昭和55年省エネルギー基準レベルの在来木造住宅を対象とする実用的断熱改修手法の検証

VERIFICATION OF PRACTICAL RENOVATIONS REGARDING THERMAL PERFORMANCES FOR WOODEN FRAME HOUSES COMPLYING WITH 1980 ENERGY CONSERVATION STANDARD

齋藤宏昭 — *1 桑沢保夫 — *2
石崎竜一 — *3 澤地孝男 — *4
瀬戸裕直 — *5 三浦尚志 — *6

Hiroaki SAITO — *1 Yasuo KUWASAWA — *2
Ryoichi ISHIZAKI — *3 Takao SAWACHI — *4
Hironao SETO — *5 Hisashi MIURA — *6

キーワード:

断熱改修, 木造住宅, 熱損失係数, 実証実験

Keywords:

Renovations regarding thermal performances, Wooden frame house, Specific heat loss coefficient, Experimental verification

This paper focuses on verification of impacts of practical renovations regarding thermal performances, which can be applied conventional wooden frame houses in mild climate regions. The practical renovations in this paper consist of followings; 1) Install insulation materials to the ceiling and the floor, 2) Insert wrapped batt insulations to prevent exfiltration at the connections of the wall and the floor, 3) Exchange single glasses for double glassings on windows. These methods were demonstrated on an actual wood frame house that satisfied the former energy conservation standard. Impacts of the renovations on air tightness and specific heat loss coefficient were clarified quantitatively by nonlinear regressions and field measurements. Furthermore improvement of indoor environments and hygrothermal behavior after the renovation were studied.

1. はじめに

周知のように、京都議定書の批准に伴い住宅における二酸化炭素の排出量の削減が不可欠となっており、現在までに新築物件を主な対象とした様々な断熱技術の開発が行われている。一方で、断熱材の出荷統計から推定した既築戸建住宅の省エネルギー基準別戸数（砂川ら¹⁾によると、昭和55年基準（以下、旧基準とする）に該当する物件は平成14年の時点で全体の27.6%、旧基準を満たさないものが65.2%存在すると報告されている。住宅購入層の人口の推移から、今後新築戸数が頭打ちになることを考慮すると、既存の住宅ストックの熱的性能を高めることが、住宅における省エネルギー政策の観点から重要になると考えられる。細木ら²⁾が行なった福岡市の改修工事業者に対するヒアリングによれば、省エネルギー改修に対する関心は見られるものの、その優先順位は低いとされている。これは、断熱性の欠如が室内環境の悪化と結露等の被害を引き起こす寒冷地とは異なり、温暖地では断熱に対する住み手の意識が寒冷地程高くないことを示している。ゆえに、寒冷地で見られる外壁を剥がして断熱材を充填するといった大規模改修³⁾は、コスト面からも敬遠されることが考えられ、温暖地においては費用対効果の高い手法の開発・検証も重要であると言える。近年の断熱改修事例の調査報告⁴⁾によれば、工事費を100万円以下に抑える手法も見られるが、このような小規模な改修に対し、定量的な検討を加えた例は少ない。

以上の背景を考慮し本報告では、実在の戸建木造住宅において、実用的な断熱改修手法のケーススタディーを行い、改修工事前後の熱損失係数及び気密性能に対する効果を検証する。また、室内及び構造空隙内の温湿度環境や施工上の問題点について考察を加え、断熱改修に関する今後の検討課題を抽出する。

なお、改修手法については、温暖地において広く受け入れられることを念頭に、コスト削減、居住者の負担低減の観点から工期のかかる外壁の工事を避け、以下に示す手法を検討する。

①床、天井、開口部といった、外壁以外の施工が比較的容易な部位の断熱性を重点的に強化する、②外壁及び間仕切壁の上下端部に通気止めを設置し、壁内気流及び漏気による熱損失を防ぐ、③既存のアルミサッシを活用し、ガラス部分のみ交換する。

