

スギの無垢材を内装に用いた室内空間における 人滞在時の吸湿作用の検証

清水邦義^{*1}, 本傳晃義^{*1}, 奥田 拓^{*1}, 羽賀栄理子^{*1}, 中島大輔^{*1}, 鷲岡ゆき^{*1},
松本 清^{*1}, 山本 篤^{*1}, 吉村友里^{*1}, 井隼経子^{*1}, 渡邊雄一郎^{*2}, 安心院剛^{*2},
安成信次^{*3}, 山田祐樹^{*4}, 永野 純^{*4}, 岡本 剛^{*4}, 石川洋哉^{*5},
大貫宏一郎^{*6}, 藤本登留^{*1}

Verification of Moisture-absorption Performance of a Room Using a Naturally Processed Sugi (*Cryptomeria japonica*) Wood Boards as Interior Materials While a Human is Staying

Kuniyoshi SHIMIZU^{*1}, Akiyoshi HONDEN^{*1}, Taku OKUDA^{*1}, Eriko HAGA^{*1}, Taisuke NAKASHIMA^{*1},
Yuki WASHIOKA^{*1}, Sayaka MATSUMOTO^{*1}, Atsushi YAMAMOTO^{*1}, Yuri YOSHIMURA^{*1}, Keiko IHAYA^{*1},
Yuichiro WATANABE^{*2}, Tsuyoshi AJIMI^{*2}, Shinji YASUNARI^{*3}, Yuki YAMADA^{*4}, Jun NAGANO^{*4},
Tsuyoshi OKAMOTO^{*4}, Hiroya ISHIKAWA^{*5}, Koichiro ONUKI^{*6}, Noboru FUJIMOTO^{*1}

^{*1} Faculty of Agriculture, Kyushu University, ^{*2} Try Wood Corporation, ^{*3} YASUNARI Builder,
^{*4} Faculty of Arts and Science, Kyushu University,
^{*5} International College of Arts and Sciences, Fukuoka Women's University,
^{*6} Faculty of Humanity-Oriented Science and Engineering, Kindai University

This study focused on the humidity-control performance of the wooden dwelling spaces, which is related to the habitability. To evaluate the moisture-absorption performance in a condition close to real life, the room temperature and relative humidity were measured in a room using naturally processed sugi (*Cryptomeria japonica*) wood boards (Room A) and a room using chemically processed wood materials (Room B) as interior materials while subjects were asleep. The interior materials of Room A were free from chemical processing and those of Room B were comprised of bonded or coated woods. The results obtained from this study during 2014 and 2015 demonstrated that the Room A showed higher moisture-absorption performance than the Room B.

1. 緒言

日本において、木造住宅は古来より好まれ、木造建築に取り組む大工・工務店の間では、「木材は人との相性がよい」、「無垢材を用いた家ではよく眠れる」など、居住性において優れている点が経験的に認識されている。また、木材の持つ居住の特性が優れていることを科学的に明らかにする

^{*1} 九州大学農学研究院

^{*2} 株式会社 トライウッド

^{*3} 株式会社 安成工務店

^{*4} 九州大学基幹教育院

^{*5} 福岡女子大学 国際文理学部

^{*6} 近畿大学産業理工学部

Corresponding author : K. SHIMIZU

取り組みも進んでいる¹⁾。実際に、一般的な木造住宅では、建材である木材が吸放湿性を有するため、相対湿度（以下、湿度とする）の変化が比較的小さいことが知られている²⁾。このような、室内の湿度を一定に保つ作用を調湿作用と呼ぶ。

人が快適と感じる気候は一定の温湿度範囲に収まっており、夏では20℃ 70%、22℃ 40%、27.5℃ 40%を結ぶ範囲、春・秋・冬では18℃ 70%、19℃ 40%、26℃ 40%、24℃ 70%を結ぶ範囲内にあると言われている³⁾。これらを踏まえると、木造住宅が持つ調湿作用により、室内の湿度が一定の範囲内に保たれることは、住環境の快適性に寄与する一因であると考えられる。

さらに、湿度は、材料の耐久性にも関係があることが知られている。住宅内の湿度の変動が極端に大きい場合は、住宅材が収縮と膨張を繰り返すため、家財道具類の保存の観点などからも好ましくない³⁾とされる。

また、調湿作用により、ハウスダストの原因となるダニや浮遊菌の増殖を抑える効果も期待できる。ダニの繁殖性は、湿度の影響を強く受けることが報告されており、湿度が70%程度ではダニは増加し、60%程度まで低下すると生息数が低下することが示されている⁴⁾。浮遊菌は、80%程度の高湿度や20%程度の低湿度環境では2時間以上生存を続けるが、50%程度の中間的な湿度において、数分以内に大半が死滅することが示されている⁵⁾。居住性に関わるハウスダストの抑制という観点においても、湿度をある一定の範囲内に保つ調湿作用は有用である。

