木小舞土壁を有する梁通し型木造住宅の温熱環境性能と気密性能に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE THERMAL ENVIRONMENT PERFORMANCE AND AIR TIGHT PERFORMANCE OF TIMBER HOUSE WITH MUD WALL AND CONTINUOUS BEAM

永峯 章 ——— * 1 松野浩一 ——— * 2
山辺豊彦 ——— * 3 高橋祐作 ——— * 4

Akira NAGAMINE ——— * 1 Koichi MATSUNO ——— * 2
Toyohiko YAMABE ——— * 3 Yusaku TAKAHASHI ——— * 4

キーワード：
木小舞土壁, 伝統構法, 梁通し型木造住宅, 地球温暖化対策, 温熱環境性能, 気密性能, 静的載荷実験, 自由振動実験, 層間変形角

Keywords:
Mud wall with kigomai, Traditional building construction, Timber house with continuous beam, Measures for controlling global warming, Thermal environment performance, Air tight performance, Statically cyclic loading test, Free vibration test, Story deformation angle

Recently, our action against global environmental concerns including global warming is high priority issue. Then an energy saving, effective use of the resource, the reduction in the construction waste and the reuse of the material are important problems in the architectural production field. The authors are researching the timber house rebuilding system that uses the used structural members again. The wall of an earthquake-resisting element adopts the wood siding wall and the mud wall that is composed by Kikomai, Nuki and mud. The case study house was constructed to clarify the effectiveness of this system. In this paper, the indoor thermal environment performance and the air tight performance obtained from the environmental measurement result are described.

1. はじめに

地球温暖化対策が急務となっている今日にあって、資源の有効活用、廃棄物の削減と再利用など様々な分野で持続可能な社会の実現に向けた対策が進められている。建築分野にあっては大量の資源を投入しながら社会の発展に寄与してきたが、その生産形態の見直しが必要であると考えられる。木質戸建て住宅にあっては戦後の極端な住宅不足を補う為に住宅を含めた建築物が大量に建てられ多くのストックが蓄積されてきたが、エネルギーを豊富に利用できることで昔から続いてきた自然と共生する住まい方や木や土など自然素材を多く用いる伝統構法による木造住宅が減少してきた。その一方、電気エネルギーを多用する空調設備に依存する住宅が増加している。

このような社会背景の中、筆者達は建築生産の過程でCO₂の排出を抑える自然素材である木材と土を多用する日本の伝統構法を適用した木造住宅の構造性能、室内環境性能、生産性能に関する一連の研究開発を実施し、資源循環利用を促進する手法の提案とその環境改善効果に関する評価法の構築を進めている。^{1) 2) 3)}

この一連の研究プロジェクトにおいて、筆者達は木小舞土壁を耐震要素とした梁通し型木造実験住宅を東洋大学川越キャンパス内に設計施工し、新築施工実験、竣工後の静的引張り載荷実験、自由振動実験、室内温熱環境性能評価実験、気密性能評価実験、解体施工実験、再築施工実験を実施してきた。

本技術報告では木造実験住宅の概要を紹介し、実験住宅竣工後に実施した経年的な室内温熱環境性能測定、静的引張り載荷実験および自由振動実験と連動して実施した気密性能測定で得られた測定データおよび新たな知見を報告する。

なお、本研究では使用木材は角材、板材ともに製材品のみを使用

した伝統構法による住宅システムであることから木造住宅と呼んでいる。

2. 研究目的

建築生産の過程でCO₂の排出を抑えること、建設材料の循環利用促進、建設廃材のエネルギー化を考慮して木材と土を多用する日本の伝統構法に着目した。研究対象の伝統構法による木造住宅の室内環境性能、気密性能を明らかにした研究、技術資料は極めて少ないのが現状である。竣工後の木造住宅のライフサイクルにあって使用エネルギーを積算するためにはその室内温熱性能、気密性能を把握する必要がある。特に地震国である日本にあっては、木造住宅が新築され解体されるまでの期間に幾度となく地震を経験する。この地震に起因して繰り返し生じる層間変形による気密性能劣化は考慮しなければならない重要な評価項目と考えられる。