2. 実測調査概要

2.1 改修対象物件の概要

改修対象物件は神奈川県南部にある築24年の木造在来軸組工法2階建ての住宅である。改修前は、天井・外壁及び床の一部に50mmのグラスウール10Kが施工されている。基礎は布基礎で、土間コンクリートがないため地盤が表れている。家族構成は世帯主夫婦の2名であり、専業主婦が終日在宅している。改修建物の概要を表1に示す。

*1 独立行政法人建築研究所 修士(工学)
(〒305-0802 茨城県つくば市立原1)

*2 独立行政法人建築研究所 上席研究員・博士(工学)

*3 俣岩村アトリエ

*4 国土交通省国土技術政策総合研究所 建築新技術研究官・工博

*5 独立行政法人建築研究所 主任研究員

*6 独立行政法人建築研究所 研究員・博士(工学)

*1 Research Engineer, Dept. of Environmental Engineering, Building Research Institute, M. Eng.

*2 Chief Research Engineer, Dept. of Environmental Engineering, Building Research Institute, Dr. Eng.

*3 Iwamura Atelier Co., Ltd.

*4 Research Coordination for Advanced Building Technologies, National Institute for Land and Infrastructure Management, Dr. Eng.

*5 Senior Research Engineer, Dept. of Environmental Engineering, Building Research Institute

*6 Research Engineer, Dept. of Environmental Engineering, Building Research Institute, Dr. Eng.

2.2 温冷感及び生活パターンに関するヒアリング

居住者に対するヒアリング結果を表2に示す。居住者は1階が特に寒いと申告しており、在室時間が長い台所では開放型の暖房器具（石油ファンヒーター）をほぼ一日中使用している。機械換気に関しては、煮炊きのときに台所で使用する程度であるが、開口部の結露発生はほとんど見られない。

2.3 断熱改修方法

ヒアリング及び建物の事前診断、熱損失係数に基づく改修部位の改善効果を検討した結果、表3に示す項目の改修工事を行なうこととした。外壁に関しては、断熱材（グラスウール 10K50mm）が施工されていたため、1階床、2階天井、開口部を主な改修部位とし、建物全体として平成4年基準の熱損失係数（IV地域）を満たすよう配慮した。断熱材及び通気止めによる改修部位を図1に示す。床に関しては、居住者の在室率が高い台所、和室、居間のみ、床下からグラスウールボードを充填し、天井は粒状グラスウールを2階小屋裏全面に吹き込んだ。開口部は既存のアルミサッシのガラス部分のみ、複層ガラスに交換した。また、在来工法特有の、床下から小屋裏への移流による熱損失を防ぐ観点から、1階間仕切壁及び外壁と土台との隙間にグラス

ウールを裁断した部材を、2階間仕切壁上部の隙間に、グラスウールを気密シートで梱包した専用部材（以下、通気止め^{※1}）を挿入した。ただし、通気止めに関しては、根太と土台の位置関係により設置が困難な箇所があった。特に和室では、根太が量の厚さ（50～60mm）分下がるため、根太が土台と平行に設置されている面では、土台と根太の間に指の入る隙間が無く、通気止めの挿入が困難であったため、居間及び廊下側から施工可能な部分だけ設置した^{※2}。改修

表2 温冷感及び生活パターンに関するヒアリング結果

質問	回答
住宅の中で寒い部屋はありますか	1階居間 朝は全部寒い。
部屋の中でどこが寒い(冷たい)ですか。	1階居間。1階でも2階でも全般的寒い。
日当たりはどうですか	悪い 1階居間、1階和室（特に冬） 良い 2階洋室
その他熱環境で感じていることを記入してください	窓面の結露はほとんど発生しない。 朝シャワーを浴びると、ユニットバスでも寒い。 換気扇は煮炊きのときに使う程度。 朝6:30に起きてDKとユニットバスのヒーターをつけるのが日課。
暖房器具について	石油ファンヒーターを使用。居間は夜8時から夜12時までつけている。台所は居間にいるとき以外はほとんど使用している。

