価から外皮の平均熱貫流率による評価へと変化した。本研究による知見をもとに、外壁等の各部位に対して、間柱等を含む部位全体の実質的な熱貫流率を測定する方法が整備されれば、新しい省エネルギー基準に従って算出された設計時の断熱性能が竣工後に確保されているかどうかを確認するための汎用的な検査方法の確立に繋がるものと考えられる。加えて、熱画像という面的な診断方法の特徴を活かして、ストック建築の比較的簡易な診断方法の一部を提供することができた。

研究成果の概要（英文）：The contents of this research are roughly divided into three. It is examination about the measurement method of the heat transfer coefficient of the outer skin, the qualitative comparison of the dwelling units with different insulation levels, and the possibility of the judgment of the influence of surface dew condensation and the draft.

Regarding the first, it is possible to measure the average heat transfer coefficient of the wall by using an ET sensor and using thermal image. For the second, it was suggested that the judgment result of the insulation level may be reversed in the simple measurement where the observation is carried out at only one time. For the last, I established a judgment method that allows us to estimate the frequency and the area of the condensation occurrence to a certain extent.

研究分野：建築熱環境

キーワード：熱画像 断熱 住宅 診断 現場測定

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

住宅の断熱性能を評価するための代表的な指標として、建物全体としては熱損失係数、部位としては熱貫流率が用いられ、省エネ基準・建築物省エネ法等の基準に従って、設計図書よりこれらの断熱性能を評価することが行われてきた。しかしながら、実際に竣工した住宅の中には、施工不良などにより設計時点で想定していた断熱性能が発揮されないことがあり、品質保証の一環として、竣工後の断熱性能を現場で測定する必要性が古くより説かれてきた。また、大量の住宅ストックを抱える社会状況において、設計図書が存在しない中古住宅の断熱性能を測定し、断熱改修計画のための基本データとして、あるいは不動産取引における資産価値の評価のための資料として活用する機運が高まっている。

### 2. 研究の目的

上に示すように、ストック住宅の断熱性能診断に対する社会的ニーズの高まりに応じて、断熱性能に関する種々の現場測定法が試みられ、古くは熱損失係数の推定法について、近年では外壁等の部位の断熱性能を測定する方法について種々検討がなされてきた。しかしながら、未だに広く一般に使われる測定方法が規定され、普及している状況ではない。その一因として、計測点数が多いこと、数値処理が複雑なこと、等が挙げられる。

そこで、本研究では、比較的簡易に測定可能な方法として、熱画像を用い、かつ建物全体ではなく外壁等の特定の部位の断熱性能を測定することに着目して、その定量的評価の可能性やその他の定性的な診断方法の開発を目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究の実施内容は大きく3つに分けられる。外皮の部位熱貫流率の測定法、断熱レベルの異なる住戸の定性的比較、表面結露や隙間風の影響の判定の可否に関する検討である。

最初の部位熱貫流率の測定法に関して、従来からの熱画像法（熱画像によりETセンサー表面温度と対象部位表面温度の差を測定し、熱伝達率センサーで測定した熱伝達率を乗じて熱流を算出し、内外温度差で除す）における不確かさの評価による測定精度の検討結果はサーモカメラによる表面温度差（ETセンサーの表面温度と測定対象部位の表面温度の差）に関する誤差に起因するものが大半であり、高断熱壁体や十分な加熱を行わない場合の部位熱貫流率測定は相対的に十分な精度を発揮できない可能性があるというものであった。このことから、他の研究者らが提案している測定法（開口部に熱抵抗が既知の断熱材等を設置する方法）に熱画像を適用した場合の検討を行う。既往研究では、熱抵抗が既知の2種類の標準板を開口部に設置し各面で表面温度と空気温度の差を測定する。これらの温度差と標準板の既知の熱抵抗（から算出される熱貫流率）の関係から検量線を求め、測定対象壁体の表面温度と空気温度の差から当該部位の熱貫流率を算出するという方法が採用されている。本研究では、この方法に従って熱貫流率を測定した場合と、空気温度の代わりにETセンサーの測定値を用いた場合の比較、さらに熱画像を用いて面的な測定を行った場合の比較を行う。測定は、恒温室を用いた実験室実験と集合住宅の空き住戸を使用した現場実測の2種類で実施する（図1）。



