

太鼓障子と木製複層ガラスサッシによる伝統民家の開口部断熱改修仕様の性能評価

EVALUATION OF HEAT INSULATION PERFORMANCE OF THE FITTING COMBINED TAIKO-SHOJI AND WOODEN PAIR GLASS SASH FOR TRADITIONAL WOODEN HOUSE RENOVATION

中園 真人*, 吉浦 温雅**, 水沼 信***, 小金井 真****
*Mahito NAKAZONO, Atsumasa YOSHIURA, Makoto MIZUNUMA
and Makoto KOGANEI*

Heat insulation specifications of the fitting which combined a *Taiko-shoji* with wooden pair glass sash are effective as the way of repairing a traditional wooden house with not only heat insulation performance but also the execution and design as well. In this paper, the insulation performance of *Taiko-shoji* was examined by indoor experiment, actual house measurement and numerical calculation. The results are as follows. As the result of indoor experiment, the heat resistance value of *Taiko-shoji* (air space=26 mm) was at 1.3 times of single shoji and about 20% of the heat transfer coefficients decreased. As the result of measurement of improved actual house, the average heat resistance value of *Taiko-shoji* + pair glass was $0.64 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, pair glass only was $0.35 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$. The overall heat transfer coefficient of *Taiko-shoji* + pair glass decreased to 27% of single glass by the numerical calculation. In case that the traditional house with single glass is repaired by *Taiko-shoji* + pair glass fitting, the validity of these specifications is shown by the simulations.

Keywords : *Traditional House, Renovation, Taiko-Shoji, Wooden Pair Glass Sash, Insulation Performance*
伝統民家, 改修, 太鼓障子, 木製複層ガラスサッシ, 断熱性能

1. 序論

伝統民家の断熱改修においては、床・天井が容易に断熱できる部位として対象となるのが一般的であるが、暖房エネルギーの削減や冬期の室内温熱環境の改善を目指すには、面積が広くかつ単板ガラスが多用されている開口部建具の断熱性能向上が課題である。さらに開口部建具の仕様には、断熱性能に加え施工の容易性と和風の設えに適合したデザインが条件として求められるが、こうした伝統技術を取り入れた新たな建具の開発と性能評価に関しては、二重窓の有効性¹⁾⁻³⁾や木製の高断熱性と結露防止効果の報告⁴⁾、障子紙による空気層を有す付属物を用いた建具の性能に関する報告等がなされている。吉川ら⁵⁾は、5枚の障子紙と単板ガラスで仕切られた多重密閉空気層を有す建具の室内実験により、断熱性能の評価を行っている。また、アルミフレームに強化和紙を太鼓貼りし、空気層を設けた建具と複層ガラスによる仕様を設計に採用し、冬期の室内温熱環境を実測した結果報告⁶⁾がある。

こうした空気層を有す建具としては、組子両面に障子紙を張る太鼓障子が伝統的建具として知られており、筆者らは、断熱性能のみでなく施工性・コスト及びデザインを考慮した伝統民家の開口部断熱改修の実用的手法として、木製複層ガラスサッシと太鼓障子を組み合わせた建具仕様を考案し、伝統民家の改修工事において実験的に採用した(図7~9参照)。本仕様の特徴は、第一に複層ガラスサッシの室内側に密閉空気層を有す太鼓障子を付加することにより、障子内部の空気層とガラスサッシと太鼓障子間に形成される空気層(以

下、中間空気層と称す)の複合効果により断熱性能の向上が期待されること、第二に既存の建具枠の改修または取替えにより容易に施工が行えること、第三に太鼓障子の製作は新たな技術を必要とせず、かつコストも安価な点が挙げられる。

しかし、太鼓障子の断熱性能は定性的には指摘されているものの、室内実験や実家屋計測によりその効果を定量的に示した報告は少なく、障子紙により形成される単層の空気層を有す付属物とガラスサッシの組み合わせ仕様の熱的効果の報告事例も見られない。その原因は、既往研究成果⁷⁾⁻⁹⁾から空気層の熱抵抗は容易に推計できるためと考えられるが、太鼓障子内の空気層の熱移動は、障子組子の厚さや形状、空気層を挟む面の表面温度等に影響される可能性があり、実験により熱的特性の検討を行うことも重要であり、実用化に向けては、実家屋での建具の隙間により生ずる熱損失の影響を考慮した断熱性能の評価や、外気温変動状態における熱損失量削減効果の計測が課題となる。また、省エネルギー性の確保には開口部以外の床・天井・壁等の断熱改修と気密化との組み合わせが前提となるため、これらの部位を含めた断熱改修仕様と暖冷房負荷との関係を把握することが、効率的な改修を計画・設計する上で重要である。

そこで本論では、室内模型実験及び伝統民家改修事例の計測により、太鼓障子と木製複層ガラスサッシの組合せによる開口部断熱改修仕様の性能を明らかにするとともに、数値計算による熱的効果の定量化を行い、開口部建具及び床・天井・壁の断熱仕様と暖冷房負荷との関係を検討することを目的とする。なお本研究の開口部の熱貫

* 山口大学大学院理工学研究科 教授・工博
** 山口大学大学院理工学研究科 博士後期課程・工修
*** 山口県産業技術センター グループリーダー・博士(工学)
**** 山口大学大学院理工学研究科 准教授・博士(工学)

Prof., Graduate School of Science and Eng., Yamaguchi Univ., Dr. Eng.
Doctoral Course, Graduate School of Science and Eng., Yamaguchi Univ., M. Eng.
Group Leader, Yamaguchi Prefectural Industrial Technology Institute, Dr. Eng.
Assoc. Prof., Graduate School of Science and Eng., Yamaguchi Univ., Dr. Eng.

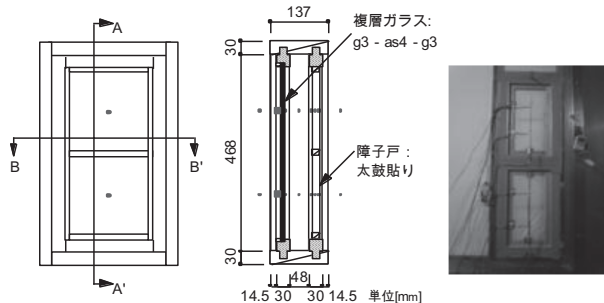


図1 試験体立面図 図2 A-A' 断面図 写真1 試験体設置状況

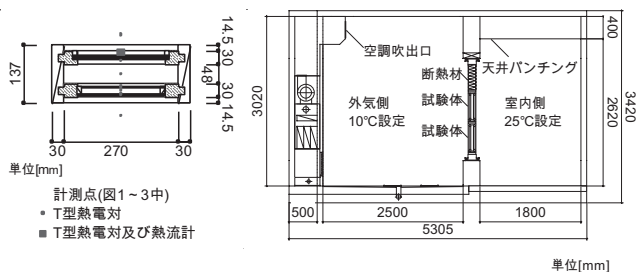


図3 B-B' 断面図 図4 人工気象室概要(断面)

流率測定は、改修事例と室内実験の計測条件(室内外温度)を統一して行うこととしたため、日本工業規格や(財)ペタリービングによる測定法とは一部異なるが、これは比較的温暖な地域の冬期の室内外温度を前提としたものである。

2. 室内実験による断熱性能の評価

2.1 実験概要

障子戸(270×468mm)と木製複層ガラスサッシ(空気層4mm)により構成される試験体を1体とし、障子戸の組子幅が16mmと26mmの2体を作製した。障子戸と木製サッシ間の空気層は48mmである。障子戸は上下に格子が2つ並ぶ仕様である(図1,2,3)。試験体は表1に示す3種類を作製した。試験体No.1は障子紙を組子片面に張った一般的な障子戸を想定した仕様である。試験体No.2は幅16mmの組子両面に障子紙を太鼓貼りした仕様で、試験体No.3は幅26mmの組子両面にNo.2と同様に障子紙を太鼓貼りした仕様である。各試験体には、ガラス戸・障子戸の四周に同一の実加工が施されており一定の気密性が同等に確保されている。設置方法は、人工気象室内の外気側と室内側の界壁に見付寸法30mmの試験体を取り付ける枠材を設けたうえで、試験体を上下2段に並べて設置し、外気側と室内側間の界壁と枠材の残余空隙部分にはポリスチレンフォーム(100mm)を充填した(図4)。