そこで、研究対象の伝統構法による木造住宅に現在の高性能な断熱・気密性能を持った住宅資材(透湿防水シート、A-4等級アルミサッシ)、屋根面、1階床面に自然素材による断熱材(フォレストボード40mm)を採用した実験住宅を設計施工し、伝統構法の特徴的な木材の多使用、木表し、土壁による真壁造りによる木造住宅の室内温熱環境性能、気密性能の長期特性を定量的に示すことを本研究の目的とする。特に対象とした実験住宅の構造性能、振動性能を評価するために実施した静的繰り返し載荷実験、自由振動実験の前後に室内気密性能測定を合わせて行い、繰り返し与えた層間変形角と気密性能劣化の関係性を明らかにする。

3. 梁通し型木造実験住宅の概要³⁾

*1 東洋大学工学部建築学科 講師
(〒350-8585 川越市鯨井2100)

*2 東洋大学工学部建築学科 教授・博士(工学)

*3 山辺構造設計事務所

*4 東洋大学大学院工学研究科環境・デザイン専攻 大学院生

*1 Instructor, Department of Architecture, Faculty of Engineering, Toyo Univ.

*2 Prof., Department of Architecture, Faculty of Engineering, Toyo Univ., Dr. Eng.

*3 Yamabe Structural Design Office

*4 Graduate Student, Graduate School of Engineering, Toyo Univ.

梁通し型木造実験住宅の建築概要を表1に示す。使用木材種は埼玉県産すぎの西川材を用いた。各階平面図、東側、南側立面図、梁間方向断面図を図1～3に、竣工時の状況、新築施工時の木造架構全景を写真1～4にそれぞれ示す。図1、3には室内温熱性能測定で用いた各種センサー位置を併記した。木造構法は木小舞、貫を内蔵した土塗り壁を耐震要素とし、架構は梁通し（梁勝ち）とし、桁、梁は渡りあごで組み、柱は通し柱を用いず管柱のみで構築する伝統構法である。また、接合金物は布基礎に土台を固定するためのアンカーボルト以外は用いず、仕口は長ほぞ込栓、継ぎ手は追掛け大栓継ぎを採用した。在来軸組構法に比べて木材の乾燥収縮に伴う部材の寸法変化や仕口部の回転を許容しやすい構法と考えられる。

表1 梁通し型木造実験住宅の建築概要

建物名称	東洋大学地域産業共生研究センター 梁通し型木造実験住宅
所在地	埼玉県川越市鯨井 2100
用途地域	都市計画区域、市街化調整区域、防火指定なし
建築面積 (㎡)	1階：46.27、2階：28.09 延べ床面積：74.36
建築高さ (mm)	1階：3,327、2階：(軒) 2,575
階数	2階建て
住宅構法	木小舞土壁を有する梁通し型伝統構法（渡りあご）
基礎	鉄筋コンクリート布基礎 立ち上がり巾 150mm 基礎換気口：木製開閉型無双窓 内部よりステンレスネット張り
主な外部仕上げ	屋根：三州陶器瓦和型 壁：1階 木小舞荒木田土塗り +透湿防水シート+通気層8分 +杉5分板南京下見張り 2階 1階と同様 一部ラスモルタル下地漆喰仕上げ
主な内部仕上げ	壁：木小舞荒木田土塗り+漆喰塗り 床：杉5分板二重張り
開口部建具	住宅用アルミサッシ、玄関引き違い戸：木製建具
造作	サッシ枠、ドア枠：杉1寸3分厚
断熱材	屋根、1階床下：フォレストボード 40mm
竣工年月	2005年3月

図1 各階平面図

図2 立面図

図3 梁間方向断面図

写真1 建物全景・竣工時

写真2 2階小屋・竣工時

写真3 桁・梁仕口（渡りあご）

写真4 新築時木造架構全景

4. 実験概要

4. 1 実験内容、測定フロー

実験住宅竣工6ヶ月後から2年間、室内温熱環境性能、気密性能を経年的に測定した。その間、住宅として使用される期間中に遭遇すると考えられる地震規模を想定した静的引張り繰り返し载荷実験、自由振動実験を3回繰り返して実施し、実験住宅に強制的に水平変位、自由振動を与えた。そして、建物の水平変位による外壁回りの気密性能への影響を評価するために気密性能、換気回数を連動して測定した。実験住宅に与えた最大水平変位は1階層間変形角 1/15radである。一連の実験、測定内容、実施期間を表2に示す。

