

# 温暖地における土壁住宅の外気側充填断熱工法の提案と断熱防露性能の検証

## PROPOSAL FOR INSULATOR INFILLED COMPOSITE MUD WALL HOUSES IN MILD CLIMATE REGION AND VERIFICATION REGARDING THERMAL AND MOISTURE PROPERTY

水沼 信\*<sup>1</sup>, 澤地 孝男\*<sup>2</sup>, 鈴木 大隆\*<sup>3</sup>, 瀬戸 裕直\*<sup>4</sup>  
齋藤 宏昭\*<sup>5</sup>, 中村 安弘\*<sup>6</sup>, 中園 真人\*<sup>6</sup>

*Makoto MIZUNUMA, Takao SAWACHI, Hirotaka SUZUKI, Hironao SETO,  
Hiroaki SAITO, Yasuhiro NAKAMURA and Mahito NAKAZONO*

Mud Wall is external wall filling dry mud between structural materials. Mud Wall has been employed as one of the major building components of traditional wood frame houses in Japan. The Mud Wall has proper performances in terms of heat and moisture capacity and fireproof, whereas thermal insulating performance is inferior to general thermal insulation materials such as glass wool, XPS and so on. In this paper, construction method filling an insulation material outside the mud wall layer is proposed for the mud wall houses in mild climate region. The hygrothermal performance of this method was studied by laboratory experiments and numerical simulations in terms of internal condensation issue. Additionally, impacts of the installation of insulation materials on energy conservation and indoor environments were discussed by heat load simulations. The results are as follows; 1) When construction method filling an insulation material in the cavity is adopted, the concealed condensation dose not occur. 2) The annual heating and cooling load of the mud wall house, of which wall is insulated is considerably lower than the existing mud wall house, but improvement of envelope airtightness is necessary to comply with the Japanese next generation energy saving standard.

**Keywords:** *Mud Wall House, Thermal Insulating Performance, Internal Condensation, Airtightness Performance, Energy Saving Performance*

土壁住宅, 断熱性能, 内部結露, 気密性能, 省エネルギー性能

### 1. 序論

住宅金融公庫融資利用新築一戸建て注文住宅を対象にした1990年実施の統計調査によれば, 東日本において土壁造住宅はほとんど新築されていないが, 西日本においては土壁住宅が新築住宅の10%以上を占める県が16県, 30%を超える県が2県あった<sup>1)</sup>. ところが以後10年の間に住宅の建築構法が大きく様変わりしたこともあり, 1999年の同調査によれば, 5%を超える県が11県, 10%を超える県は1県のみであった<sup>2)</sup>. 一方, 1999年に全国工務店を対象に実施した木造軸組住宅全般に関するアンケート調査の結果においては, 土壁構法を採用していると回答した工務店が全体の50%を超える県が西日本に11県あった<sup>3)</sup>. このことは新築住宅全体に占める土壁住宅の割合は漸減しているものの, 地域工務店が施工する住宅においては依然として土壁住宅に対して根強い支持があることの表れといえる。

さて, 土壁は我が国の住宅に伝統的に用いられてきた工法であり, その大きな熱容量および湿気容量により室内熱湿気環境の安定化に寄与する点, 高い耐火性能等が評価されてきた. 近年ではさらに製造から廃棄に至る素材の地域循環性に優れている点から地球環境に与える負荷が小さいとして注目されている. その一方で土壁は断熱性能に優れているという誤解が一般にある。

土壁住宅の温熱環境を実測した既往研究報告として例えば木村<sup>4)</sup>, 浦野<sup>5)</sup>, 長谷川<sup>6)</sup>の報告があり, 土壁の熱容量と吸放湿性能に起因する夏期室内熱湿気性状の安定効果が報告されている. 一方, 冬期においては室内温度の低さが問題点として指摘されている. さらに, 気密性能の低さに伴う漏気が原因と考えられる暖房停止後の急激な温度低下が問題点として指摘されている。

平成11年省エネルギー基準においては, 我が国特有の自然・気候特性により育まれた伝統的な木造住宅構法の中で, 暖冷房負荷低減や住環境の快適性向上に寄与するものを現代の技術によって再生し, 住宅技術の選択肢に加えることができる枠組みを設定している. すなわち, 土壁の欠点である断熱性能を克服できれば, この基準の中で評価できる可能性があるということである。

筆者らは温暖地における土壁住宅現況調査を行い, その結果を踏まえ, 温暖地における気密層を伴わない通気のある断熱外壁の適用可能性を検討した<sup>7)-14)</sup>. 本論では, 伝統的な土壁の利点を活かしつつ現在の技術を付加させた外気側充填断熱工法を提示し, その有用性を検証することを目的としている. 具体的には, 山口県内における土壁住宅の実測調査から, その温熱環境の問題点を明らかにし, 壁体内部の空隙である「ちり」に断熱材を充填する工法が温熱環境の改善に有用であるとの仮説を立てた. この仮説を立証するために,

\*1 山口県産業技術センター 専門研究員

\*2 国土交通省国土技術政策総合研究所 工博

\*3 北海道立北方建築総合研究所 博士(工学)

\*4 独立行政法人建築研究所 主任研究員

\*5 独立行政法人建築研究所環境研究グループ 博士(工学)

\*6 山口大学大学院理工学研究科 教授・工博

Researcher, Industrial Technology Institute, Yamaguchi Pref.  
National Institute for Land and Infrastructure Management, Dr. Eng.  
Hokkaido Northern Regional Building Research Institute, Dr. Eng.  
Senior Researcher, Building Research Institute  
Dept. of Environmental Engineering, Building Research Institute, Dr. Eng.  
Prof., Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi Univ., Dr. Eng.

実験室実験と実住宅実験によりその断熱性、防露性を確認し、さらに当該工法を住宅に適用した場合の省エネルギー性能をシミュレーションにより検討し、その有用性を示した。

## 2. 土壁住宅実測調査

山口県内に存する土壁住宅3戸を対象に夏期および冬期の室内温熱環境を測定した。測定対象住宅の概要を表1に示す。

### 2-1 室内温熱環境測定結果

山口県は一部地域を除いて次世代省エネルギー基準IV地域に指定されているが、その気候的特徴から①瀬戸内海沿岸地域（比較的温暖で積雪が少ない）、②中山間地域（比較的気温が低く降水量積雪量が多い。風が弱い）、③日本海沿岸地域（冬期は瀬戸内海沿岸地域よりも温暖、日照時間が比較的短く年間を通じて3m/s程度の風がある）、の3地域に大別することができる。各地域内において1995-96年に竣工した床面積が同程度の土壁住宅3戸（住宅1, 2, 3）を対象に、冬期、夏期の室内温熱環境を3戸同時に連続1ヶ月（2004年2月12日～3月12日、8月3日～8月30日）にわたり測定した。