表1 改修対象物件

所在地	神奈川県
築年数	24年（1981年入居）
家族構成	単世帯 2名
工法	木造在来軸組工法
階数	2階建て（一部平屋）
面積	延床面積 118m ² 、建築面積 80m ²
外装仕上	ラスモルタル下地スタッコ吹付け
内装仕上	石膏ボード下地クロス張り
基礎	布基礎（土間コンクリートなし）
開口部	アルミサッシ（単板ガラス）
断熱材	天井：グラスウール 10K 50mm 外壁：グラスウール 10K 50mm 床：無断熱（和室のみ一部グラスウール 10K 50mm）

図1 断熱改修部位

表3 断熱改修方法の概要

改修部位	天井（2階天井）		床（1階床下）		開口部
改修方法	吹き込み工法	小屋裏通気止め	充填断熱工法（床下から充填）	床下通気止め	アタッチメント工法
概要	小屋裏の既存断熱材を残し、その上に新規断熱材を吹き込む。	間仕切壁の上部に圧縮GWを用いて通気止めを設置	床下から根太間に断熱材を充填。根太下にも同様の断熱材を充填。	タッカーによって落下防止ネットを大引き間に設置。	既存サッシのガラスを撤去し、複層ガラスに交換。
仕様	吹き込み用 GW-2 13K t=160mm	通気止め部材（GW 16K t=100mm）	GW32K t=80mm	通気止め部材（GW 10K t=50mm、一部 GW 16K t=100mm）	複層ガラス（FL3+A5+FL3）
対象範囲	小屋裏全体	間仕切壁上部のみ [*]	居間、和室、台所	居間、和室、台所	1階居間、1階和室、2階洋室、2階和室8帖
作業負荷	約5時間／作業員3名、監督1名 ※新築は、約3時間で完了。改修のため養生等、準備に時間がかかっている。		約10時間／作業員5名、監督2名（内1名は、断熱材のカットを担当） ※予定していなかった外壁周りの通気止め作業の発生、落下防止ネットの扱い、根太下の断熱材充填など、試行的に行った内容もあり通常8時間程で終了する工事が延長した。		約5時間／作業員3名、監督1名 ※約3時間で7ヶ所のガラス交換を終了。
工事費用	約16万円		約37万円		約47万円
作業状況

*小屋裏の外壁周りは、断熱材が桁下まで伸びており、かつ室内側の壁に密着しているため、通気止めの必要がないと判断した。

物件には平屋部及び下屋があり、それらの小屋裏と階間との改修が必要になると考えたが、既にグラスウール 10K50mm が設置されているうえ解体を伴わない工事という制約から、平屋部及び下屋の改修は行っていない。

改修工事は、前述した工事内容を数社の施工業者に提示し、入札により業者を定め、2005 年 8 月に実施した。工事費用の内訳を表 3 に併記する。総額は税込みで約 110 万円となったが、試行的に行った内容で延長となった工事もあり、実際には金額が若干増加する可能性があると思われる。

3. 断熱改修前後の性能検証

改修効果を検証するための測定は、改修前が 2005 年 2 月に、改修後は 2005 年 12 月に行った。測定項目は、気密性能、熱損失係数及び室内温湿度性状とした。

3.1 気密性能

気密性能は台所のレンジフード及び浴室換気扇の給排気口をシールした状態で気密測定器（（株）コーナークレイト）を用い、減圧法により測定した。測定器の設置場所は 1 階居間南側の開口部とした。改修前後の圧力差と流量の関係及び相当隙間面積を図 2 に示す。

改修前に $11.8 (\text{cm}^2/\text{m}^2)$ であった相当隙間面積は、改修により約半分の $5.63 (\text{cm}^2/\text{m}^2)$ となった。開口部に関する改修工事は、既存のアルミサッシのガラス部分を交換するだけであり、気密性能に対する影響が大きいと考えられる項目は通気止めの設置のみであった。したがって改修前後の気密性能の差は、主に通気止めによって生じたと推測される。廣田ら⁹⁾は、木造在来軸組工法の床や天井と壁の取合い部分の隙間が大きいことを指摘しているが、通気止めを設置し壁内空隙の気密化を図ることにより、旧基準レベルの住宅でも $5.5 (\text{cm}^2/\text{m}^2)$ 前後の気密性能を達成できる見込みのあることが実証された。