室内外温度は、改修事例の計測条件と統一するため室内側温度を25°C、外気側温度を10°Cに設定し、試験体各層の温度が定常状態に達した時点で、障子戸の上下格子各中心点において、試験体各層の表面温度と空気層の空気温度をT型熱電対により計10点測定した^{注1)}。試験体の貫流熱量は、外気側ガラス表面において熱流計(英弘精機株式会社ヒートセンサーMD-140)を用いて測定した(図1,2)。尚、貫流熱量の測定結果を比較したところ、試験体No.2の下側格子の貫

表1 試験体の概要

試験体No.	障子紙の貼り方	空気層(mm)	障子紙の厚さ(mm)
1	一重		0.1(5勾)
2	太鼓貼り	16	0.1(5勾)
3	太鼓貼り	26	0.1(5勾)

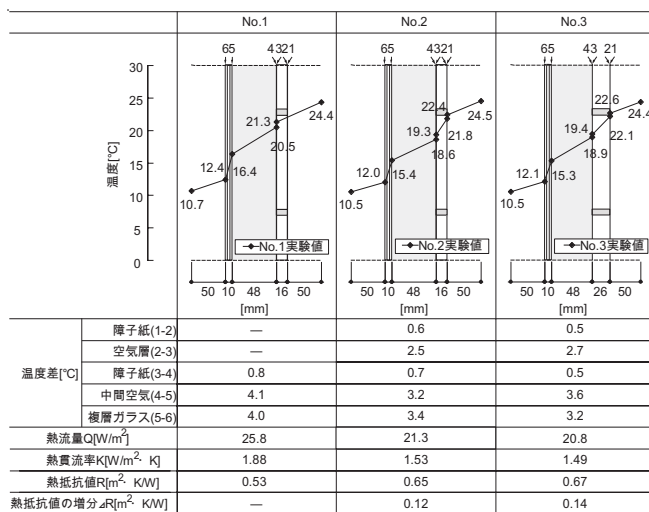


図5 各試験体の実験結果

流熱量が試験体No.3の下側格子の値を若干下回ったため測定不良と判断し、分析には上側格子の計測結果を用いる。

2.2 実験結果

図5に各試験体の実験結果を示す。試験体No.1,2,3の室内側障子表面温度は各々21.3,22.4,22.6°Cで、室内外温度差15°Cの状態、一般的な障子仕様(No.1)に対し太鼓障子仕様(No.2,3)の表面温度が1.1~1.3°C高く、仕様全体としての断熱性能の高さを示しており、試験体No.2,3の空気層の差も表面温度に影響していることがわかる。

次に各層の温度分布を見ると、試験体No.1では、室内側空気に向す障子紙両面(図5:計測点3-4)で0.8°Cの温度差が生じている。また、試験体No.2(as16mm)と試験体No.3(as26mm)では、室内側空気に向す障子紙両面(図5:計測点1-2)で各々0.6°C,0.5°Cの温度差、中間空気に向す障子紙両面(図5:計測点3-4)で各々0.7°C,0.5°Cの温度差が生じており、和紙の熱抵抗値の大きさが認められる。また太鼓障子空気層内部両面(計測点2-3)では各々2.5,2.7°Cと大きな温度差が生じており、太鼓貼りにより形成された密閉空気層による熱抵抗値の大きさが認められるとともに、空気層の幅が熱抵抗の大きさに影響していることが確認できる。

中間空気層(計測点4-5:48mm幅)では、試験体No.1,2,3の温度差は各々4.1,3.2,3.6°Cで、中間空気層が太鼓障子空気層と同等の断熱性能を有することを示しており、ガラスサッシと障子を組み合わせた建具仕様の効果といえる。なお試験体No.1の温度差が試験体No.2,3と比較して相対的に大きいのは、外気側障子紙表面(計測点4)の温度が20.5°Cと試験体No.2,3(18.6,18.9°C)と比較して1.6~1.9°C程度高く、太鼓障子空気層の有無が影響しているためである。

外気に向する複層ガラス層(計測点5-6)の試験体No.1,2,3の温度差は各々4.0,3.4,3.2°Cで、中間空気層同様太鼓障子空気層の有無が温度差に影響している。ここで試験体No.2,3のガラス層の温度差

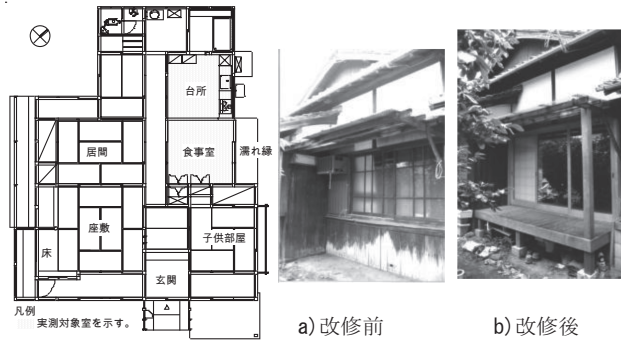


図6 実験住宅の平面図

写真2 改修前後の開口部

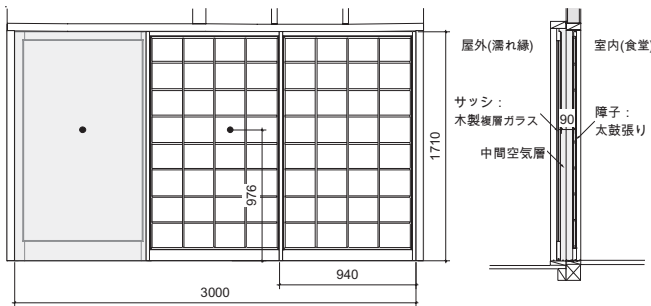


図7 開口部立面図および計測点

図8 開口部断面図

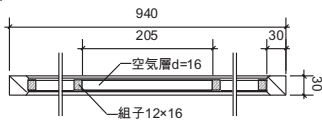


図9 太鼓障子平面図



写真3 計測の様子

(3.4, 3.2°C)と太鼓障子空気層の温度差(2.5, 2.7°C)を比較すると、ガラス層の温度差が0.5~0.9°C大きく、複層ガラスの熱抵抗値が太鼓障子空気層をやや上回る結果となっている。

次に試験体 No.1, 2, 3 の熱流量は各々25.8, 21.3, 20.8 W/m²で、室内外温度差 15°Cの状態では、一般的な障子仕様(No.1)に対し太鼓障子仕様(No.2,3)の熱流量が4.5~5.0 W/m²低く、仕様全体としての断熱性能の高さを示している。各試験体の仕様全体の熱貫流率を比較すると、試験体 No.2, 3 の熱貫流率は各々1.53, 1.49W/m²・Kで、試験体 No.1 の熱貫流率(1.88 W/m²・K)に対し約20%低下しており、障子紙を太鼓貼りにした仕様では断熱性能が向上することが確認された。また、一般的な障子仕様(No.1)に対し太鼓障子仕様(No.2, 3)の表面温度が1.1~1.3°C高いことから、室内の放射熱環境の改善にも一定の効果を有すものと推定される。

3. 伝統民家改修事例の開口部建具と空気層の温度計測

3.1 計測の概要

実験住宅は山口市の中心市街地に位置する木造戸建ての伝統民家である。図6に平面図を示す。外壁は土壁、開口部は大半が単板ガラス嵌め込み木枠建具の典型的伝統民家である。計測対象の食事室各部位の仕様は、壁:漆喰3mm-土壁80mm-漆喰3mm、天井:天井板

表2 計測の概要

計測条件	開口部仕様	計測日	計測時間帯	計測時間[h]	平均室温 [°C]	平均外気温 [°C]
No.1 定常状態	1 G1 複層ガラス T1 太鼓障子戸使用	2007年12月15日	18時~20時	2	25.6	8.2
	2 G2 複層ガラス T2 太鼓障子戸使用	2007年12月16日	1時~3時	2	25.9	8.0
	3 G3 複層ガラス T3 太鼓障子戸使用	2007年12月14日	22時~2時	4	26.7	4.1
No.2 24時間連続	G4 複層ガラス T4 太鼓障子戸使用	2007年12月17日	7時30分~7時30分	24	25.3	5.3