図1, 2は3住宅の居間室温、寝室室温、非暖房室温（1階便所）、外気温の測定期間平均日変動を示している。外気温は住宅2の所在地が他の地域と比較して冬期4℃、夏期2℃程度低い。また、住宅1の所在地は他の地域と比較して冬期、夏期とも日変動幅が小さい。冬期に注目すると、①居間と非暖房室の温度差は最大で12～14℃と大きく、在室時間に積極的に暖房していることがわかる。②寝室と非暖房室の温度差はほとんどなく、就寝時は暖房していないことがわかる。夏期に注目すると、3住宅とも冷房機器に頼らず自然換気を重視した生活スタイルであり、①3住宅とも居間室温と寝室室温の差は小さい。②住宅2の室温は他の住宅と比較して1日を通して2～3℃低く推移しているが、これは外気温の差が室温の差に現れているといえる。

図3は3住宅の居間と寝室の上下温度分布、非暖房室温と外気温の測定期間平均日変動を示している<sup>注1)</sup>。すべての住宅に共通して①居間の上下温度差は最大で約10℃と大きく、②寝室の上下温度差はほとんどないことがわかる。

以上3つの異なる地域での測定結果から、各戸とも暖冷房機器を使用しない生活を基本にしているが、冬期の居間においては暖房器具を使用して室内温熱環境を強制的に改善しようとしていることが伺える。ところが暖房機器の使用時間帯における上下温度分布は著しく、漏気の高さと断熱性の低さが影響しているものと考えられる。

表1 測定住宅仕様

記号	住宅1	住宅2	住宅3
竣工	1996.10竣工	1995.8竣工	1996.12末竣工
居住者	大人2	大人2	大人3
工法	在来木造(土壁)	在来木造(土壁)	在来木造(土壁)
階数	2	2	2
所在地*	瀬戸内海沿岸・標高4m IV地域、は地域	中山間・標高310m IV地域、る地域	日本海沿岸・標高4m IV地域、る地域
断熱仕様	(天井) 9'30分+50mm (壁) 無し (床) 無し 9'5分+25mm (開口部) 単板9'5分	(天井) 9'30分+50mm (壁) 無し (床) 無し 単板9'5分	(天井) 9'5分+55mm (壁) 無し (床) 無し 9'5分+40mm (開口部) 単板9'5分
床面積	152.76㎡	161.01㎡	142.34㎡
設備機器	HP 石油ファンヒーター	HP 石油ファンヒーター 電気こたつ	HP 石油ファンヒーター 石油こたつ 電気こたつ
相当断熱面積	9.6cm <sup>2</sup> /㎡	9.4cm <sup>2</sup> /㎡	8.7cm <sup>2</sup> /㎡

\*所在地には、標高、次世代省エネルギー基準地域区分、パッシブ地域区分を示している。

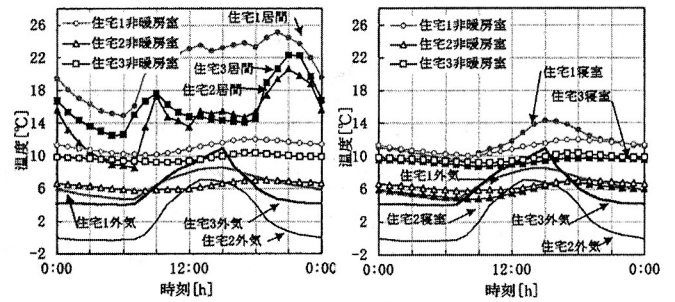


図1 冬期3地域住宅測定結果

(左: 居間と非暖房室, 右: 寝室と非暖房室)

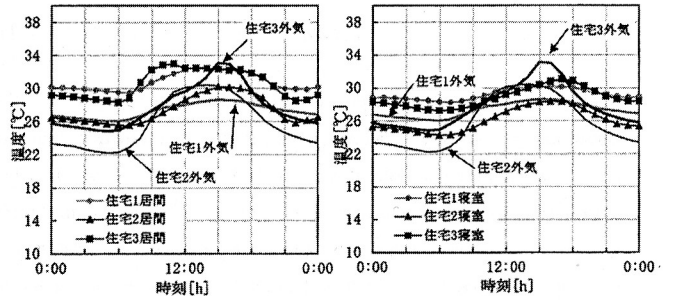


図2 夏期3地域住宅測定結果 (左: 居間, 右: 寝室)

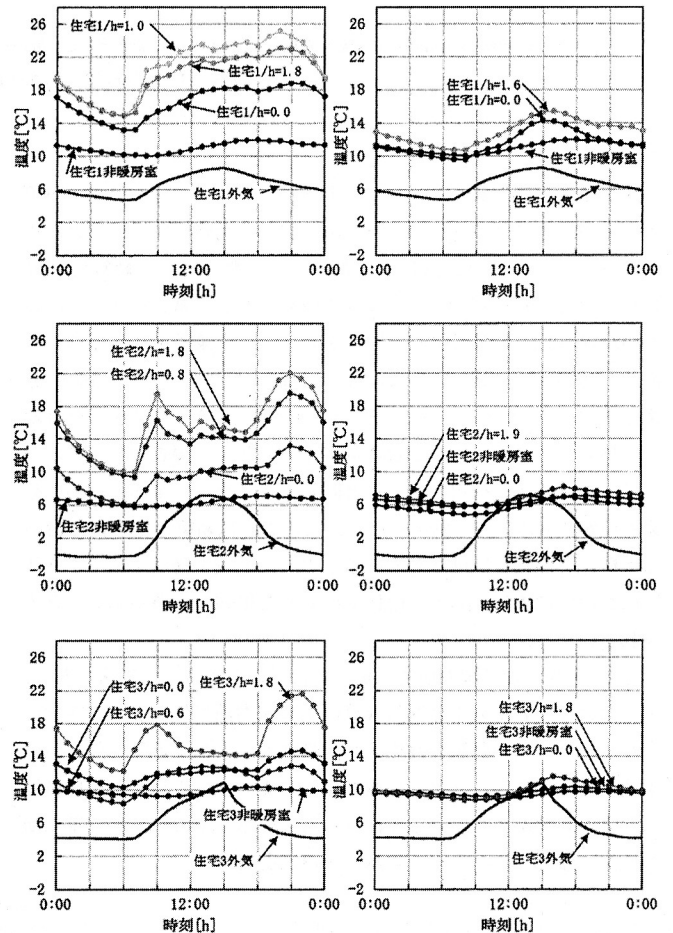


図3 冬期室内上下温度 (左: 居間, 右: 寝室)

## 2-2 住宅気密性能測定

3 住宅の住宅気密性能を測定した。測定方法は JIS A2201「送風機による住宅等の気密性能試験方法」(コーナールック(株)KNS-4000 II を使用)に倣った<sup>注2)</sup>。測定結果を表 1 に示すが、相当隙間面積は 8.7~9.6cm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>であった。