図 2 改修前後の気密性能測定結果

3.2 熱損失係数

熱損失係数は、建物内部に設置した電気ヒーターで加熱を行い、加熱時及び加熱終了後の室内外温度及び発熱量を松尾の濾波法⁹⁾により解析して求めた。測定項目は、東西南北及び水平面の SAT、外気及び床下空間の空気温度、室内のグローブ温度（1 階居間、玄関、2 階和室、2 階洋室）、電気ヒーター及びその他機器類の消費電力であ

る。電気ヒーターは 1 階居間、玄関、2 階和室、2 階洋室に設置した。測定中は室間のドア、障子等を開放し、ファンにより建物内の空気を循環させ各室温度が一様になるようにした。また、窓面からの入射日射に起因する測定誤差を避けるため、窓面積の大きい南側開口部のレースカーテンを閉とした。熱損失係数を同定するための解析プログラムは独自に開発したものをを用いた。測定は、改修前 2005 年 2 月 11 日～13 日、改修後 2005 年 12 月 5 日～7 日に行い、測定インターバルは 1 分とした。

測定期間中の内外温度及び発熱量を図 3 に示す。電気ヒーターは測定開始とともに印加し、約 24 時間一定の加熱量を維持した。図 3 では、ヒーターが停止した測定開始 24 時間以降も若干の発熱が示されているが、これは冷蔵庫、攪拌ファン及びその他家電機器の待機電力によるものである。

熱損失係数の測定結果を図 4 に示す。測定値は、加熱時及び加熱停止後の約 2 日間のデータを用いて熱損失係数を同定した値である。一方、計算値は設計図書より求めたもので、改修前の換気回数を 1.5 回、改修後は 1.0 回として算出した値である。図 4 の結果では、改修前の熱損失係数の測定値と計算値はほぼ同等の値を示しているが、改修後は測定値が計算値を若干下回っている。これは、①構造空隙の気密化によって壁内気流に起因する熱損失が減少したことと、②ヒーター

図 3 熱損失係数測定中の発熱量及び内外温度

図 4 熱損失係数の測定結果（計算値は設計図書より算出）

図5 各室における暖房時の垂直温度分布

停止後の外乱の変動(図3、改修後の水平面SAT)が小さいかったため同定精度が若干低下したことが理由として推測できる。しかし、熱損失係数を求める際の室温推定値と測定値の平均残差^{注3)}は改修前0.15℃、改修後0.17℃であり、同定された値と実際の性能が乖離している可能性は小さく、断熱改修による目標性能である熱損失係数(4.2[W/m²K])はおおよそ達成されたと言える。

3.3 室内温湿度性状

室内温湿度の測定は、図1に示す各室の●部分に温湿度センサー(T&D社製)を設置して行った。

(1) 暖房時の上下温度分布

暖房時の垂直温度分布と高さ方向中央の値により基準化した垂直温度差を図5及び図6に示す。図中の値は、改修前が2005年2月、改修後が2005年12月の約1ヶ月間の測定結果より、高さ方向中央の温度が15℃を越えたときの値を平均して求めた。1階居間及び和室は、改修前に比べ上下温度差が1.0～1.5℃程度緩和されており、暖房時における温熱環境の若干の向上が見られる。台所については、改修後の温度が2℃程度低下しており、垂直温度差については変化が見られなかった。台所のセンサー類は、アコーディオンカーテンで仕切られた洗面所への通路付近に設置されているため、アコーディオンカーテンの下部から侵入した冷氣の影響を受けたものと推測される。

(2) 外気と室内温湿度の関係

図7、図8に改修前後で外気温度が同程度の連続した5日間における、外気と室内温度及び水蒸気圧の関係を示す。改修前の1階居間及び1階和室の温度は、8℃を下回っているのに対し、改修後は若干の上昇が見られる。2階和室も同様の傾向が見られ、断熱性能の強化により居室の温度低下が緩和されたものと考えられる。一方、床下は改修後の温度範囲が改修前に比べ低下しており、床部分の断熱工事によって1階居室からの熱損失が減少したことが読み取れる。水蒸気圧については、改修後の床下の値が低下しているものの、階間は200Pa程度上昇しており、気密性能の向上によって床下、階間といった構造空隙の湿度性状が変化したものと考えられる。