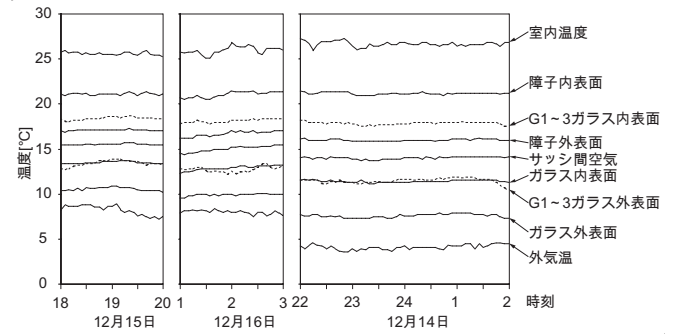


図10 開口部各層の温度変動

9mm, 床:床板30mm-住宅用グラスウール24K70mmである。写真2に改修前後の食事室開口部、図7~9に改修後の開口部立面・断面・平面図を示す。開口部は3,000×1,700mmの枠組みと940×1,710mmの障子戸・木製複層ガラスサッシ(ガラス3mm-空気層4mm-ガラス3mm)から構成される。障子戸の組子幅は16mmで、障子戸と木製サッシ間の空気層は90mmである。計測時の建具の閉鎖状態を図7及び写真3に示す。太鼓障子戸一枚を外し、この状態で太鼓障子の有無の2ケースの同時計測を行った。尚、太鼓障子戸と木製サッシ間の空隙部分にはポリスチレンフォーム(25mm)を充填し密閉空気層を形成している。計測点は障子戸の5段目格子中心位置(床上976mm)に設定し、T型熱電対を用いて試験体各層の表面温度と空気層の空気温度を計7点測定した。

表2に計測の概要を示す。計測条件 No.1 は室温と外気温が定常状態に近い条件で計測を行い、室内実験で得られた断熱性能を実験住宅において検証する条件である。具体的には、冬季3日間の連続計測データから温度変動が少なく(1)平均外気温 8.2°C:平均室温 25.6°C:平均温度差 17.4°C (2)平均外気温 8.0°C:平均室温 25.9°C:平均温度差 17.9°C (3)平均外気温 4.1°C:平均室温 26.7°C:平均温度差 22.6°Cとなる時間帯のデータを抽出した。図10に開口部各層の温度変動を示す。実家屋計測のため若干の変動は見られるが、室温、建具各部の表面温度、空気層温度とも定常状態に近いデータと見做せるものとする。

計測条件 No.2 はファンヒータを使用して室温を出来るだけ定常状態(25.0°C)に保ち24時間連続計測を行い、冬期一日における太鼓障子併用の場合と複層ガラスのみの場合の開口部熱損失量を比較する条件である。計測日は昼間最高気温12°C、夜間最低気温0.8°C、平均気温5.3°Cで、実験住宅が立地する地域の冬季晴天日の標準的データである^{注2)}。尚、貫流熱量は未測定のため、熱貫流率は既定の複層ガラスの熱抵抗(0.106 m²・K/W)を用いて算出した^{注3)}。

3.2 計測結果

(1) 各層の温度分布と熱貫流率・熱抵抗値

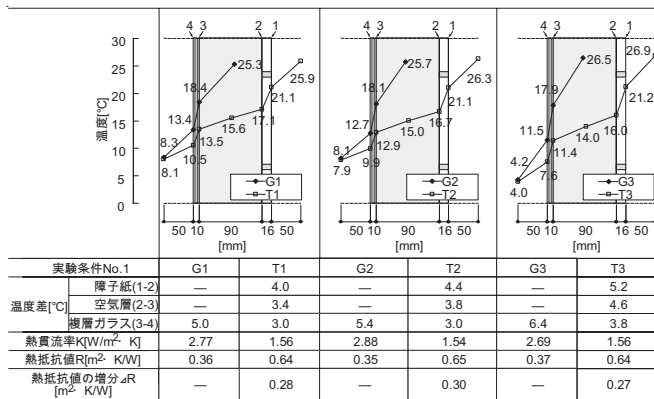


図 11 建具表面と空気層の温度分布

図 11 に定常状態 1~3 の建具表面と空気層の温度分布及び熱貫流率・熱抵抗値を示す。複層ガラスの室内側表面温度(G1, 2, 3 : 測定点 3)は、定常状態 1, 2 の場合各々 18.4, 18.1°Cで、室内外平均温度差が 22.6°Cと大きい定常状態 3 では 17.9°Cと若干低い。これは、G3 の室温が他の条件に比べて 0.8~1.2°C高いが、外気温が 3.9~4.1°C低いことから、貫流熱量が増加したためと考えられる。これに対し太鼓障子+複層ガラスの室内側表面温度(T1, 2, 3 : 計測点 1)は 21.1~21.2°Cの範囲にあり、いずれの条件においても太鼓障子+複層ガラスが複層ガラスよりも 3°C程度高い。これより、太鼓障子の使用による開口部の断熱性能の向上が認められるとともに、冬期暖房室内における放射熱環境の改善にも一定の効果を有すものと推定される。

次に太鼓障子+複層ガラス各部位の温度分布を見ると、太鼓障子空気層(図 11 : 計測点 1-2)の温度差は定常状態 1, 2 では各々 4.0, 4.4°Cで、室内外平均温度差が大きい定常状態 3 では 5.2°Cと大きい値を示す。中間空気層(計測点 2-3:90mm 幅)でも同様に、定常状態 1, 2 では温度差は各々 3.6, 3.8°Cで、定常状態 3 では 4.6°Cを示しているが、空気層の幅が試験体の倍程度広い割に温度差はさほど大きくない。複層ガラス(計測点 3-4)の温度差は、複層ガラスのみの場合(G1, 2, 3)は 5.0~6.4°Cと大きく、太鼓障子を併用した場合(T1, 2, 3)は 3.0~3.8°Cで、太鼓障子と中間空気層の影響が認められる。

次に複層ガラスの熱貫流率は 2.69~2.88 $W/m^2 \cdot K$ の範囲にあり、定常状態 3 の熱貫流率(2.69 $W/m^2 \cdot K$)がやや低い値を示した。太鼓障子+複層ガラスの熱貫流率は 1.54~1.56 $W/m^2 \cdot K$ の範囲にあり類似した値が得られているが、空気層の幅が同一の室内実験試験体 No.2 の熱貫流率(1.53 $W/m^2 \cdot K$)よりもやや高い結果となった。複層ガラスのみの場合に比べ太鼓障子を併用した場合には熱貫流率は 5 割近く低下している。太鼓障子+複層ガラスの熱抵抗値は平均 0.64 $m^2 \cdot K/W$ で、室内実験結果(0.65 $m^2 \cdot K/W$)よりもやや低い、この差異は誤差程度の範囲であり類似した値が得られた。

(2) 冬期一日の開口部熱損失量の比較

図 12 に計測条件 No.2 の冬期一日の各層の温度変動を示す。図中に示した水平面全日射量は下関気象台で観測されたデータであるが、測定対象の開口部は北東に面しており冬期には日射は受けない。気温の上昇に伴い外気側ガラス表面温度が上昇し、外気温が最も高くなる 15 時前後には 14°C近くに達している。16 時 30 分以降は外気温の低下に伴い外気側ガラス表面温度も低下し始め、深夜 24 時以降は 5°C近くまで低下している。これに対し太鼓障子の室内側表面温度

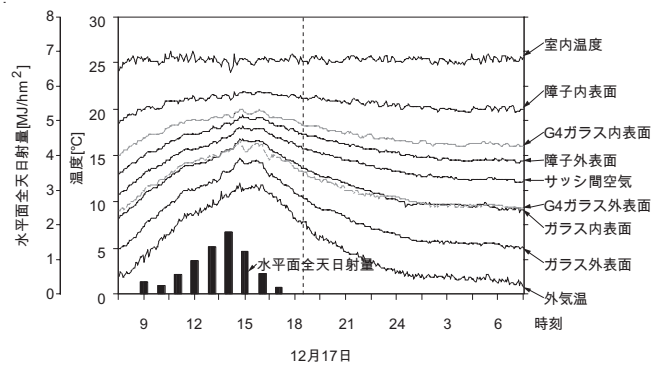
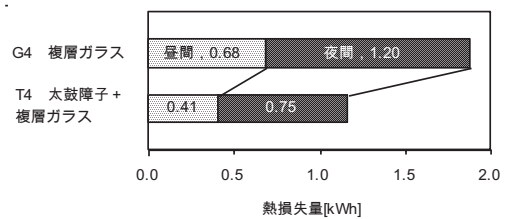