## 3. 土壁断熱工法の実験室実験

在来木造住宅の全熱損失量に占める外壁からの熱損失量は 3 割強と試算できることから<sup>注3)15)</sup>、土壁の断熱性能を向上させることにより、土壁住宅の室内温熱環境の大幅な改善が期待できると考える。土壁を断熱化する工法として、土壁外気側充填断熱工法を対象に実験室実験によりその断熱性能と壁体を断熱化の際に重大な問題となる内部結露状況を確認した。

### 3-1 土壁外気側充填断熱工法

土壁を断熱化する工法を考えるにあたっては、実際に土壁住宅を建設している工務店の意見を参考に以下の 5 点に留意した。

①高い断熱性能の追求ではなく、普及しやすさを第一義に考慮した工法であること、②県内工務店が行っている現行施工方法から乖離しない工法であること、③現況の土壁住宅の外観を極力変更しない工法であること、④断熱化と同時に構造的な補強が可能な工法であること、⑤エコマテリアルによる断熱工法を検討すること。

現況の土壁住宅の外壁仕様は、柱(間柱)外気側表面に外装材(下見板あるいはサイディング)を直接打ち付ける納まりが一般的である(図 4)。この場合、土壁と外装材の間に約 30mm の空隙「ちり」が生じる(図 5)。土壁外気側充填断熱工法は「ちり」を有効活用する工法である(図 4)。具体的には、①「ちり」に断熱材を充填する。②断熱材の種類によってはその外気側に防水シートを貼付する。③構造用合板により構造補強する。④外装材の内側に通気層をとる。以上、土壁外気側充填断熱工法は上記 5 つの留意点を満足することができる土壁断熱化工法である。

### 3-2 実験室実験方法

土壁外気側充填断熱工法の性能を把握するため実験室実験を行った<sup>16)</sup>。実験には人工気象装置を使用し、装置内に施工した土壁の両側に外気と室内の気象条件を再現し温湿度を測定した。実験装置は、それぞれ独立して温度・湿度を制御可能な 2 室式の人工気象装置(株式会社マurlイ製)であり、その界壁部分(1,800×1,800)を 4 区分し、仕様が異なる供試体を順次施工し各供試体を構成する材料層間、表面の温度・相対湿度測定を経時的に行った。温度測定には T 型熱電対を、相対湿度測定には高分子膜湿度センサー(神栄株式会社製 HAO ロガー)を使用した。材料層間のセンサーは供試体施工中に予め該当測定箇所を設置した。

実験土壁を表 2、図 7 に示す。土壁の外気側空隙部に①グラスウール 32K (Type0010)、②押出法発泡ポリスチレンフォーム 3 種 (Type0020)、③土壁増し塗り (Type0030)、④炭化もみ殻 (Type0040)、⑤筆者らが開発した稲藁ともみ殻を主原料とするリサイクル断熱材 (Type0060)<sup>17)</sup>を付加させた仕様、①、②、⑤の外気側に構造用合板、通気層、スギ下見板を施工した仕様 (Type0013、Type0023、Type0063)、以上との比較のため基準土壁仕様 (Type0000) と次世代省エネルギー基準 IV 地域仕様 (Type9999)、以上 10 種類である。

設定した内外境界条件は①寒冷期を想定した定常条件、②寒冷期

を想定した 24 時間周期定常条件である。①では各供試体の基本的な断熱性能の比較を行った。②では内部結露状況を観察した。具体的な境界条件の値を表 3 に示す。②の外気条件は、次世代省エネルギー基準 IV 地域の中から寒冷地の代表として八王子のアメダスデータを採用し、最寒期における 1 日の温湿度変動を作成し用いた(図 9)。供試体内部の温湿度が十分に安定し定常状態にあることを確認した後、測定データを抽出し分析した。

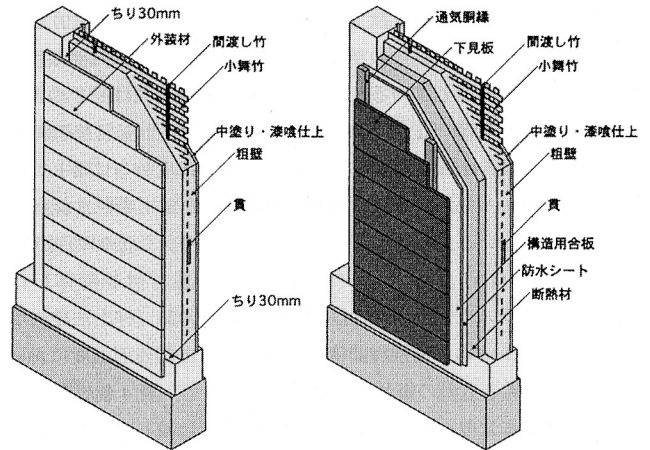


図 4 現況土壁工法(左)と外気側充填断熱工法(右)

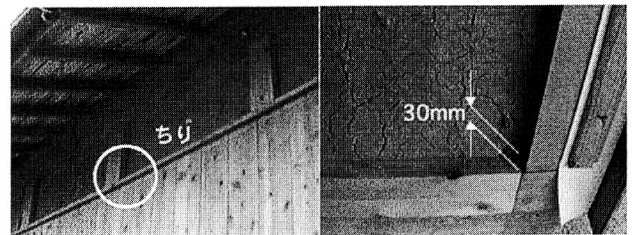


図 5 現況土壁工法の「ちり」

表 2 実験土壁仕様

名称	Type0000	Type0010	Type0020	Type0030	Type0040
外壁層構成	屋内	屋内	屋内	屋内	屋内
	中塗り、漆喰10	中塗り、漆喰10	中塗り、漆喰10	中塗り、漆喰10	中塗り、漆喰10
	粗壁60	粗壁60	粗壁60	粗壁60	粗壁60
外気	GW32K30	XPS3種30	土壁増し塗り30	炭化もみ殻30	透湿防水シート
	透湿防水シート	外気	外気	外気	透湿防水シート
	外気	外気	外気	外気	外気

名称	Type0060	Type0013	Type0023	Type0063	Type9999
外壁層構成	屋内	屋内	屋内	屋内	屋内
	中塗り、漆喰10	中塗り、漆喰10	中塗り、漆喰10	中塗り、漆喰10	石膏ボード9
	粗壁60	粗壁60	粗壁60	粗壁60	気密シート
	KNS30	GW32K30	XPS3種30	KNS30	GW16K100
	透湿防水シート	透湿防水シート	構造用合板9	透湿防水シート	構造用合板9
外気	構造用合板9	通気層18	通気層18	構造用合板9	透湿防水シート
	通気層18	スギ下見板12	スギ下見板12	通気層18	通気層18
	スギ下見板12	外気	外気	スギ下見板12	サイディング12
	外気	外気	外気	外気	外気