(3) 階間及び床下水蒸気圧の経時変化

図9に図7、図8と同期間の温度及び水蒸気圧の経時変化を示す。

図6 各室における暖房時の垂直温度差

改修前の床下の水蒸気圧は階間よりも高いが、改修後はこの関係が逆転し、床下が外気の値に近づいている。床の断熱施工では、透湿抵抗の大きい部材は使用していないため(グラスウールと透湿性の不織布のみ)、通気止めの設置により床壁取合い部からの水蒸気流入量が減少し、湿度の低下が生じたものと推測される。一方、断熱改修による階間の水蒸気圧の上昇については、改修前に壁内空隙と小屋裏や床下を経由して屋外に排出されていた水蒸気が、通気止めの施工によって滞留し引き起こされたものと考えられる。

3.4 1階床周りの表面温度分布

改修前に居住者から寒いと申告されていた、1階居間及び和室の床周りの表面温度分布を赤外線カメラにより測定した。測定は、ヒーターにより内外温度差を生じさせた状態で、日射の影響がなくなる夜間に行った。測定結果を写真1、写真2に示す。

写真1は居間東側外壁の測定結果である。改修前後で室内外の温度が若干異なるものの、改修前は床壁取合い部の温度が低く、床面から20～40cm程度までは床と同等の温度となっている。一方、改修後の床と壁面温度の差は改修前の結果と比べれば若干小さい。

写真2は和室北側間仕切壁の結果である。断熱改修により表面温度分布は改善されているが、根太の架かっている画面左側下部の温度(矢印部分)が改修後においても床上30cm程度まで低い結果となっている。この部位は、間柱と根太の位置関係により、廊下側からの通気止め施工が十分に出来なかったため、局所的に床下からの冷氣の流入が生じたものと考えられる。和室東側の間仕切り切壁(画面右側)については、居間の床下側に根太が架かっていないため、通気止めが隙間なく挿入されており、廊下側のような温度低下は生じなかった。通気止めの施工は、気密性能の向上に加え、床周りの温度低下を緩和する効果もあるが、根太組を考慮した対策を講じる必要があると言える。

4. まとめ

本報告では、昭和55年基準レベルの断熱性を有する、実在の在来木造住宅に対する実用的な断熱改修工事前後の性能を定量的に示した。また、改修による各部の温湿度環境の変化について考察を行なった。得られた知見を以下に示す。

図7 室温と外気温の関係 (x軸：外気温、y軸：各室の温度)

図8 室内水蒸気圧と外気水蒸気圧の関係 (x軸：外気水蒸気圧、y軸：各室の水蒸気圧)

図9 温度及び水蒸気圧の経時変化

写真1 居間東側外壁表面温度分布 (改修前：室内 18.8℃、外気 6.1℃、改修後：室内 19.4℃、外気 11.2℃)

写真2 和室北側間仕切壁表面温度分布 (改修前：室内 16.6℃、外気 6.1℃、改修後：室内 19.0℃、外気 11.2℃)

【検証結果及び改修効果について】

- 1) 昭和 55 年基準程度の戸建木造住宅でも、床、天井、開口部のみの改修工事によって、IV地域の平成 4 年基準相当（熱損失係数 4.2[W/m²K]）を満たす断熱性能が得られることを検証した。本報告で用いた改修手法は外壁の工事を伴わず、約 3 日間で工事を完了し、改修費用は 110 万円程度であった。
- 2) 既存の在来木造住宅でも、床及び天井と壁の取合い部へ通気止めを施工することによって、建物全体の気密性能の大幅な向上が可能であることを確認した（改修前：11.8、改修後：5.63[cm²/m²]）。また、壁内気流の防止によって、壁面下部の表面温度の低下が緩和され、室内から床下への水蒸気の流入も抑制された。