構造実験では2階床レベル、軒レベルに合計8本のワイヤーロープを取り付け、鉄骨反力フレームに設置した引張り装置を介して载荷を行った。载荷方法、载荷状況を図4に、構造実験と連動して実施した気密・換気測定実験フローを図5に、1階の層せん断力と層間変形角関係を図6にそれぞれ示す。また、木材含水率の竣工後の変動と木材の乾燥に伴う木造架構、気密性能に及ぼす影響を観察するため含水率が高い状態で実験住宅は施工した。含水率の変化を表3に示す。木部材加工時の含水率は柱、梁、桁部材で25～40%であったが、竣工後3年では気乾状態である16%程度まで乾燥している。木材の含水率測定は何れも電気式含水率計(高周波式)で測定した。

表2 実験・測定内容と実施期間

実験・測定項目	実験期間	備考 (単位: rad)
新築施工実験	2004. 11～2005. 03	
温熱環境、気密	2005. 09～2007. 08	長期経年変化
構造実験、気密・換気		強制変形負荷、短期変動
①引張り载荷	第1回 2006. 7～8	最大層間変形角 1/120
②自由振動	第2回 2006. 11	最大層間変形角 1/60
③気密・換気回数測定	第3回 2007. 07	最大層間変形角 1/15
解体施工実験	2007. 09	
再築施工実験	2008. 01～02

図4 荷重方法と荷重状況

図5 実験、測定フロー

図6 1階の層せん断力と層間変形角の関係

表3 木部材含水率測定結果

測定年次(表2参照)	柱、梁、桁部材の含水率(%)
新築施工実験時(木部材加工時) (木部材施工時)	概ね30(25~40強) 概ね20
竣工後1年(第1回構造実験時)	概ね20
2年(第3回構造実験時)	概ね15
3年(再築施工時)	概ね16

4.2 測定方法

温熱環境測定は床下、室内上下、壁断面、屋根表面などの測定ポイントの空気温度、表面温度を温度センサーにより、木造実験住宅内外の温度、湿度と共に30分インターバルで計測してデータロガーで取り込み、パーソナルコンピュータで分析した。屋外気象測定は、外気温度、外気湿度、全天日射量、風向、風速、雨量の屋外気象装置を用いて計測した。計測位置は図1、3に示した。木造実験住宅内吹き抜け部上下温度測定状況を写真5に示す。

気密測定⁴⁾は、木造実験住宅の開開口部にビニールシートを張り、住宅気密測定機器により減圧法を用いて総相当隙間面積を計測した。気密性能の経年変化を週1回と詳細な気密性能を3ヶ月インターバルで計測した。さらに、木造実験住宅に与えられた層間変形と気密性能の関係を明らかにするため静的繰り返し荷重実験及び自由振動実験(以後、静的荷重振動実験と記す)と連動して気密性能測定を行った。

換気測定は、木造実験住宅内に二酸化炭素を均一に散布し、住宅環境測定器により二酸化炭素減衰法によって換気回数を測定した。気密測定状況を写真6に示す。

写真5 吹き抜け部上下温度測定

写真6 気密測定状況

5. 測定結果

5.1 室内温熱環境

木造実験住宅における温熱環境の経年変動を図7に示す。ここでは1階の年間椅子座面温度差と相当隙間面積の関係によって示した。ISO7730では室内上下分布の限界に関して、椅子に座った状態での踝(床下0.1m)と頭(床上1.1m)との温度差を3℃以内に納めることを推奨している。木造実験住宅では冬期に限り、3~4℃とその範囲を多少超えている期間があるが、相当隙間面積の増大が椅子座面の温度差に影響を与えていない。その他の時期では温度差1℃前後で推移している。

図7 1階の年間椅子座面温度差と相当隙間面積の関係

5.2 夏期・冬期の温熱環境

木造実験住宅では他構法による木質住宅と同様に夏期、冬期における省エネルギー型の冷暖房機器の使用は必要である。夏期では冷房活動モードを、冬期では暖房活動モードを使用した時の室内温熱環境を測定した。