図 12 冬期一日の開口部各層の温度変動



注 昼間 : 7 時 30 分 ~ 18 時 30 分, 夜間 : 18 時 30 分 ~ 7 時 30 分

図 13 冬期一日の開口部熱損失量の比較

は、終日 18~22°Cの範囲に収まり外気温の影響は比較的少ない。

日射がある 7:30~18:30 を昼間、日射がない 18:30~7:30 を夜間とし、複層ガラスの表面温度差と熱コンダクタンスを用いて、窓一枚分の熱損失量を求めた結果を図 13 に示す。夜間に対し相対的に室内温度と外気温の差が小さい昼間の場合、複層ガラスと太鼓障子+複層ガラスの熱損失量は各々 0.68, 0.41kWh(合計 11h)で、熱損失量の差は 0.27kWh である。一方外気温が 7~2°Cに低下する夜間には、複層ガラスと太鼓障子+複層ガラスの熱損失量は各 1.20, 0.75kWh(合計 13h)で、合計 2 時間の差があるものとともに昼間の 1.8 倍の値を示している。ただし両仕様の夜間の熱損失量の差は 0.45kWh となり、昼間に比べその差は拡大しており、また一日の合計では複層ガラスに対し太鼓障子+複層ガラスでは約 4 割熱損失量が低減されていることから、太鼓障子併用による顕著な熱損失量削減効果が認められる。

4. 数値計算による断熱性能の推計

室内実験と改修事例の実測により本仕様の断熱性能を確認できたが、任意の格子形状と幅を有す太鼓障子空気層と中間空気層の熱抵抗を算定出来れば、建具仕様全体の熱抵抗を求めることが可能であり、設計にも適用できるものと考えられる。そこで本章では、太鼓障子と複層ガラスにより構成される建具仕様の数値計算法を示し、室内実験・実家屋計測と数値計算の結果の比較を行いその妥当性を検討し、一般的な開口部断熱仕様と本仕様の熱貫流率の比較を行う。

4.1 数値計算の方法と実験・計測値との比較

密閉空気層の熱抵抗に関しては、建築分野において空気層の幅との関係を検討した研究蓄積があり、斉藤はいくつかの条件下での両者の関係を図に整理しているが⁷⁾、本論で対象とする垂直方向密閉空気層の場合、100mm以上ではほぼ一定の値を取るものの、太鼓障子の標準幅である 10~25mm の範囲では熱抵抗の変動幅が大きく、かつ障子組子により決定される空気層の形状との関係は示されていない。

表3 空気層の伝導対流熱コンダクタンスの計算式

■密閉鉛直平行平板間の流体層における自然対流熱伝達について

(a) $1 \leq b/l \leq 100$ かつ $Gr_l \leq 1400(b/l)^{0.389}$ (熱伝導支配域)

$$Nu_l = 1 + 0.00166(l/b)Gr_l^{0.9} \dots\dots\dots(1)$$

$$C_c = Nu_l \times \lambda/l \dots\dots\dots(2)$$

(b) $500 \leq Ra_l(l/b) \leq 10^7$ (層流境界層支配域)

$$Nu_b = 0.364[Ra_b \cdot f(P_r)]^{1/4} / \phi(Ra_b, b/l) \dots\dots\dots(3)$$

$$C_c = Nu_b \times \lambda/b \dots\dots\dots(4)$$

$$f(P_r) = [1 + (0.5/P_r)^{9/16}]^{-16/9}$$

$$\phi(Ra_b, b/l) = [1 + 0.231\{Ra_b(b/l)^4\}^{-1/4}]^2$$

(c) $10^7 \leq Ra_l(l/b) \leq 10^{11}$ (乱流域)

$$Nu_b = 0.05[Ra_b \cdot f(P_r)]^{1/3} \dots\dots\dots(5)$$

$$C_c = Nu_b \times \lambda/b \dots\dots\dots(6)$$

C_c : 伝導対流熱コンダクタンス[W/m²・°C]

Nu_l : ヌセルト数, Gr_l : グラスホフ数 $Gr_l = g\beta(\theta_h - \theta_c)l^3 / \nu^2$

P_r : プラントル数 $P_r = \mu C_p / \lambda$

Ra_l : レイリー数 $Ra_l = P_r \cdot g\beta(\theta_h - \theta_c)l^3 / \nu^2$ $Ra_b = Ra_l(b/l)^3$

ν : 動粘性係数 $\nu = \mu/\rho$ [m²/s]

μ : 空気の粘性係数 $\mu = 18.2 \times 10^{-6} \frac{293.15+117}{T_m+273.15+117} \left(\frac{T_m+273.15}{293.15}\right)^{3/2}$ [Pa・s]

ρ : 空気の密度 $\rho = 1.293/(1 + 0.00367T_m)$ [kg/m³]

λ : 空気の熱伝導率 $\lambda = 0.000076T_m + 0.0241$ [W/m・K]

C_p : 空気の定圧比熱 $C_p = 0.0625T_m + 1006$ [J/kg・K]

β : 空気の体積膨張係数 $\beta = 1/(T_m + 273.15)$ [1/K]

T_m : 平均温度 $T_m = (\theta_h + \theta_c)/2$

そこで本論では文献 10)と梅干野論文 11)に準拠し、以下の手順により空気層の熱抵抗と太鼓障子+複層ガラス仕様の全熱抵抗を求める。

空気層の伝導対流熱コンダクタンス c_c [W/m²・K]は、表3の空気層の伝導対流熱コンダクタンス計算式に示した式(2, 4, 6)により求められるため、空気層の伝熱量 Q [W/m²]は次式により表せる。

$$Q = C_c(\theta_1 - \theta_2) + \epsilon_{12}\sigma(T_1^4 - T_2^4) \dots\dots\dots(7)$$

c_c : 空気層の伝導対流熱コンダクタンス[W/m²・K]

ϵ_{12} : 平行2平面間有効放射率[-]

σ : シュテファン・ボルツマン常数[5.67×10⁻⁸W/m²・K⁴]

θ_1, θ_2 : 層を挟む面1,2の表面温度[°C]

T_1, T_2 : θ_1, θ_2 の絶対温度表現[K]

従って、太鼓障子空気層の熱抵抗 r_a [m²・K/W]は、

$$c_a = Q/(\theta_a - \theta_b) \dots\dots\dots(8)$$

$$r_a = 1/c_a \dots\dots\dots(9)$$

c_a : 太鼓障子空気層の熱コンダクタンス[W/m²・K]

$\theta_a - \theta_b$: 太鼓障子空気層の表面温度差[°C]

として算出される。同様に中間空気層の熱抵抗 r_b [m²・K/W]は、

$$c_b = Q/(\theta_c - \theta_d) \dots\dots\dots(10)$$

$$r_b = 1/c_b \dots\dots\dots(11)$$

c_b : 中間空気層の熱コンダクタンス[W/m²・K]

$\theta_c - \theta_d$: 中間空気層の表面温度差[°C]

として算出される。これより本仕様の室内から外気への全熱抵抗は次式で表せる。

$$R = r_1 + (2r_1 + r_a) + r_b + r_2 + r_o \dots\dots\dots(12)$$

R : 室内から外気への全熱抵抗[m²・K/W]

表4 数値計算に用いた熱抵抗と熱伝達抵抗

	記号	熱抵抗 r [m ² ・K/W]	熱コンダクタンス c [W/m ² ・K]
障子紙	r ₁	0.001	1100.00
太鼓障子空気層(室内実験as16)	r _a	0.155	6.47
太鼓障子空気層(室内実験as26)		0.163	6.12
太鼓障子空気層(実験住宅as16)		0.154	6.49
室内実験No.1中間空気層(密閉)	r _b	0.171	5.85
室内実験No.2中間空気層(密閉)		0.175	5.71
室内実験No.3中間空気層(密閉)		0.174	5.74
実験住宅中間空気層(密閉)		0.188	5.32
実験住宅中間空気層(半密閉)		0.144	6.96
複層ガラス(g3+as4+g3)	r ₂	0.106	9.41
	記号	熱伝達抵抗 r [m ² ・K/W]	熱伝達率 α [W/m ² ・K]
室内側(室内実験)	r _i	0.111	9.00
室内側(実験住宅)	r _i	0.174	6.00
外気側(室内実験)	r _o	0.111	9.00
外気側(実験住宅) : 計測値		0.087	17.8