※図7に各断面図を示す。なお、KNSは稲藁ともみ殻を主原料とするリサイクル断熱材、XPSは押出法発泡ポリスチレンフォーム、GWはグラスウールの略記である。

表 3 実験境界条件

	屋外条件	屋内条件	実験日数
寒冷期定常	温度:4℃ 湿度:成り行き	温度:20℃ 湿度:50%RH	約30日
寒冷期周期定常	温度:八王子市北壁data 湿度:成り行き	温度:20℃ 湿度:50%RH	約30日

### 3-3 土壁物性値測定

実験で使用した土壁の基本物性（熱伝導率，絶乾密度，比熱，透湿率，平衡含水率）を測定した<sup>17)</sup>。測定結果のうち容積基準平衡含水率を図6に，その他を表4中「土壁」に示す。

### 3-4 定常実験結果

各土壁仕様の断熱性を計測するため定常条件での実験を行った。実験結果の妥当性を確認するため表4に示す物性値に基づく1次元の温度分布定常計算を行った。表4中，炭化もみ殻および稲藁もみ殻断熱材の物性値は参考文献18)から，その他は参考文献19)から引用した。図7に各供試体の断面図と，それぞれの断面内部温度の測定値と計算値を示している。各供試体断面の層構成は表2のとおりである。Type0000（土壁基準壁体），Type0030（土壁付加壁体）を比較した場合，土壁を付加しても壁体内部の温度分布に著しい変化は見られなかった。土壁の厚みを30mm増加しても断熱性能はほとんど向上しないことが改めて確認できた。一方，Type0040（炭化もみ殻付加壁体），Type0060（稲藁もみ殻断熱材付加壁体）はType0010（グラスウール32K付加壁体），Type0020（押出法発泡ポリスチレンフォーム3種付加壁体）と比べて室内側表面温度において約1℃程度劣るものの優れた断熱性能を示した。表4物性値から熱貫流率計算により，各実験壁体の断熱性能を比較した結果を図8に示す。図中直線は日本住宅性能表示基準のIV地域における省エネルギー対策等級（木造住宅外壁熱貫流率）の基準値を示しているが，土壁外気側空隙部に断熱材を充填することにより断熱性能が大幅に改善され，等級4（次世代省エネルギー基準相当）は達成しないものの，Type0040，0060，0063は等級2（旧省エネルギー基準相当）と等級3（新省エネルギー基準相当）の間を，Type0010，0020，0013，0023はほぼ等級3を達成できている。

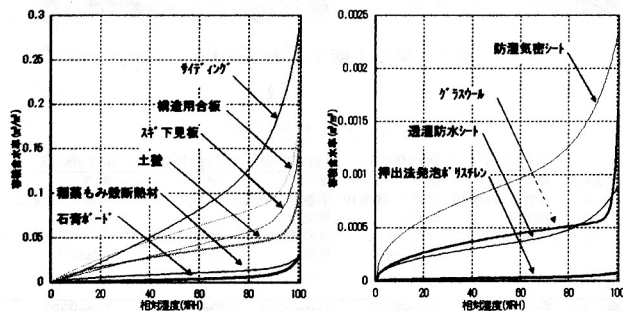


図6 平衡含水率曲線

表4 計算に使用した材料物性値

名称	熱伝導率 [W/mK]	絶乾密度 [kg/m³]	比熱 [KJ/kgK]	湿気伝導率 [g/mhmmHg]	出典
土壁	0.447	1560	0.89	9.93E-03	実測
炭化もみ殻	0.049	120	1.10	2.21E-03	18)
稲藁もみ殻断熱材	0.051	247	1.29	2.96E-02	18)
グラスウール32K	0.036	32	0.67	1.11E-01	19)
押出法発泡ポリスチレンフォーム3種	0.034	30	1.47	7.20E-04	19)
石膏ボード	0.221	700	1.88	2.40E-02	19)
構造用合板	0.111	500	1.88	9.60E-04	19)
スギ下見板	0.103	424	1.88	2.30E-03	19)
サイディング	0.963	1095	0.88	1.58E-02	19)
防湿気密シート	0.093	930	2.29	3.85E-07	19)
透湿防水シート	0.330	353	2.29	1.95E-03	19)