5. 2. 1 冬期温熱環境

2005 年 12 月から 2006 年 1 月の時期に①暖房活動型モード、②暖房 off モード、③暖房就寝型モード、④暖房モード(20℃)の 4 パターン⁵⁾を生活習慣の分類として、各部の温度変動を測定した。各暖房の詳細を表 4 に示す。外気温と室内温度変動の関係を図 8 に示す。

表 4 暖房スケジュール(8/13~9/27)

実験パターン(暖房)	12/20~12/27	12/28~1/7	1/8~1/20	1/21~1/31
①活動型(7:00~10:00) (12:00~23:00)				
②1日中OFF				
③就寝型(6:00~9:00) (17:00~22:00)				
④1日中ON(出入り禁止期間)

図 8 外気温と室内温度変動の関係

2005 年 12 月の暖房を暖房活動モードとし、計測した温熱環境を図 9、10 に示す。暖房活動モードは、室内上下温度が暖房運転と共に上昇し、約 1 時間で定常状態に達し、運転を停止した後、緩やかに下降する。暖房時は日中、夜間とも室内上下温度に大きな変動が見られないが、図 10 のグローブ温度は 8℃以下にならない。その原因は土壁の熱容量の影響と考えられる。

図 9 2005 年 12 月暖房活動モード(20℃設定)

図 10 2005 年 12 月暖房活動モード(20℃設定)

冬期の暖房活動モードの各部位の温度を図 11~13 に示す。屋根断面では断熱材で、壁断面においては空気層、土壁、木小舞を経て断熱されていることが確認できる。室内上下温度差は、日中の 14 時で 5.7℃、朝方で 6.2℃と時刻差は少ない。椅座位での差は 14 時で 3℃、5 時で 3.1℃となっており、温度差の限界 3℃を越えている時間帯が確認された。これは、窓面にカーテンなどを使用しなかつ

た為、冷下降気流の影響を受けたものと考えられる。

図 11 暖房時屋根温度分布

図 12 暖房時壁温度分布

図 13 暖房時室内上下温度分布(20℃設定)

5. 2. 2 夏期温熱環境

2006 年 8 月から 9 月の期間に①冷房 24 時間モード、②冷房活動型モード、③冷房就寝型モード、④通風モード、⑤自然モードの 5 パターンを生活習慣の分類として、各部の温度変動を測定した。各冷房の詳細を表 5 に示す。外気温と室内温度変動の関係を図 14 に示す。

表 5 冷房スケジュール(12/20~1/31)

実験パターン(冷房・通風)	8/13~8/18	8/19	8/20	8/21~8/27	8/28~9/3	9/18~9/20	9/21~9/27
①冷房モード(24時間)							
②冷房活動モード(12:00~23:00)							
③冷房就寝(6:00~9:00) (17:00~22:00)							
④通風モード(網戸)(1F:9:00~18:00)(2F:1日中)							
⑤自然モード

図 14 外気温と室内温度変動の関係

夏期における冷房活動モードの温熱環境を図 15、16 に示す。室内各ポイントで日射量の増加と共に、室内温度も上昇している。温度は 25~28℃の間で推移し、冷房を止めた 22 時以降は、朝方まで一定温度で推移する。グローブ温度は、室内空気温度より 0.3~0.4℃程低い傾向が見られる。

図 15 2006 年 8 月冷房活動モード(28℃設定)

図 16 2006 年 12 月暖房活動モード(28℃設定)

夏期の冷房活動モードの各部位の温度分布を図 17～19 に示す。日中の 14 時の屋根断面の温度分布は、瓦表面で 68.8℃、室内側となる野地板裏面では 34.2℃と 34.6℃低下する。室内上下温度差は 14 時では 6.1℃の温度差が発生するが、朝方の 5 時では 0.2℃と温度差は非常に少ない。ISO7730 の 10℃以内という基準を満たしている。

図 17 屋根温度分布

図 18 壁温度分布

図 19 室内上下温度分布(28℃設定)