【本断熱改修手法における課題について】

- 3) 通気止めの施工における問題点
根太と土台の位置関係によっては、通気止めの設置が困難となる箇所が生じ、このような部位の室内表面において、床下空気の侵入によると思われる局所的な温度低下が見られた。通気止めの施工精度の向上には、根太組みを考慮した施工法の検討や通気止め部材の開発が不可欠と言える。
- 4) 断熱改修による湿度性状の変化
通気止めによる気密化に起因すると推測される室内及び階間の水蒸気圧の上昇が確認された。これは改修前に壁内空隙と小屋裏や床下を経由して屋外に排出されていた水蒸気が、通気止めの施工によって滞留し引き起こされたものと考えられる。特に旧基準程度の断熱施工では、階間に接する外壁部分において、防湿層の連続性が保たれていない可能性があり、局所的な内部結露の発生が懸念される。開放型暖房機器の使用を控えることや計画換気を導入する等、適切な防露対策を講じることが不可欠と思われる。

注

注 1) グラスウール断熱材を梱包したものであり（写真 A1 左側参照）、写真 A1 右のように土台と床の隙間に挿入し、躯体の気密性能を向上させる。写真 A1 の左側は圧縮梱包した通気止めであり、圧縮された状態で設置後、梱包材をカッター等により傷をつけて復元させ、躯体の隙間を塞ぐ。

写真 A1 通気止め外観（左）及び施工状況（右）

注 2) 写真 A2 に示すように、根太掛けにより通気止めを挿入する隙間が小さく、作業が困難であった。

写真 A2 和室床下間仕切壁の取合い部

注 3) 松尾の濾波法⁹⁾では、加熱量と外乱及び室内温度の測定値から、建物全体の応答係数を求め、熱損失係数を同定する。平均残差は、得られた応答係数を用いて推定した時系列の室温予測値と測定値を(A1)式によって求めた値である。

$$\delta = \sqrt{\sum_{n=1}^N (\theta_{R,n} - \theta'_{R,n})^2} / N \quad \dots \dots \dots (A1)$$

ここに δ : 平均残差 (°C)、 $\theta_{R,n}$: 室温測定値 (°C)、 $\theta'_{R,n}$: 室温予測値 (°C)、 N : サンプル数

謝辞

本研究は、国土技術政策総合研究所が実施している「既存住宅の省エネルギー性能向上支援技術に関する研究」の研究成果の一部である。また、実測においては測定物件を提供いただいた居住者の方及び日本工業大学卒論生（当時）の渡部雅氏のご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 砂川雅彦、小坂信二：断熱材出荷統計を利用した既築住宅の省エネルギー基準別戸数の推計手法、日本建築学会大会学術講演梗概集 D2、pp. 211～212、2005
- 2) 細木翼、萩原智子、高口洋人、渡辺俊行：住宅の省エネルギー改修に関する研究 その 1 福岡市における住宅の省エネルギー改修の現状把握、日本建築学会大会学術講演梗概集 D2、pp. 319～320、2005
- 3) 例えば、鎌田紀彦、鈴木大陸、小笠原一隆、北谷幸恵、本間義規：北海道の戸建住宅における断熱改修の応用的研究、日本建築学会計画系論文集、第 516 号、pp. 23～30、1999. 2
- 4) 社団法人日本住宅設備システム協会：省エネリフォーム住宅実例集、2004
- 5) 廣田誠一、鈴木大陸、布井洋二、松岡大介、本間義規、大沢元毅：住宅における各種気密ジョイント部の気密性能に関する研究（続報）—その 2 部位、部材の隙間特性の把握と既存測定データとの対比、日本建築学会大会学術講演梗概集 D2、pp. 11～12、2001
- 6) 松尾陽、斎藤平蔵：現場測定にもとづく住宅熱特性の推定、日本建築学会建築環境工学論文集、第 3 号、pp. 13～18、1981

[2006年 4 月20日原稿受理 2006年 7 月27日採用決定]