注 gはガラスの厚さ, asは空気層の厚さを示す。

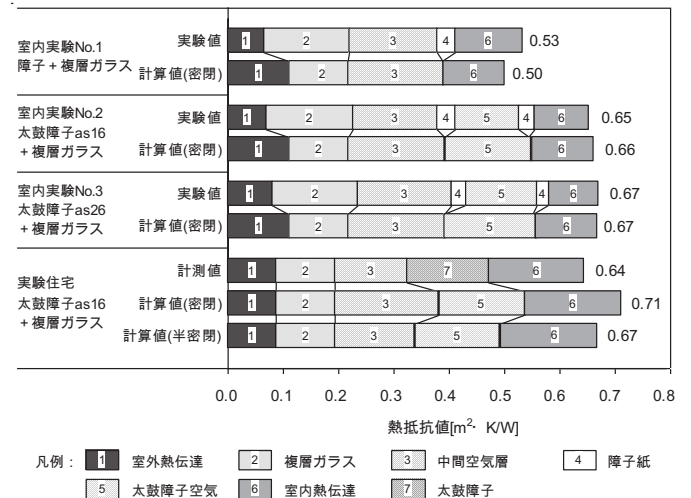


図14 熱抵抗値の実験・計測値と計算値の比較

r_i : 室内側熱伝達抵抗

r₁ : 障子紙の熱抵抗

r_a : 太鼓障子空気層の熱抵抗

r_b : ガラスサッシと太鼓障子の中間空気層の熱抵抗

r₂ : 複層ガラスの熱抵抗

r_o : 外気側熱伝達抵抗

ここで、式(12)中の室内側熱伝達抵抗(r_i)は既往の実験結果をもとにした設計値^{注4)}を採用する。障子紙の熱抵抗(r₁)は本実験に用いた和紙の計測値を用いる^{注5)}。太鼓障子空気層の熱抵抗(r_a)は式(9)、密閉状態を前提とした中間空気層の熱抵抗(r_b)は式(11)により算定する。ただし、中間空気層の場合には建具の密閉度が熱抵抗に影響するため、設計用熱負荷計算では密閉・半密閉・有隙の3種類の設計値があり^{注6)}、半密閉・有隙の場合には低減係数^{注7)}を乗じて求める。ガラスサッシの熱抵抗(r₂)は採用する製品の設計値を用いる^{注8)}。外気側熱伝達抵抗(r_o)は外気の風速に影響されるため、気候条件に応じた風速を定め、強制対流熱伝達率を算出し、放射熱伝達率との合計値の逆数を求める^{注9)}。

以上の方法により、室内実験試験体と実験住宅(測定条件 No.1)のr_iからr_oまでの値を求め(表4)^{注10)}、仕様全体の熱抵抗値を算定した。室内実験値、実験住宅計測値と計算値を図14に示す。室内実験

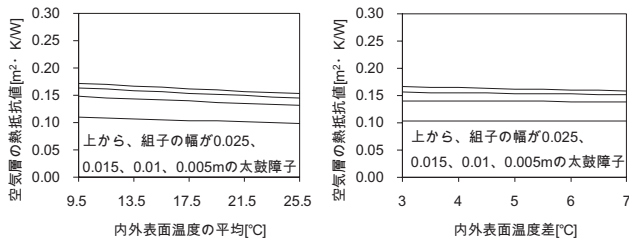


図 15 内外表面温度の平均と熱抵抗値の関係

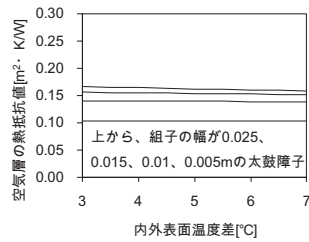


図 16 内外表面温度差と熱抵抗値の関係

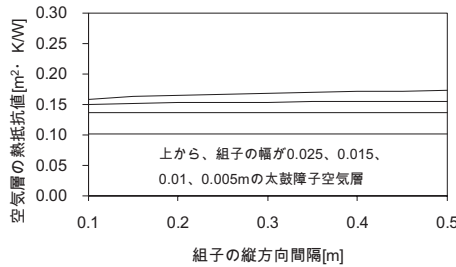


図 17 組子の縦方向間隔と熱抵抗値の関係

試験体 No.1 では、密閉状態の中間空気層を仮定した計算値(密閉: $0.50 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$)は実験値 ($0.53 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$)を若干下回るものの、太鼓障子試験体の No.2, 3 では計算値と実験値はほぼ一致している。また実験住宅の場合、半密閉状態の計算値 ($0.67 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$)は計測値 ($0.64 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$)をやや上回るが誤差は 5%程度で、建具の隙間から生ずる換気による熱損失のため、中間空気層の熱抵抗が低下している状況をほぼ再現できている。以上より、数値計算により密閉・半密閉状態における本仕様の熱抵抗値は推計可能と判断される。しかし設計段階では事前に実験が行なわれ空気層を挟む面の表面温度が得られている場合は稀なため、太鼓障子空気層と中間空気層の熱抵抗を推計する必要がある。

4.2 空気層の熱抵抗の推計

空気層を挟む面の表面温度と表面温度の平均値の変化に対する空気層の熱抵抗の依存度が一定以下であることが確認できれば、室内実験で得られた空気層を挟む面の表面温度を用いて、任意の温度状態の空気層の熱抵抗を推計することが可能となる。そこで、4.1 で示した計算方法により温度条件と熱抵抗との関係を検討する。組子の縦方向間隔を 0.2m に設定し、内外表面温度差を 5°C とし、それらの平均値を $9.5 \sim 25.5^\circ\text{C}$ に変化させた場合の結果を図 15 に示す。内外表面温度の平均値が変化した場合でも熱抵抗値の低下は $0.02 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ に留まる。また、内外表面温度の平均値を 17.5°C に固定し、内外の表面温度差のみを変化させた場合の結果を図 16 に示す。組子幅が厚い方が内外表面温度差による熱抵抗値の変化が大きいが、組子幅が 25 mm でもその温度差が 3°C , 7°C の場合の値の差は $0.009 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ である。これより、太鼓障子内空気層の熱抵抗値は温度条件への依存度が限られるので、室内実験で得られた実験値を用いても、任意の温度条件の空気層の熱抵抗値は概ね推計可能と考えられる。

次に空気層の形状と熱抵抗値との関係については、表 3 の計算式の通り組子の横方向の間隔は流れの支配域に影響しないことが前提

表 5 開口部の熱貫流率算出に用いた熱抵抗と熱伝達抵抗

	記号	窓の熱貫流率 [$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$]	
単板ガラス	K_w	6.51	
複層ガラス($g3 + as4 + g3$)		3.70	
窓に取り付けられる付属品の熱抵抗 [$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$]			
太鼓障子(as16)		0.30	
太鼓障子(as26)		0.31	
障子		0.14	
カーテン		0.10	
	記号	中間空気層の熱抵抗 [$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$]	
中間空気層(as90)	r_b	0.14	
	記号	熱伝達抵抗 r [$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$]	熱伝達率 α [$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$]
室内側	r_i	0.112	8.93
外気側	r_o	0.052	19.2

注 gはガラスの厚さ, asは空気層の厚さを示す。

とされている。そこで標準的な太鼓障子空気層の形状である試験体 No.2 について、空気層を挟む面の表面温度を 21.8°C 及び 19.3°C とし、組子の幅と組子の縦方向間隔を変化させた場合の検討例を図 17 に示す。組子の縦方向間隔が広い程、熱抵抗値は大きくなるものの、例えば組子幅 25 mm では、組子の縦方向間隔が 0.1m から 0.5m に変化した場合の熱抵抗の変化量は $0.01 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ と少ない。このように、障子組子の形状(横・縦方向寸法)による熱抵抗値の差は小さいため、室内実験の形状を援用しても任意形状の空気層の熱抵抗値は概ね推計可能と考えられる。