図1 標準板を用いた熱貫流率測定実験

#### 2 つ目の断熱レベ

ルの異なる住戸の定性的比較について、東京都に建つ集合住宅内にある断熱改修レベルの異なる3住戸を使用し、断熱レベルの相違が熱画像によって判別できるかどうかを検討する。

3 つ目の表面結露・隙間風の影響の判定の可否の検討について、隅角部等の表面結露の危険性判定法について検討する。この判定法は、冬期の20日間程度の期間において対象壁面の表面温度を測定し、その結果より当該地域の厳冬期における表面結露リスクを評価することを目指すものである。最初に当該室の明け方外気温と明け方平均室温の回帰式を導き、次に明け方の（評価ポイントの表面温度）－（外気温）と、室内外温度差の回帰式を導く。この2つの回帰式より、気象統計から得られる厳冬期の外気温から当該評価ポイントの表面温度を推定し、室内の標準的な露点温度条件を用いて結露の危険性を判定するものである。この方法の実効性を確認するため断熱改修レベルの異なる集合住宅の空き住戸を利用して、表面温度、室温、外気温、室内側からの熱画像等の測定を実施し、上記手順での判定結果と断熱レベルの整合性の確認を行う。また、隙間風の影響の判定の可否に関する検討の一つとして、玄関ドア周囲の隙間風の有無を熱画像から判定できるかどうかを検討する。実住戸の鋼製玄関ドアにおいて、隙間部をシールした場合とシールしなかった場合の熱画像を撮影し、その画像の視覚的な差異と定量化データにおける比較を行う。

#### 4. 研究成果

本研究で実施した、①外皮の部位熱貫流率の測定法、②断熱レベルの異なる住戸の定性的比較、③表面結露や隙間風の影響の判定の可否に関する検討、のそれぞれについて研究成果を記す。

1つ目の外皮の部位熱貫流率の測定法について、恒温室を使用した実験の結果（図2）、室温として空気温度を用いた場合（図中「熱電対（空気）」）に対して、ETセンサーによる環境温度を用いた場合（図中「熱電対（環境）」）の回帰式は原点を通っており物理的な整合性が高い（ただし推定される熱貫流率は空気温度を用いた場合と大きな差はない）。サーモカメラによる温度差（ETセンサー表面-対象壁面表面）の測定の場合も「熱電対（環境）」とほぼ同じ回帰式が得られた。また、集合住宅における断熱レベルの異なる2住戸でのフィールド実測結果によると（図3）、3つの計測法による熱貫流率測定は、「竹」住戸（当該壁は無断熱RC）では大差ないものの、「松」住戸（ポリスチレンフォーム30mm+RC）では、空気温度を用いた場合で低めの熱貫流率が推定されている。図中「熱流計」は、熱流計による貫流熱と内外表面温度差から壁体部分の熱抵抗を求め、これに規定の両側表面熱伝達抵抗を加えて算出した熱貫流率で、この値と比較すると、空気温度測定の場合よりもETセンサーを用いた場合の方が整合性が高いことが分かる。フィールド実測においても熱電対計測と熱画像計測の差は小さいことから、本方法により1点を対象とした計測ではなく、間柱等を含めた一般部の平均熱貫流率の測定が可能との見通しを得ることができた。