5. 3 気密測定と換気測定

温熱環境に大きな影響を与える相当隙間面積の経年変動を図 20 に示す。木造実験住宅が竣工した直後の 2005 年 4 月に相当隙間面積が最も低い。要因は竣工直後で木材含水率が 20%程度で、乾燥収縮⁶⁾、⁷⁾ や、土壁のクラックなどが発生していないことなどが挙げられる。相当隙間面積が経年で上昇傾向なのは木材と土壁の乾燥と静的载荷、自由振動実験で土壁にクラックが発生することによる隙間面積の増大が考えられる。しかし 2006 年 2 月頃、外気絶対湿度が低くなる時期に、相当隙間面積が最大値を示している。

図 20 年間の相当隙間面積の変動

年間の外気温と外気絶対湿度変動を図 21 に示す。木材多用、木

表し、土壁を採用した木造実験住宅では、外気絶対湿度と相当隙間面積は深く関係し外気絶対湿度が低い時は木材、土壁が乾燥収縮して相当隙間面積は増加し、外気絶対湿度が高い時は相当隙間面積が減少する傾向が見られる。

図 21 年間の外気温と外気絶対湿度変動

1 階絶対湿度と相当隙間面積の関係を図 22 に示す。1 階絶対湿度が低くなると相当隙間面積が増大する傾向にある。

図 22 1階絶対湿度(週平均値)と相当隙間面積の関係

相当隙間面積と換気回数の関係を図 23 に示す。5 月 2 週と 6 月 2 週の換気回数が多いが、5 月 2 週の測定時の平均風速が 1.5m/s、6 月 2 週の平均風速が 0.8m/s といずれも他の測定時の 0.3 m/s と比べ、大きいことが影響している。相当隙間面積が換気回数によらず影響は明らかである⁸⁾。

図 23 相当隙間面積と換気回数の相関

換気回数と風速・室内外温度差の相関を図 24、25 に示す。換気回数と風速では 0.96 と高い相関関係が見られるが、換気回数と室内外温度差では 0.43 と相関関係は見られない。室内外温度差が少ない状態で測定が実施されたためと想定できる。

図 24 換気回数と風速の相関

図 25 換気回数と温度差の相関

静的載荷振動実験で与えた層間変形角と増加した相当隙間面積の関係を表6に示す。層間変形角が相当隙間面積に影響をもたらすことが明らかになった。8月は隙間が減少していく季節にもかかわらず、8月10～12日の静的載荷振動実験後には相当隙間面積が増大している。8月10日の相当隙間面積が $0.58\text{ cm}^2/\text{m}^2$ と大きいのは、最初の静的載荷振動実験ということが起因したものと考えられる。12月2日、4日の実験においては、相当隙間面積が合計 $0.69\text{ cm}^2/\text{m}^2$ 増大した。静的載荷振動実験が、冬期の隙間が増大する時期に行われたことと、層間変形角が $1/600$ 、 $1/300$ 、 $1/120$ 、 $1/90$ 、 $1/60\text{ rad}$ と大きくなったことで、8月の静的載荷振動実験時よりも相当隙間面積の増大が顕著になったと考えられる。2月24日の層間変形角 $1/60\text{ rad}$ の時は $0.79\text{ cm}^2/\text{m}^2$ 増大した。

表6 層間変形角と相当隙間面積の関係

日付 (2006年)	層間変形角(rad)	階	相当隙間面積
8月10日	1/600	1F 2F	+0.586
8月11日	1/300	1F 2F	+0.034
8月12日	1/120	1F 2F	+0.082
12月2日	1/600	1F 2F	+0.314
12月2日	1/300	1F 2F	
12月2日	1/120	1F 2F	+0.375
12月4日	1/90	1F 2F	
12月4日	1/60	1F 2F	+0.792
2月24日	1/60	1F 2F	

静的載荷振動実験後の相当隙間面積変動を図26に示し、開口部以外の相当隙間面積変動を図27に示す。

静的載荷振動実験後に相当隙間面積が増大し、層間変形角が大きいほど増大する傾向があり、隙間が開口部以外で増減していることが確認された。

図26 静的載荷振動後の相当隙間面積変動

図27 開口部廻りの相当隙間面積変動

伝統構法による梁通し型木造実験住宅では、竣工時の気密性能は $6.64\text{ cm}^2/\text{m}^2$ (図27)と次世代省エネルギー基準の1,2地域(寒冷地)を除く「その他の地域では $5\text{ cm}^2/\text{m}^2$ 以下」に近い結果であった。