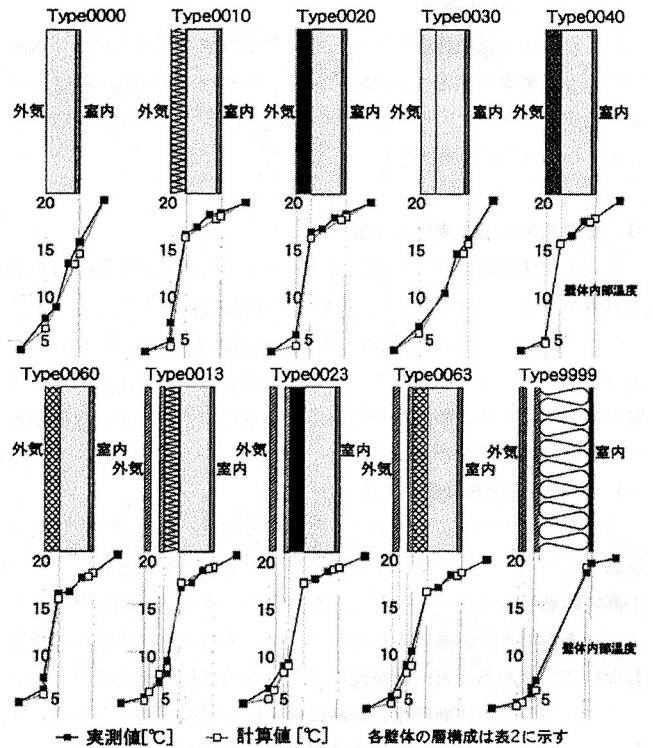


図7 定常実験結果（各断面）

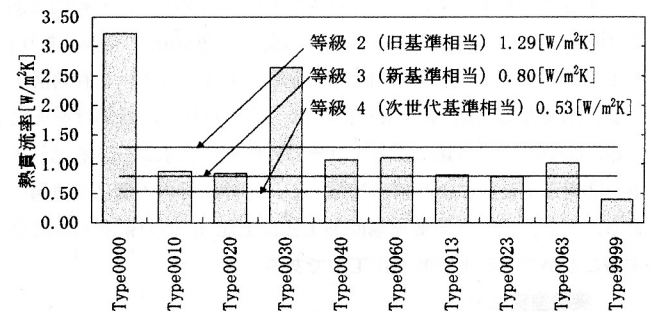


図8 熱貫流率計算結果

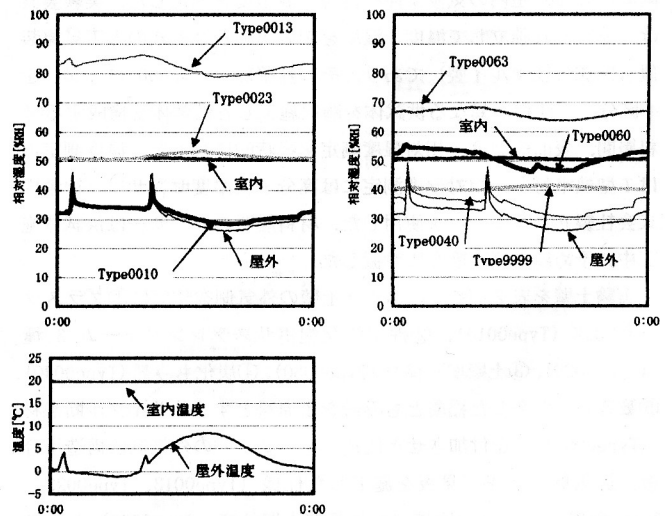


図9 断熱材屋外側表面に関する寒冷期周期定常実験結果  
（上：相対湿度，下：温度）

### 3-5 周期定常実験結果

概ね周期定常状態にあることを確認した後の24時間の各供試体の相対湿度変化と、室内屋外の温度変化を図9に示す<sup>注4)</sup>。壁体内内部結露発生確認が目的であるため、断熱材屋外側表面の相対湿度を図示している。実験の結果、Type0013が最も高湿となり約85%RH、次いでType0063が約70%RH、その他の仕様では30-55%RHであった。このように周期定常実験の結果からは壁体内結露はいずれの仕様においても認められなかった。

### 4. 内部結露判定シミュレーション

Type0013, Type0023 と Type0063 を対象に、熱・水分同時移動方程式に基づき後退差分法により非定常の一次元温湿度分布計算により壁体内結露判定をおこなった。蒸気拡散支配領域の材料内における水分移動を考え、液水移動はなく水蒸気移動のみを考慮した計算を行った。また、蒸気拡散支配領域においては熱伝導率、湿気伝導率は一定と考えられるため一定値を用いている。さらに、含水率の温度依存性は計算結果に与える影響が小さいと考え考慮していない<sup>17), 20)</sup>。1時間毎、1月1日から1年間計算した。

境界条件として、屋内側条件は(1)式を、冬期屋外側条件は山口と八王子のアメダス気象データから計算した北壁相当外気温を、夏期屋外側条件は山口と福岡のアメダス気象データから計算した西壁相当外気温を使用した。八王子と福岡は、いずれも山口と同じ次世代省エネルギー基準IV地域内の地点で、それぞれ冬期および夏期の外気条件が山口と比較して厳しい地点の代表として採用した。

$$T = 4.5 \cos\left(\frac{2\pi(\text{day} - 212)}{365}\right) + 22.5 \quad RH=60 [\%] \text{一定} \quad \dots (1)$$

day: 1月1日を起点とした延べ日数 [日]

#### 4-1 冬型結露判定結果

各仕様の計算全期間(1時間毎)における断熱材外気側表面の相対湿度(2%間隔)の発生回数を全時刻数で除し、頻度として表した結果を図10に示す。内部結露の判定基準を相対湿度98%とすると、Type0013(八王子北壁外気条件)以外の断熱材仕様において内部結露は発生しない結果となった。また、Type0023, Type0063, Type0013の順で相対湿度発生頻度分布が低位であったが、Type0013(山口北壁外気条件)において、結露発生基準には達しなかったものの相対湿度90%以上で発生頻度が1.5%程度の値を示した。

#### 4-2 夏型結露判定結果

各仕様の計算全期間(1時間毎)における断熱材室内側表面の相対湿度(2%間隔)の発生回数を全時刻数で除し、頻度として表した結果を図11に示す。内部結露の判定基準を相対湿度98%とすると、全ての断熱材仕様において内部結露は発生しない結果となった。冬型結露判定結果と比較して相対湿度発生頻度分布は圧倒的に低位であった。

### 5. 実住宅施工実験による壁体内湿度実測

山口県宇部市内(瀬戸内海沿岸地域)に立地する住宅の2階北側ベランダ部への書斎増築工事にあって、室の西側壁面のみ土壁外気側充填断熱工法(他壁面は乾式工法)により実験的に施工した(土壁施工:2003年7月,断熱施工:2005年2月,図12)。間柱,梁で区画された部位毎に断熱材の種類を換え施工し(表2 Type0023,

Type0063), 材料層間に温湿度センサーを設置し経時測定した。夏期(2005年8月)および冬期(2006年1月)4週間の相対湿度および室内外温度の測定結果を図13, 14に示す。壁体内の相対湿度について、図13は断熱材室内側, 図14は断熱材外気側の測定結果である。夏期においては、開口部を開放した生活パタンの影響で室内外温度差がほとんどない。壁体内の相対湿度に注目するとType0063の相対湿度は70%から90%の間で推移し、Type0023と比較して約10%程度常に高かった。冬期においては、ほぼ全測定期間を通して、明け方は2~3℃, 19時から22時にかけては約10℃の温度差が室内外においてあった。一方、電気パネルヒーターを使用した生活パタンの影響で室内相対湿度は70%以下で推移し、断熱材外気側相対湿度はType0063, Type0023ともほぼ等しく共に室外と室内の中間に位置した。夏期と冬期の壁体内相対湿度を比較すると夏期結果の方が変動幅が小さいが、いずれにしても夏期, 冬期とも実測期間を通して内部結露は認められなかった。

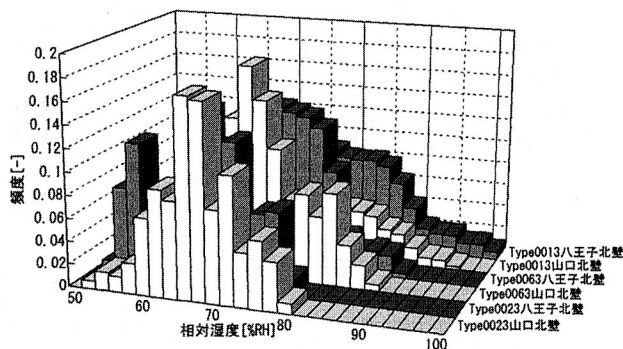


図10 冬型結露判定シミュレーション結果

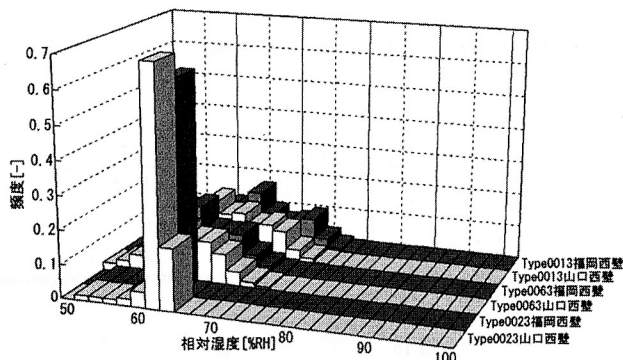


図11 夏型結露判定シミュレーション結果

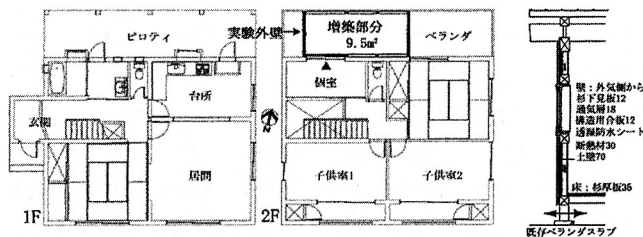


図12 実験住宅(左:平面図, 右:実験外壁断面詳細図)