障子組子と中間空気層の幅に関しては、空気層の幅により流れの支配域と熱抵抗は変動するため、推定パラメータとして導入する必要があるが、温度条件と形状への依存度が限定的である点を考慮すれば、本実験で得られた空気層を挟む面の表面温度を用いて、表 3 に示す方法により式(2, 4, 6)より伝導対流熱コンダクタンスを求め、式(9)より太鼓障子空気層の熱抵抗を算定することが可能である。同様に式(11)より空気層の幅を考慮した中間空気層の熱抵抗を求めることができる。簡略設計法の場合には、以上の手順により空気層の熱抵抗値の算定を行い式(12)に代入すれば、本仕様の全熱抵抗を求めることが出来る。

4.3 開口部の仕様と熱貫流率の関係

表 4 中に示した室内実験や実験住宅の計測条件における室内外側の熱伝達抵抗(室内実験室内側: $0.111 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, 外気側: $0.111 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, 実験住宅室内側: $0.174 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, 外気側: $0.087 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$)を用いて本仕様の全熱抵抗を求めると、日本工業規格(室内側: $0.112 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, 外気側: $0.052 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$)や(財)ベターリビング(室内側: $0.112 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, 外気側: $0.043 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$)の規定と異なるため、これらの規定による結果と比較して断熱性能を高く見積もることが予測され、既存の製品との比較が出来ないため、次の算定方法を検討する。日本工業規格 JIS A 4710¹²⁾の室内側・外気側熱伝達抵抗値を用いて、式(12)を変形して整理すると次式となる。

$$R = (2r_1 + r_a) + r_b + 1/K_w \quad \dots\dots\dots(13)$$

K_w : 窓の熱貫流率 [$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$]

従って、本仕様の熱貫流率 K [$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$]は、次式で求められる。

$$K = 1/(2r_1 + r_a + r_b + 1/K_w) \quad \dots\dots\dots(14)$$

仕様の異なる開口部の断熱性能の比較を行うため、表 5 に示す建具付属物の熱抵抗値^{注 11)}を用いて式(14)により熱貫流率を算定した。

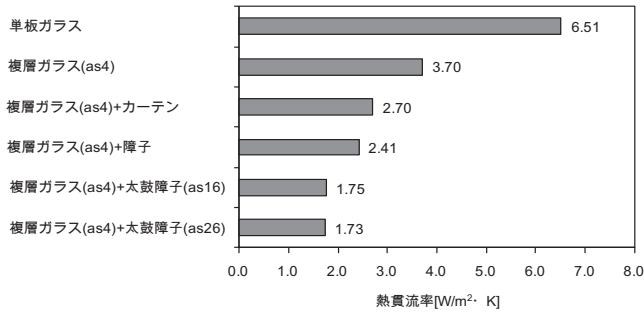


図 18 開口部の仕様と熱貫流率の関係

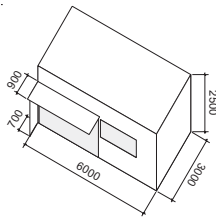


図 19 建築モデル

表 6 建築モデルの物性値

構成材料	熱伝導率 [W/m·K]	容積比熱 [kJ/m³·K]	日射透過率	日射吸収率	長波放射率
天然木材 (桧, 杉)	0.120	519.070	—	0.8	0.9
土壁	0.690	1126.047	—	0.8	0.9
グラスウール 24K	0.038	20.093	—	—	—
窓	熱貫流率 [W/m²·K]	日射遮蔽係数SC	放射遮蔽係数SCR	対流遮蔽係数SCC	
単板ガラス	6.51	1.000	0.986	0.014	
複層ガラス (as4)	3.70	0.898	0.867	0.030	

表 7 計算条件

学会標準問題	暖房 スケジュール(LDK)	室温20°C
年間暖冷房負荷	暖房 終日	室温18°C
	冷房 終日	室温27°C
	湿度 終日	湿度60%
室内発熱(共通)	顕熱を16.7kJ/m²·h、潜熱を4.2kJ/m²·h	
窓の付属物の閉鎖時間帯	気象データにおいて全天日射量がない時間帯	

図 18 に結果を示すが、他の付属物を使用した場合と比べ、太鼓障子+複層ガラスの熱貫流率は最も低く、単板ガラスと比較すると 27%に低下しており、単板ガラスが多い伝統民家の開口部を断熱改修する場合には、本仕様が有効であることが分かる。以上から、開口部建具の仕様を選択し熱貫流率の設計値を与え、4.2 で示した方法により空気層の熱抵抗値を算定すれば、式(14)を用いて仕様全体の熱貫流率の算出や仕様の異なる開口部との断熱性能の比較が容易に行えることから、設計段階での検討手法としても有用と考える。

5. 開口部断熱改修の熱的効果の検討

5.1 シミュレーションの概要

実験住宅の開口部建具と付属物の仕様を変化させた場合の熱的効果を比較検討するため、解析ソフト(SMASH for Windows Ver.2)を使用しシミュレーションを行う。また床・天井・壁の断熱仕様と換気回数をパラメータとして加えた暖冷房負荷量を算定し、断熱改修仕様・換気回数と暖冷房負荷の関係把握する。

図 19 に実験住宅一室(台所・食事室)の単純化建築モデル、表 6 に計算モデルの物性値を示す。建築モデルは床下と小屋裏を想定し室の南・東・西側隣室は等変動室とした。開口部の仕様は(1)単板ガラス(3mm) (2)複層ガラス(as4mm) (3)複層ガラス+カーテン (4)複層ガ

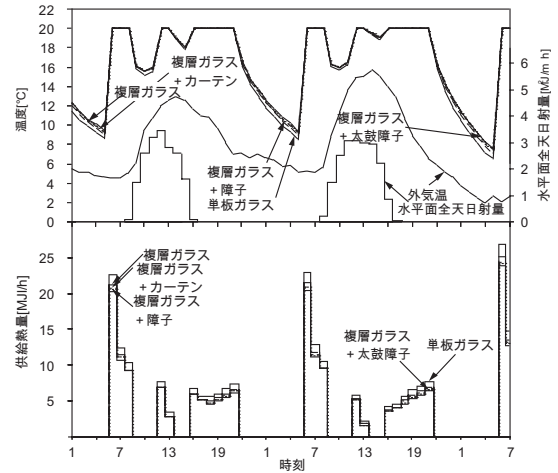


図 20 供給熱量と室温のシミュレーション結果

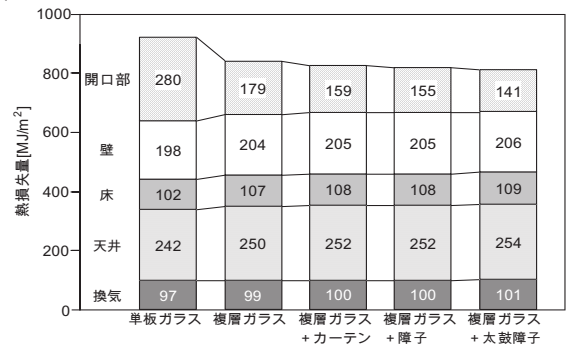


図 21 暖房期(11月3日~4月20日)熱損失量の内訳

ス+障子(5)複層ガラス+太鼓障子の5条件を設けた。床・天井・壁の断熱仕様は(1)伝統民家標準仕様(床板 15mm/土壁 80mm、漆喰 3mm×2/天井板 7mm)、(2)実験住宅現仕様(床板 30mm、グラスウール 24K70mm/土壁 80mm、漆喰 3mm×2/天井板 9mm)、(3)実験住宅天井裏断熱仕様(現仕様+天井裏: グラスウール 24K160mm)、(4)次世代省エネルギー基準(III~V地域)仕様(床板 15mm、グラスウール24K70mm/土壁 80mm、漆喰 3mm×2、グラスウール24K90mm/天井板 7mm、グラスウール24K160mm)の4条件を設けた。換気回数は伝統民家の標準的換気回数を1回/hと設定し^{注12)}、0.75, 0.5回/hも加えた。気象データは次世代省エネルギー基準の地域区分が山口県と同じ福岡のデータ(SMASH 付属)を使用した。

計算条件を表 7 に示すが、(1)供給熱量と室温の比較には学会標準問題の暖房スケジュール¹⁷⁾を適用した。(2)年間暖冷房負荷の計算条件は、暖房は終日設定温度 18°C、冷房は終日設定温度 27°C、湿度 60%とした。両計算とも顕熱(16.7kJ/m²·h)と潜熱(4.2kJ/m²·h)は全床から一様に常時一定量発熱するものと仮定し、建具付属物は全天日射がない時間帯に使用する条件とした。計算期間は1~12月の1年間で、助走計算は12月15日から開始した。