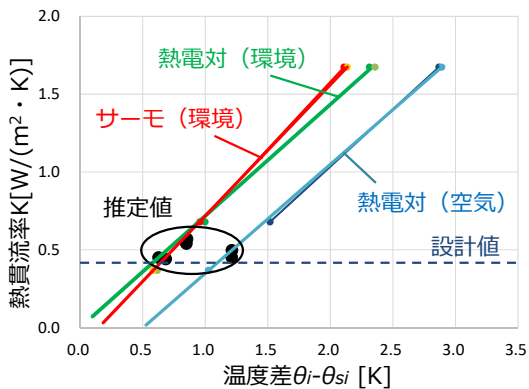


図2 明け方平均外気温と明け方平均室温の関係

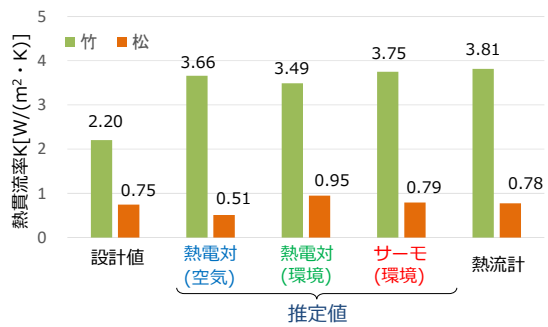


図3 熱貫流率の推定結果比較

（「松」：高断熱・高气密化改修、「竹」：高气密化改修）

2つ目の研究課題の、断熱レベルの異なる住戸の定性的比較について、「梅」（1979年竣工当時仕様、妻側外壁のみ断熱）、「竹」（サッシ・玄関ドアの気密化改修）、「松」（「竹」に加えて妻側外壁フェノールフォームに改修、梁部等断熱補強、その他の外壁も断熱化、窓複層）の3仕様の部屋について12月に室内側から熱画像を計測してその断熱レベルの差が定性的にであっても判別が可能かどうかを検討する。

図4暖房時（9:00）において梅住戸と竹・松住戸では梁部分や、バルコニー側壁面温度において、断熱改修による差がみられるが、竹住戸において、断熱されていない梁部分温度が予想より高く、原因としては上階の室の温度が高く、天井壁面温度が高くなった可能性や、竹住戸のほうが、室を同じ温度に保つときエアコン風量が松住戸より大きくなり、妻側壁面側に温風が流れたこと等が考えられる。

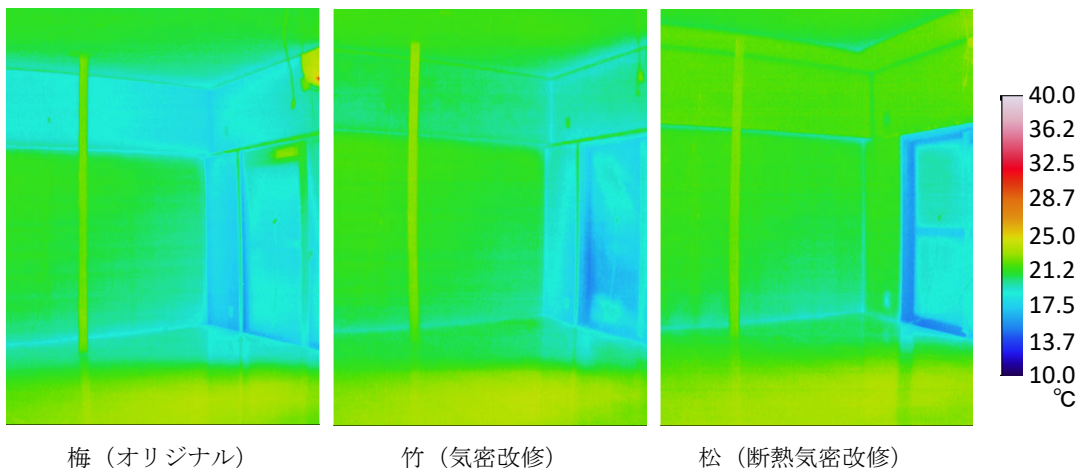


図4 断熱レベルの異なる3住戸の熱画像比較（暖房時、9:00）



非暖房時（24:00、図5）においては、竹住戸の梁温度が松住戸の梁温度より高くなってしまっている。これも上階温度の差の影響の他、竹住戸では梁部分の断熱が無く、熱容量の大きいコンクリートが室に露出しているため、一日のうちある時間帯において、断熱がしてある松住戸との関係が逆転することが起こるものだと考えられる。定性的な断熱レベルの診断が目的の場合においても、境界条件や加熱源の気流の影響、躯体の熱容量の影響等に配慮する必要があることが分かる。