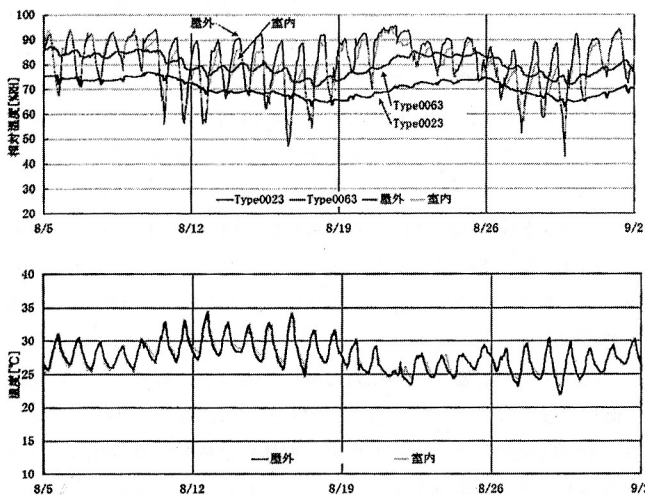


図13 夏期測定結果（上：断熱材室内側相対湿度，下：温度）

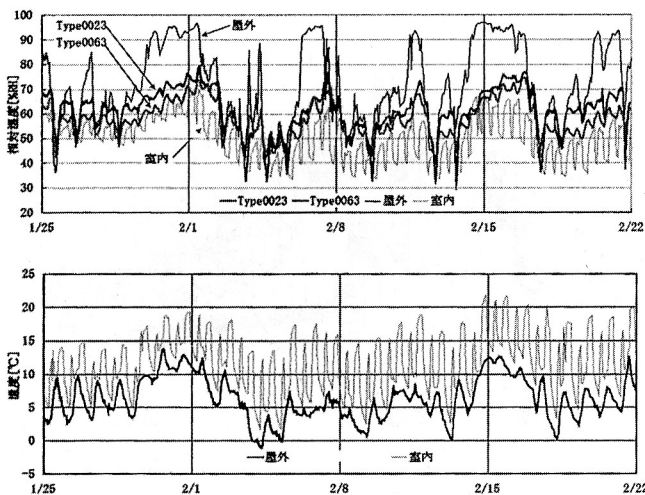


図14 冬期測定結果（上：断熱材屋外側相対湿度，下：温度）

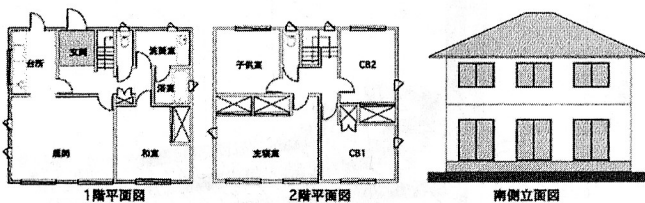


図15 建築学会標準問題

表5 シミュレーション断熱仕様

名称	旧基準	新基準	次基準	土壁	土壁+新基準	土壁+次基準	土壁+次基準+KNS	土壁+次基準+XPS
屋根	吹込GW30K 35mm	吹込GW30K 75mm	吹込GW30K 160mm	GW10K 50mm	吹込GW30K 75mm	吹込GW30K 160mm	吹込GW30K 160mm	吹込GW30K 160mm
外壁	GF16K 30mm	GF16K 55mm	GF16K 100mm	なし	なし	なし	KNS 30mm	XPS3種 30mm
床	GF16K 25mm	GF16K 45mm	GF16K 100mm	ポリエチレンフォーム E25mm	GF16K 45mm	GF16K 100mm	GF16K 100mm	GF16K 100mm
開口部	普通単板 ガラス	普通単板 ガラス	普通複層 ガラス	普通単板 ガラス	普通単板 ガラス	普通複層 ガラス	普通複層 ガラス	普通複層 ガラス
換気回数	1.5回/時	1.0回/時	0.5回/時	0.95回/時	0.95回/時	0.95回/時	0.95回/時	0.95回/時

\*KNSは稀薄もみ板断熱材、XPSは押出法発泡ポリスチレンフォーム、GWはグラスウールの略記である。

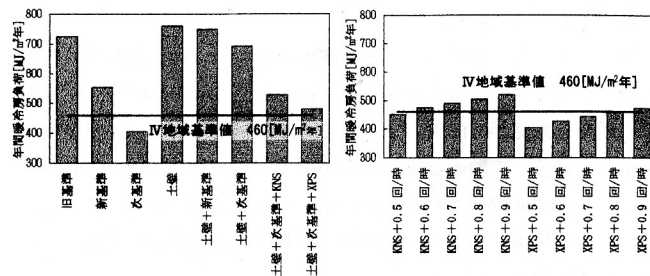


図16 年間暖冷房負荷計算結果（左：断熱仕様，右：換気回数）

## 6. 省エネルギー性能シミュレーション

土壁住宅の断熱化による省エネルギー効果を「住宅に係るエネルギーの使用の合理化に関する建築主の判断の基準」に示された省エネルギー性能を表す指標「年間暖冷房負荷」により比較した。

シミュレーションは「建築学会標準問題」（図15）を計算対象住宅にし<sup>21)</sup>、表4、図6に示した建築材料の物性値、「2-2 住宅気密性能測定」で得られた山口県内土壁住宅の気密性能実測データを使用した。外気条件は山口市の拡張アメダスデータを使用した。外壁の仕様は表2のType0023、Type0063 すなわち土壁外気側に断熱材を付加し、構造用合板、通気層がある仕様である。

「年間暖冷房負荷」算出にあたっては住宅の換気回数を特定する必要がある。風力換気がない場合において相当隙間面積と自然換気回数の関係は、隙間の位置や隙間の形状などの影響を受け必ずしも一意的には決まらないが、おおよその検討はつけることができ、例えば、住宅の内外の温度差が30℃のときは「相当隙間面積」の10分の1の数値が「自然換気回数」と考えて大きな誤りはなく、温度差による換気量（漏気量）は、内外温度差に比例する<sup>22)</sup>。このことから現況の県内土壁住宅の換気回数を0.95回/時とした。