5.2 シミュレーションの結果

(1)供給熱量と室温

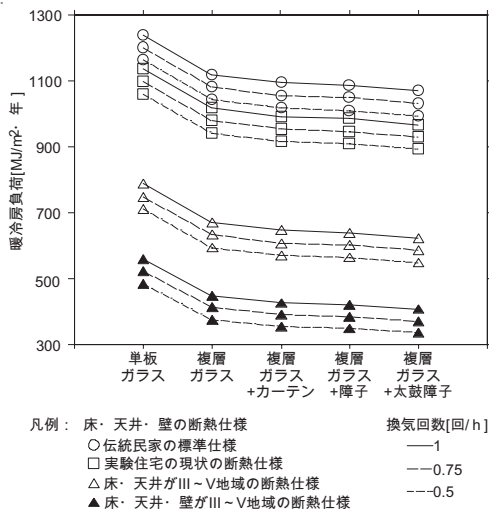


図 22 断熱改修仕様と年間暖冷房負荷の関係

表 8 年間暖冷房負荷の内訳

		単位[MJ/m ² ・年]			
		伝統民家の標準仕様 (換気回数1回/h)	床・天井がIII-V地域の断熱仕様 (換気回数1回/h)	床・天井・壁がIII-V地域の断熱仕様 (換気回数1回/h)	床・天井・壁がIII-V地域の断熱仕様 (換気回数0.5回/h)
単板ガラス	暖房負荷	980 (-)	568 (42%)	361 (63%)	307 (69%)
	冷房負荷	260 (-)	219 (16%)	197 (24%)	175 (32%)
	暖冷房負荷	1240 (-)	787 (37%)	558 (55%)	483 (61%)
複層4mm+太鼓障子	暖房負荷	819 (16%)	408 (58%)	204 (79%)	151 (85%)
	冷房負荷	251 (3%)	215 (17%)	202 (22%)	184 (29%)
	暖冷房負荷	1070 (14%)	623 (50%)	405 (67%)	335 (73%)

注 表中の%表示は、伝統民家の標準仕様で単板ガラスにおける場合の各項目に対する削減率

伝統民家標準仕様の場合の12月20・21日の暖房供給熱量、室温、外気温、日射量を図20に示す。開口部仕様を比較すると、供給熱量は複層ガラス+太鼓障子<障子<カーテン<複層ガラス<単板ガラスの順に低く、太鼓障子では単板ガラスと比較し20%程度低下している。また暖房停止後の早朝5時には室温が0.9~1.0℃程高い。次に暖房期(11月3日~4月20日)の熱損失量の内訳を図21に示す。単板ガラスと複層ガラス+太鼓障子を比較すると、開口部の熱損失量は280MJ/m²から141MJ/m²へ減少し約5割削減できているが^{注13)}、モデル全体としては1割程度の低下に止まる。

(2) 断熱改修仕様と年間暖冷房負荷の関係

床・天井・壁の断熱仕様、換気回数、開口部建具の断熱仕様をパラメータとした年間暖冷房負荷算定結果を図22に示す。伝統民家標準仕様の建具を単板ガラスから複層ガラス+太鼓障子へ改修した場合の暖冷房負荷は、1240MJ/m²・年から1070MJ/m²・年に170MJ/m²・年低減している。床・天井仕様を実験住宅現仕様とした場合は、1136MJ/m²・年(単板ガラス)で104MJ/m²・年低減するが、換気回数0.5回/h、太鼓障子の場合でも891MJ/m²・年と245MJ/m²・年の低減に止まっている。これに対し、III~V地域仕様で床・天井・壁を断熱した場合には、換気回数1.0回/hの負荷は558MJ/m²・年(単板ガラス)、405MJ/m²・年(複層ガラス+太鼓障子)と大幅に低減しており、天井・壁の断熱化が省エネルギー性確保に有効なことがわかる^{注14)}。さらに換気回数0.5回/hの場合、単板ガラスの負荷は483MJ/m²・年であるが、太鼓障子では335MJ/m²・年と148MJ/m²・年低減しており、床・壁・天井の断熱化や気密化を併せて行う必要性が認められる。

次に、年間暖冷房負荷の内訳を表8に示す。開口部仕様が複層ガラス+太鼓障子における各断熱仕様の結果を比較すると、伝統民家標準仕様の場合1070MJ/m²・年で単板ガラス(1240MJ/m²・年)に対して14%が削減され、III~V地域仕様で床・天井・壁を断熱した場合(405MJ/m²・年)では、835MJ/m²・年低減しており削減率は67%と大きい。さらに換気回数を0.5回/hとした場合(335MJ/m²・年)には、905MJ/m²・年低減しており73%削減されることから、床・天井・壁の断熱、気密化および開口部断熱改修を組み合わせた場合の有効性が示される。なお冷房負荷に着目すると、建築モデルの外表面が北東に面し日射量の取得が少ないため、伝統民家標準仕様の単板ガラスの場合には260MJ/m²・年となり、暖房負荷980MJ/m²・年と比較して年間暖冷房負荷に占める割合は小さい。一方複層ガラス+太鼓障子に改修した場合の冷房負荷は9MJ/m²・年低減(削減率3%)しており、若干ではあるが冷房負荷削減効果が認められる。

6. 結論

本論では、太鼓障子と木製複層ガラスサッシによる伝統民家の開口部断熱改修仕様の性能評価を目的に、室内実験と実家屋改修事例の計測及び数値計算とシミュレーションにより、開口部断熱改修の熱的效果を検討した。得られた知見は以下の通りである。

- 1) 室内実験の結果から、室内側障子表面の温度を比較すると、太鼓障子 as26(試験体 No.3)は22.3℃、太鼓障子 as16(試験体 No.2)は21.7℃、普通障子(試験体 No.1)は20.5℃で、試験体 No.3>No.2>No.1の順に断熱性能が高いことが確認された。熱貫流率と熱抵抗値を指標に断熱性能を比較すると、試験体 No.2 と 3 の熱抵抗値は試験体 No.1 の 1.2~1.3 倍となり、熱貫流率は約 20% 低下した。
- 2) 実家屋の改修事例の計測結果より、太鼓障子+複層ガラスの熱貫流率は平均 0.64m²・K/W、太鼓障子仕様の温度差は 3.7~5.2℃、複層ガラスでは 2.8~3.8℃となり、室内実験と同様太鼓障子が断熱性能向上に寄与していることが確認された。また太鼓障子仕様の場合には、複層ガラスのみの場合よりも冬期一日の開口部熱損失量が約 4 割削減されることが確認された。
- 3) 太鼓障子+複層ガラス仕様の熱抵抗及び熱貫流率の簡易推計方法を示し、室内実験・実家屋計測結果と比較した結果、比較的良好な推計結果を得た。また太鼓障子+複層ガラスの熱貫流率は他の付属物を使用した場合と比べて低く、単板ガラスと比較すると 27% まで低下しており、単板ガラスが多い伝統民家の開口部を断熱改修する場合、断熱性能の高い本仕様の有効性が示された。
- 4) 開口部建具、床・壁・天井の断熱仕様及び換気回数をパラメータとしたシミュレーションの結果、建具の供給熱量は太鼓障子<障子<カーテン<複層ガラス<単板ガラスの順に低く、単板ガラスと比較し太鼓障子+複層ガラスでは 20% 程度低下する結果を得た。また太鼓障子+木製複層ガラスサッシ仕様と次世代省エネルギー基準 III~V 地域仕様の床・天井・壁の断熱を行えば、暖冷房負荷を 400MJ/m²・年程度まで低減できることが示された。

以上から、太鼓障子と木製複層ガラスサッシを組み合わせた仕様は、他の付属物を用いた場合に比べ高い断熱性能が得られ、単板ガラスが多い伝統民家の開口部を断熱改修する場合の有効な手法と考えられる。従って、比較的温暖な地域において伝統民家の改修を計画・設計する場合には、本論で示した熱貫流率の算定方法を用いて太鼓障