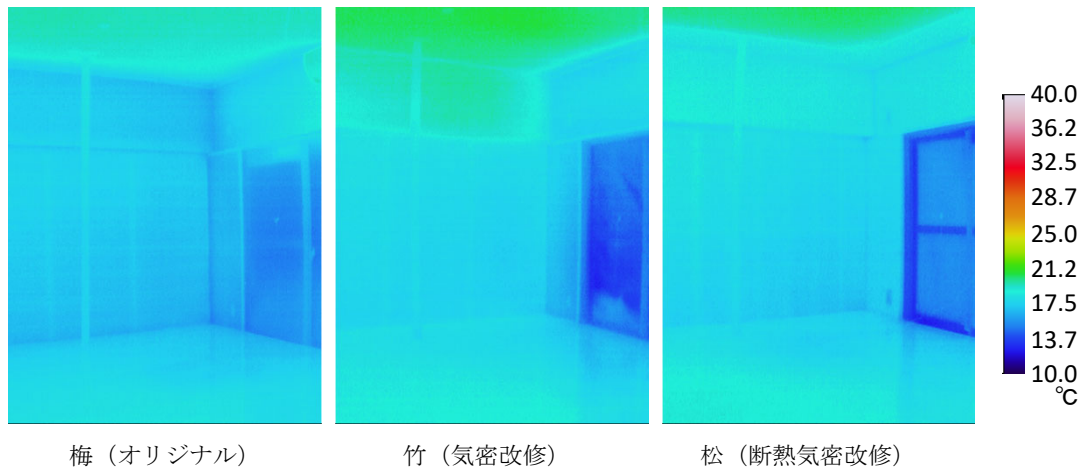


図5 断熱レベルの異なる3住戸の熱画像比較（非暖房時、24:00）

3つ目の表面結露・隙間風の影響の判定の可否の検討について、隅角部等の表面結露の危険性判定法については、まず明け方（4~7時）の平均外気温と明け方の平均室温の関係を見ると（図6）、断熱・気密改修のレベルに対応した分布をしており、ばらつきは見られるものの断熱レベルと整合の取れた回帰線が得られていることが分かる。これとは別に、図7のように、中央部・隅角部等の部位ごとに、明け方の、（室温-外気温）と（壁面温度-外気温）の間の回帰式を作成する。この両者の間には強い線形の関係が見られた。図6, 7より、当該地域の標準的な冬期の気象データより、各日の壁面表面温度を部位別に推定することが可能であり、20日程度の実測から、冬期の結露リスクを定量的に評価できることが分かる。ここでは熱電対による部位別計測値を用いているが、熱画像を適用することによって、最もリスクの高い部位の結露リスクを評価できるものと考えられる。

一方の隙間風の影響の判定については、冬期（12月）の日中に気密性能の異なる2つの玄関ドアについて、外部からテープを貼った場合と貼らない場合とで熱画像を撮影した（図8）。異なる内外温度条件に対応できる判定法として、特定の線（図中A）の温度を対象に、室温:1、外気温:0となるように基準化した温度分布で比較すると（図9）、気密性の低い「梅」住戸において漏気が確認できる。このような評価法を用いることによって、内外温度条件が様々であっても、漏気の有無や断熱性のレベルについて判定できることが分かる。