シミュレーション住宅断熱条件を表5に示す。表1に示す現況土壁住宅「住宅1」仕様（名称「土壁」）、「土壁」の壁以外の外皮に平成4年省エネルギー基準（以下新基準）を適用した仕様（名称「土壁+新基準」）、平成11年省エネルギー基準（以下次世代基準）を適用した仕様（名称「土壁+次基準」）、「土壁+次基準」に土壁外気側充填断熱工法を適用した仕様（名称「土壁+次基準+KNS」）、「土壁+次基準+XPS」）、土壁断熱仕様との比較対象として昭和55年省エネルギー基準準拠断熱仕様（名称「旧基準」）、新基準準拠断熱仕様（名称「新基準」）、次世代基準準拠断熱仕様（名称「次基準」）、以上8仕様について計算した<sup>注5)</sup>。ソフトウェアとしてSMASH for Windows Ver.2、AE-CAD version3.0.0、AE-Sim/Heat version3.0.0を使用した。

年間暖冷房負荷の計算結果を図16に示す。図中直線はIV地域における次世代省エネルギー基準値（460MJ/㎡年）を示している。

壁以外の外皮に新基準を適用した仕様「土壁+新基準」、次世代基準を適用した仕様「土壁+次基準」、ともに現況土壁住宅仕様「土壁」と比較して省エネルギー性能の向上はあまり認められなかった。

壁以外の外皮に次世代基準を適用し土壁外気側充填断熱工法による仕様「土壁+次基準+KNS」、「土壁+次基準+XPS」の場合、新基準準拠仕様「新基準」同等以上の省エネルギー性能が得られるが、次世代省エネルギー基準値を達成するまでには至らなかった。

図16右図は、壁以外の外皮に次世代基準を適用し土壁外気側充

填断熱工法による仕様「土壁+次基準+KNS」,「土壁+次基準+XPS」において、換気回数を変えた仕様の計算結果を示している(0.9回/時から0.5回/時まで0.1回/時ずつ減じた仕様)。土壁外気側充填断熱工法の断熱材に押出法発泡ポリスチレンフォーム3種(XPS)を使用した場合は換気回数0.8回/時以下、稲藁もみ殻断熱材(KNS)を使用した場合は換気回数0.5回/時以下に設定すると次世代省エネルギー基準値に達した<sup>注6)</sup>。

## 7. 結論

本報では、山口県内に立地する土壁住宅の室内温熱環境の実測結果等から、現況土壁住宅の外気側空隙に断熱材を充填する断熱工法に注目し、その熱湿気性状と省エネルギー性能を明らかにした。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 山口県内の土壁住宅の温熱環境実測の結果、冬期の居間においては暖房器具を使用しているが上下温度分布が大きく暖房効率が悪く、気密性能は相当隙間面積 $8.7\sim 9.6\text{cm}^2/\text{m}^2$ であった。
- 2) 実験室実験の結果、今回の実験条件では土壁外気側充填断熱工法は省エネルギー対策等級(木造住宅外壁熱貫流率)2から等級3を達成でき、壁体内部冬型結露は認められなかった。
- 3) 押出法発泡ポリスチレンフォーム、稲藁もみ殻断熱材を使用した土壁外気側充填断熱工法を対象にした結露判定数値シミュレーションの結果、山口のアメダスデータを外気条件とした場合、壁体内部結露は認められなかった。また同一断熱材・工法による実住宅実験においても、壁体内部結露は認められなかった。
- 4) 省エネルギーシミュレーションの結果、土壁外気側充填断熱工法により土壁住宅の省エネルギー性能を向上させることができたが、次世代省エネルギー基準規定の性能には至らなかった。
- 5) 省エネルギーシミュレーションの結果、筆者らが開発した「稲藁もみ殻を主原料とするリサイクル断熱材」を土壁外気側充填断熱工法に使用した場合、換気回数0.5回/時に相当する住宅気密性能を実現できれば次世代省エネルギー基準規定の性能を達成できることがわかった。

本論では、山口県内の土壁住宅を対象とした実測調査をもとに、その断熱性能、省エネルギー性能の向上を目的とした土壁外気側充填断熱工法を提案した。今回の実験条件では、その断熱性能が確認できるとともに、内部結露の問題は回避できる可能性が示された。また、次世代省エネルギー基準レベルの性能を確保するため、例えば壁等における面材の使用等によって気密性を向上させることが有効であることを示した。しかし、断熱材外気側に設置した構造用合板等の面材については材の透湿性が重要であり、透湿抵抗のより大きな材を用いた場合には結露が起きる可能性もある。また施工方法については、土壁が十分に乾燥しないうちに透湿抵抗の大きな面材を施工しないこと、断熱材を隙間なく充填する点にも配慮が必要と考える。さらに内部結露は壁体構成だけで回避できるものではなく、暖房器具の選択、換気計画などの配慮が必要である。

今回検討した仕様の中では、押出法発泡ポリスチレンフォーム、稲藁もみ殻断熱材を用いた断熱工法でその有用性が確認されたが、断熱性能、防露性能、省エネルギー性能とも、押出法発泡ポリスチレンフォーム仕様が稲藁もみ殻断熱材仕様を上回った。しかし自然

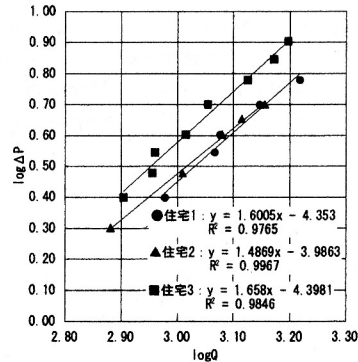
素材の土壁と化学素材の発泡プラスチック系断熱材の組み合わせよりも、性能は劣るものの稲藁もみ殻断熱材等の自然素材系断熱材を用いる仕様のほうが広く受け入れられる可能性が高いものと考えられる。なお土壁は工業製品ではなく、その物性にはばらつきがあるため、今後、実験データの蓄積により当該工法の性能をさらに詳しく検証する必要があると考えられる。

## 謝辞

本研究を実施するにあたり、多大なるご指導ご助言をいただいた国土交通省総合技術開発プロジェクト「エネルギー自立循環型建築・都市システム技術の開発」及び独立行政法人建築研究所研究課題「エネルギーと資源の自立循環型住宅に係わる普及支援システムの開発」自立循環型住宅開発委員会断熱外皮委員会委員各位に深く感謝の意を表します。

## 注

- 注1) 住宅3居間 $h=0.0$ の値が $h=0.6$ の値を一部上回っているが、これは測定器の設置位置に起因すると考えられる。すなわち、居住者が通常の生活を送る中で測定するため、測定器の設置にあたっては生活の邪魔にならないことを考慮し設置位置を選んだ。このことにより高さ方向だけではなく水平位置も異なるため、暖房器具との位置関係などによりこのような逆転が起きたと考える。しかし本論では高さ方向全体の温度差が重要であり、 $h=0.0$ 、 $h=0.6$ と $h=1.8$ の値には大きな差異があるため、このデータをそのまま記載した。
- 注2) JIS A 2201「送風機による住宅等の気密性能試験方法」によれば、内外圧力差の測定範囲は、通常 $10\sim 50\text{Pa}$ とある。しかし本測定対象住宅では規定の内外圧力差が生じず、内外圧力差 $2\sim 8\text{Pa}$ における通気量測定結果から気密性能を算出した。付図1に圧力差と通気量それぞれの対数値と、最小二乗法による近似直線を示している。いずれも $R^2=0.97$ 以上の高い相関があることからこの測定結果を用いて気密性能を算出した。