6. まとめ

木小舞土壁を有する梁通し型木造住宅の室内温熱環境性能、気密性能の長期特性と地震を想定した静的繰り返し載荷実験、自由振動実験と連動させた気密劣化特性と換気特性について明らかになったことを以下に記す。

- ①温熱環境について冬期は、暖房活動モードの夜間では椅座位の状態でも足(床 0.1 m)と頭(床 1.1 m)との温度差がISO7730で定められている 3°C を 0.1 度越えることがあるが、概ね温熱環境は基準を満たしている。夏期の温熱環境に関しては、特に日中の瓦表面の温度が 68.8°C と高い温度を示すが、天井表面温度は 34.2°C と屋根断熱の効果がみられ、屋根通気と断熱材の効果がみられ室内温熱環境に良好な影響を与えている。また、湿度環境については、伝統構法による内断熱工法としての土壁の調湿作用により、上・下動の少ない湿度を維持し、湿気溜まりのない、結露の問題がない良好な室内湿度環境を示している。
- ②木材と土壁を利用した梁通し型木造住宅の場合、外気絶対湿度が上昇すれば相当隙間面積は下降し、外気絶対湿度が下降すれば相当隙間面積が上昇することが長期に亘る測定で明らかとなった。
- ③静的載荷振動実験により隙間面積は増加し、層間変形角が大きいほど隙間面積が増加する傾向が見られ、層間変形角 $1/60\text{ rad}$ を加えると相当隙間面積が $0.79\text{ cm}^2/\text{m}^2$ と増加した。
- ④気密性能特性を検出し建物の経年変化に伴う劣化特性を確認できた。本実験の研究の範囲においては層間変形角 $1/60\text{ rad}$ 程度までは水平変形による気密性能の劣化より、屋外絶対湿度の影響の方が大きくなることが確認できた。

参考文献

- 1) 松野浩一：産・官・学・地域一体となった環境問題への取り組み、住宅建築、No362、pp.126-127、2005
- 2) 茂呂、松野、近藤、藤田、村野：地域産材による梁通し型木造住宅再築システムの環境改善効果に関する研究—埼玉県産すき材を使用した梁通し型木造実験住宅の木材投入量に関する調査研究、第22回日本建築学会建築生産シンポジウム論文集、pp71-76、2006
- 3) 松野、茂呂、高橋、藤田、村野：地域産材、既使用材活用による梁通し型木造住宅再築システムの架構計画、生産計画に関する研究、第23回日本建築学会建築生産シンポジウム論文集、pp.177-182、2007
- 4) 吉野 博：住宅の気密性能とその規準に関する動向調査、日本建築学会大会学術講演梗概集、D561-562、1990.10
- 5) 森 教子、森山 正和、漆原 慎：住まい方と節約行為を考慮した住宅冷暖房スケジュールの作成方法に関する研究、日本建築学会環境系論文集、No590、pp.43-48、2005.4
- 6) 朴天吉、梅干野 晃、尹聖院：屋外実物大実験による「息をする建築部材」の年間にわたるパッシブ換気機能の検討「息をする建築部材」の自然換気・断熱・透湿性能に関する研究 その3、日本建築学会環境系論文集、No.600、pp.13-21、2006.5
- 7) 佐藤 真奈美 松本 衛：木材の年間を通じての変形形状—熱・湿気挙動と膨張/収縮特性—日本建築学会環境系論文集、No.587、pp.15-22、2005.1
- 8) 野村俊宏、澤地孝男、瀬戸祐直：住宅の換気性能による室内温熱環境の差異その2 シリンドハウスにおける風力換気の影響を考慮した暖房期の室内温熱環境に関する実験、日本建築学会環境系論文集 No.584、pp25-31、2004.10
- 9) 吉野 博、長谷川 房雄、他：仙台市の枠組みの壁工法による戸建住宅における温熱・空気環境及びエネルギー消費量の実態調査、日本建築学会計画系論文報告集、1987

謝辞

本研究は文部科学省私立大学学術研究高度化推進事業産学連携「東洋大学地域産業共生研究センター」の一連の研究として実施された。関係諸氏ならびに木造実験住宅の設計、施工に協力を頂いた丹呉明恭氏に感謝の意を表します。

[2008年6月20日原稿受理 2008年8月7日採用決定]