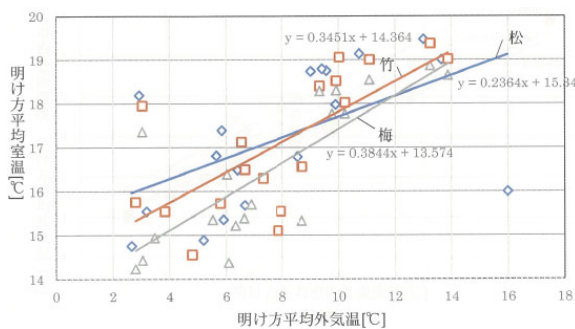


図6 明け方平均外気温と明け方平均室温の関係  
（「松」：高断熱・高气密、「竹」：高气密、「梅」：従来）

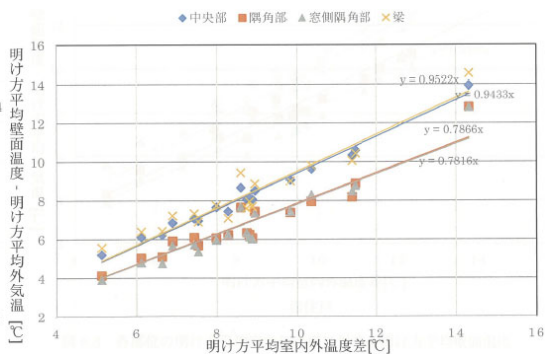


図7 明け方室内外温度差と特定部位温度の関係  
（「梅」住戸）

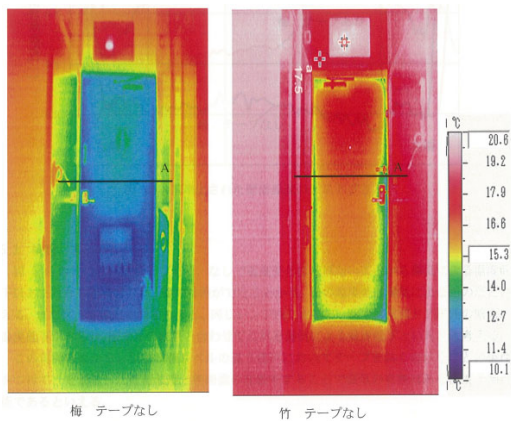


図8 玄関ドアの熱画像

(「竹」：高気密ドアに改修、「梅」：オリジナルフラッシュドア)

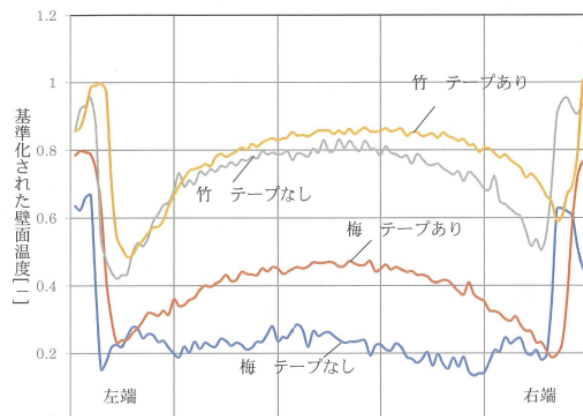


図9 基準化ドア表面温度の比較

(図8のA上の温度分布)

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Fumiaki Takahashi, Tatsuo Nagai, Yosuke Kikuchi, Ryota Asano: Airtight-insulation retrofits for improving indoor environment and saving energy in multiple dwelling houses, 11th Conference on Advanced Building Skins, pp.108-116, 2016.10, Bern (査読なし)

[学会発表] (計 1 件)

- ① 長井達夫: 標準的な方法の理論と実験例, 日本建築学会環境工学委員会熱環境運営委員会 第46回熱シンポジウム, 2016.10, 岡山

## 6. 研究組織

### (1) 研究協力者

研究協力者氏名：高橋 史哲

ローマ字氏名：(Takahashi Fumiaki)

研究協力者氏名：熊倉 綾音

ローマ字氏名：(Kumakura Ayane)

研究協力者氏名：恒吉 正隆

ローマ字氏名：(Tsuneyoshi Masataka)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。