付図1 圧力差-通気量特性グラフ

- 注3) 実測をおこなった山口県内の土壁住宅の断熱気密仕様(表5中「土壁」)を建築学会標準問題(図15)に適用した場合の部位ごとの熱損失量を熱損失係数算出方法に従い計算した結果を付表1に示す。外壁からの熱損失量は全体の37%を占める。

付表1 部位ごとの熱損失量

部位	天井・屋根	外壁	床	窓	ドア	すきま風	合計
熱損失量[W/K]	50.1	229.0	48.3	165.7	15.8	107.3	616.1
	8.1%	37.2%	7.8%	26.9%	2.6%	17.4%	100.0%

- 注4) 人工気象装置は8時間周期で冷凍機除霜運転を行うよう設定した。その影響が図9のパルス状の乱れとして現れているが、8時間周期であるため24時間周期定常実験の周期性に影響はないと考える。また、周期定常状態にあるか否かの判断は、パソコン画面上で実験中の測定値の経時変化を観察し、目視により安定していると判断した。
- 注5) 次世代省エネルギー基準において、換気回数の設計条件を0.5回/時

と規定している。また旧省エネルギー基準、新省エネルギー基準においては、熱損失係数算出の際に換気負荷として見込む換気回数値(気密住宅でない木造住宅の場合)を1.5回/時、1.0回/時と規定している。この値を使用した。

- 注6) 「次世代省エネルギー基準 2 地域の区分に応じた相当隙間面積の基準」で、IV地域の住宅の相当隙間面積の基準を $5.0[\text{cm}^2/\text{m}^2]$ と定めている。ただし、「次世代省エネルギー基準 1 地域の区分に応じた年間暖冷房負荷等の基準」で定める年間暖冷房負荷基準( $460[\text{MJ}/\text{m}^2\text{年}]$ 以下)に適合する場合において、同熱損失係数が $3.7[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ 以下のときは、相当隙間面積の基準を免れる。図16において年間暖冷房負荷基準値に達した全ての仕様の熱損失係数計算結果は $3.7[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ 以下であった。

#### 参考文献

- 1) 鈴木大隆：土壁造住宅の断熱技法の開発，機関誌 GBRC vol.129 117号，pp.2-11，(財)日本建築総合試験所，2004.7
- 2) 住宅・建築主要データ調査報告 平成14年度-戸建住宅編-，(財)住宅金融普及協会，2003.5
- 3) 安村恵子，大橋好光，福浜嘉宏：住宅の土壁構法に関する研究 土壁構法の採用状況と小舞の仕様に関するアンケート調査，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2，pp.719-720，2000
- 4) 木村健一，田辺新一他：川越の伝統的蔵造り民家の温熱環境実測，日本太陽エネルギー学会第12回研究発表会講演論文集，pp.161，1986
- 5) 浦野良美，渡辺俊行，林徹夫，内山明彦：九州北部に残る伝統的民家の熱環境に関する調査研究，日本建築学会計画系論文報告集 NO.371 pp.27，1987
- 6) 長谷川兼一，吉野 博，斉木紀彰：宮城県における民家を対象とした室内熱環境に関する実測調査，日本建築学会技術報告集第3号，pp.189，1996
- 7) 青島竜太，澤地孝男，井上 隆，瀬戸裕直，鈴木大隆，本間義規：地域的特色を有す戸建住宅の室内温熱環境に関する実態調査研究 その1 滋賀県・愛知県における土壁造を中心とした在来木造住宅に関する調査結果，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2，pp.117-118，2000
- 8) 水沼 信，澤地孝男，瀬戸裕直，青島竜太：地域的特性を有す戸建住宅の室内温熱環境に関する実態調査研究 その2 山口県の土塗り壁住宅について，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2，pp.119-120，2000
- 9) 望月昭，鈴木大隆，澤地孝男他：土壁住宅の断熱技術に関する研究 その1 愛知県に立つ実住宅での実測結果，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2，pp.75-76，2002
- 10) 水沼 信，鈴木大隆，澤地孝男，瀬戸裕直，斉藤宏昭：土壁住宅の断熱技術に関する研究 その2 山口県における実験室実験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2，pp.77-78，2002
- 11) 青木正論，瀬戸裕直，澤地孝男，鈴木大隆他：温暖地に向けた断熱外壁の防露技術に関する研究 その1 防湿気密層のない壁体の熱湿気性状に関する実験報告，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2，pp.95-96，2001
- 12) 鈴木大隆，瀬戸裕直他：温暖地に向けた断熱外壁の防露技術に関する研究 その2 実験住宅の概要と各種壁体の冬期測定結果，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2，pp.97-98，2001
- 13) 青木正論，瀬戸裕直，澤地孝男，鈴木大隆他：温暖地に向けた断熱外壁の防露技術に関する研究 その4 防湿気密層のない壁体の熱湿気性状に関する冬期温暖地を想定した実験報告，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2，pp.69-70，2002
- 14) 藤田里美，瀬戸裕直，澤地孝男，鈴木大隆他：温暖地に向けた断熱外壁の防露技術に関する研究 その7 湿潤な気候下における冬期実験報告，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2，pp.159-160，2003
- 15) 建設省住宅局住宅生産課・住宅金融公庫監修：新省エネルギー基準による住宅断熱の設計から施工まで，(財)住宅・建築省エネルギー機構，pp.9，1992.9
- 16) 齊藤宏昭，土屋番雄：冷房時における夏型壁体内結露に関する研究 その1 人工気象室における非定常結露実験，日本建築学会計画系論文集第519号，pp.39-45，1999.5
- 17) 水沼 信，中村安弘，中園真人：稲藁ともみ殻を主原料とするリサイクル断熱材の開発と基本性能評価，日本建築学会環境系論文集第616号，pp.37-43，2007.6
- 18) Kumaran, M. K 著 日本建築学会訳：建築材料の熱・空気・湿気物性値，2001
- 19) 防露設計研究会著，池田哲朗監修：住宅の結露防止，pp.113-115，学芸出版社，2004
- 20) 鉾井修一，池田哲朗，新田勝通著：エース建築環境工学II，pp.107，朝倉書店，2002
- 21) 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回熱シンポジウムテキスト，pp.23-33，1985
- 22) 住宅の気密性能試験方法，(財)建築環境・省エネルギー機構，pp.12，2005.5

(2007年7月9日原稿受理，2007年11月13日採用決定)