子やガラスの仕様を検討し、床・天井・壁の断熱化と併せて開口部の断熱改修を行うことにより、暖房エネルギーの削減や冬期の室内空気温度と放射熱環境の改善が期待される。

謝辞

本論をまとめるにあたり、後藤伴延氏(山口大学大学院理工学研究科 講師)には有益な示唆と助言を、また査読者からは丁寧かつ的確な御指摘をいただきました。末尾ながら記して謝意を表します。

注

注 1) 試験体各層の温度が定常状態に達するまでに、試験体 No.1 で 2 時間 15 分、試験体 No.2 で 2 時間 15 分、試験体 No.3 では 2 時間 25 分程度を要した。

注 2) 山口測候所の 30 年間(1971~2000 年)の各月の平均気温と、下関気象台(山口測候所では観測されていないため)の日積算水平面全天日射量を利用し、12 月~2 月の各平均値を算出した結果、平均気温は 5.0°C、日積算水平面全天日射量は 7.7MJ/m² となり、これを本事例が立地する冬季の標準的データとして、計測日の気候条件を標準的と判断した。

注 3) 熱貫流率の算出過程は、まず複層ガラスの熱抵抗 r_2 と複層ガラスの内外表面温度計測値を用いて、開口部の貫流熱量 Q_w [W/m²] を下式より求める。

$$Q_w = c_2(\theta_{g1} - \theta_{g2}) \dots\dots\dots(15)$$

$$c_2 = 1/r_2 \dots\dots\dots(16)$$

c_2 :複層ガラスの熱コンダクタンス[W/m²・K], θ_{g1} :複層ガラスの内表面温度[°C], θ_{g2} :複層ガラスの外表面温度[°C]

熱貫流率 K [W/m²・K]は室内外温度の計測値を用いて次式より求める。

$$K = Q_w/(\theta_i - \theta_o) \dots\dots\dots(17)$$

θ_i :室内温度[°C], θ_o :外気温[°C]

注 4) 設計用熱負荷計算等では、室内側の熱伝達抵抗を 0.111m²・K/W とする実用値が一般に用いられる¹³⁾。

注 5) 障子紙の熱抵抗は、熱線式熱伝導率測定装置(京都電子工業(株) QTM-500)を使用し、室内実験で用いた和紙の熱伝導率を計測した結果、0.001m²・K/W の値を得たため、この計測値を用いる。

注 6) 文献 13) の中空層熱抵抗一覧表において、密閉(工場生産二重ガラス)0.17m²・K/W、半密閉(現場施工二重サッシ)0.13m²・K/W、有隙(ガラスとカーテン・雨戸間の中空層)0.06m²・K/W の実用値が示されている。

注 7) 低減係数は文献 13) をもとに、密閉の場合を 1.0 とし、半密閉の場合を 0.13/0.17=0.76、有隙の場合を 0.06/0.17=0.35 とする。

注 8) JIS では室内・室外側の熱伝達抵抗が規定されており、JIS に基づき算出された複層ガラスの熱貫流率が得られれば、複層ガラスの熱抵抗は算定できる。室内実験の実験値との比較に用いた値は、試験体に使用した複層ガラスメーカーにより¹⁴⁾JIS に基づいて算出された値から算定した。

注 9) 実験住宅の外気側熱伝達抵抗に関しては、建具近傍の外気の風速は未測定のため、気象庁の風速データ(山口市)を使用し、表 2 に示す計測条件 No.1(定常状態)の T1, T2 の計測時間帯の平均風速(2.34m/s)を求め、強制対流熱伝達率(14.9W/m²・K)を算出し、放射熱伝達率(5.1W/m²・K)との合計値から熱伝達抵抗を算定したが、計測値(0.087m²・K/W)と計算値(0.050m²・K/W)の誤差が大きい結果となった。この原因として、実験住宅は中心市街地に立地し、周辺には戸建て住宅や集合住宅が密集しているため、気象庁データよりも風速が遅かったものと考えられる。そこで外気側熱伝達抵抗値には実風速を反映した実測値を代用することとした。

注 10) 室内実験の場合には外気側も空調室内であるから、室内実験の実験値との比較には外気側の熱伝達抵抗として 0.111m²・K/W を用いる。

実験住宅の室内側熱伝達抵抗の計測値は 0.172m²・K/W で、自然対流の作用は小さいと推測されたので、文献 12) を参照して自然対流熱伝達率を 1.15W/m²・K とし、室内側の熱伝達抵抗を算出した。実験住宅の熱抵抗(r_a)は、太鼓障子内側の表面温度が未測定のため、表 2 に示す計測条件 No.1(定常状態)の開口部仕様 T1, T2 の障子紙表面平均温度を用いて算定した。

注 11) 窓に取り付けられる付属物の熱抵抗値のうち、太鼓障子の値は表 4 中の障子紙(2 枚分)、太鼓障子内空気、ガラスサッシと太鼓障子間の空気の半密閉状態の熱抵抗(0.144 m²・K/W)を加算した値である。カーテンについては文献 15) を参照した。

注 12) 文献 16) によれば、土壁住宅 3 棟の気密測定結果から、気密性能と換気回数は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、おおよその見当はつけることができるとし、現況の土壁住宅の換気回数を 0.95 回/時と設定している。そこで本論では伝統民家の標準的換気回数を 1 回/時とする。

注 13) 開口部の断熱性能を向上させると、床・壁からの熱損失量がわずかながら上昇しているが、これは開口部の断熱性能が向上したことにより暖房時間帯以外の室温が高くなり、各部位を伝わる熱量が増加したためと考えられる。

注 14) 天井裏の断熱による冷暖房負荷の低減効果が大きい、これは次世代省エネルギー基準(Ⅲ~Ⅴ地域)仕様における天井断熱材がグラスウール 24K160mm と、床や壁に対して 2 倍以上厚い点が影響している。また壁の断熱による負荷低減効果も大きい、これは 1 室モデルのため平屋建て住宅全体を計算する場合と比較し、床・天井面積に対し相対的に壁の面積率が高いためである。

参考文献

- 1) 羽山広文 他:窓面中空層の熱性状に関する研究(その 1)、日本建築学会北海道支部研究報告集,pp.223-226, 1980.3
- 2) 羽山広文 他:窓面中空層の熱性状に関する研究(その 2)、日本建築学会大会学術講演梗概集,計画系 56(環境工学),pp.699-700, 1981.9
- 3) 倉田雅史 他:窓面中空層の熱性状に関する研究(その 3)、日本建築学会大会学術講演梗概集,計画系 56(環境工学),pp.699-700, 1981.9
- 4) 清水則夫 他:開口部の断熱性能向上に関する研究、日本建築学会関東支部研究報告集,pp.125-128, 1993.3
- 5) 吉川佳江 他:伝統技術を用いた多機能建具に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2 分冊,pp.1207-1208, 2006.9
- 6) [http://homepage2.nifty.com/abee/document/eeda007/B-008\(725\).pdf](http://homepage2.nifty.com/abee/document/eeda007/B-008(725).pdf), 2011 年 12 月 26 日参照
- 7) 斎藤平蔵:建築気候,共立出版,p.7, 1974
- 8) 長岡順吉:防熱材の熱伝導率及び伝熱作用(II),冷凍,第 42 巻,pp.3-33, 1967.6
- 9) 藤井正一 他:空気層の熱抵抗について、日本建築学会関東支部研究報告集,pp.41-44, 1961.6
- 10) 日本機械学会編:伝熱工学資料,改訂第 4 版,丸善, pp.77-78, 1986
- 11) 梅干野 晃 他:アルミ箔による多層空気層の建築部材としての再評価とその熱的特性、日本建築学会計画系論文集, No.475, pp.9-15, 1995.9
- 12) JIS A 4710(建具の断熱性能測定方法)
- 13) 田中俊六 他:最新 建築環境工学,改訂 2 版,株式会社井上書院,pp.180-191,2004
- 14) <http://catalog.ykkap.co.jp/webcatalog/index.aspx>, 2011 年 12 月 26 日参照
- 15) (財)住宅・建築 省エネルギー機構:次世代省エネルギー基準セミナーテキスト,1999.4
- 16) 水沼 信他 6 名: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、日本建築学会環境系論文集, No.624, pp.175-182, 2008.02
- 17) (財)建築環境・省エネルギー機構: SMASH for Windows Ver.2 ユーザーマニュアル,2000.9

(2011年7月8日原稿受理, 2011年12月22日採用決定)