以上より、木造住宅が有する調湿作用は、住空間の快適性、すなわち居住性に関与すると考えられる。

木材が有する調湿作用については、数多くの調査が報告されているが^{2),3),6),7)}、その多くが人不在の空間内で測定されている。在室者がいるRC造の空間では、発汗や不感蒸泄によって、人不在の場合より湿度が高いことが報告されている⁸⁾。したがって、在室者の発汗や不感蒸泄が認められる不安定な環境下においても、木質空間が湿度の上昇を抑制する吸湿作用が明確に観察されるかの検証が必要であろう。人が住んでいる空間の調湿

作用を調査している例も存在するが、比較する居住空間の内装や建材だけでなく、構造や換気、エアコンの使用といった条件もさまざまに異なるものであり⁸⁾、内装材の吸湿作用について論ずることは困難であった。そこで、本研究では、内装のみが異なる2種の建物、すなわち無垢材を内装に使用した建物および表面を塗装やビニールクロスで覆った内装を使用した建物を建設し、人滞在時の温度および湿度の変化を測定することで、異なる内装材の吸湿作用を比較検討した。

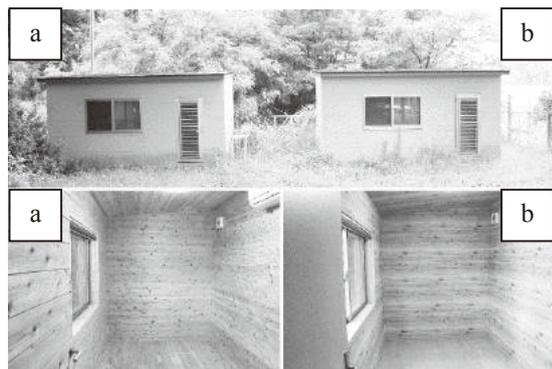
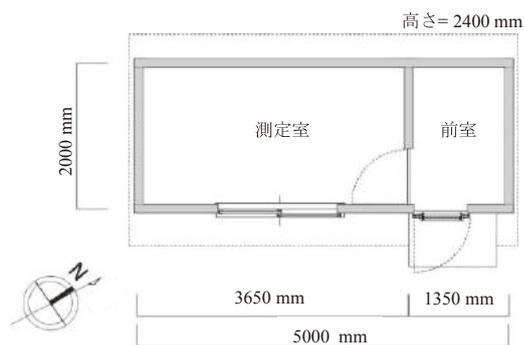
2. 実験

2.1 実験棟（試験体）

九州大学箱崎キャンパス内に2種の実験棟を建設（2012年10月建設）し、人滞在時の温度および湿度を記録することで、内装の異なる木質空間の温湿度の差異について調査した。実験棟として、無垢材（津江杉：大分県日田市上津江産）を内装に使用した建物（以下、A棟とする）と、塗装やビニールクロスで覆われた内装を使用した建物（以下、B棟とする）を用いた。

A棟には、約50～60℃で乾燥させたスギ板を内装として、床（床材、厚さ：15 mm）、壁および天井（壁天井化粧材、厚さ：12 mm）に用いた。一方、B棟において、床には基材として特殊中密度繊維板を用い、表面にUV塗装した床材料（厚さ：6 mm）を用いた。壁には、下地としてパーティクルボード（厚さ：12.5 mm）を使用し、表面に木目調のビニールクロスを使用した。天井には、壁と同様に下地としてパーティクルボード（厚さ：9.5 mm）を使用し、表面に木目調のビニールクロスを使用した。B棟の内装には、すべてホルムアルデヒド放散量性能区分がF☆☆☆☆（JIS規格）のものを使用した。土台・柱・梁・桁については、A棟では約120℃のドライグセットをかけた後、50℃～60℃で減圧乾燥したスギ材を使用し、B棟では高温乾燥したスギ材を使用した。

実験棟の間取り図および外観・内装の様子を第1図に示した。それぞれの実験棟において、内装は異なるが、外観や間取りは同様とした。開口部は、出入り口（1750 mm×700 mm）、前室と測定室間の扉（2000 mm×700 mm）、測定室内の



第1図 九州大学に建設した実験棟の平面図および写真(a: A棟, b: B棟)

窓(1650 mm×900 mm)の3か所であり、測定室内には換気扇(FY-08PFE8D: Panasonic)が設置されていた。気密度測定の結果、A棟およびB棟の相当隙間面積(C値)はそれぞれ2.3 cm²/m²および2.4 cm²/m²であり、同様の値を示した。

2.2 人滞在時の居住空間の温度・湿度調査

2.2.1 実験期間および実験参加者

2014年から2015年にかけて、大学生および中年の実験参加者を対象に計4回の実験を実施した。それぞれの実験期間は2014年5月～6月(梅雨季)、2015年1月～2月(冬季)、2015年2月～3月(春季)、2015年6月～7月(梅雨季)とした。各実験における実験期間および実験参加者を第1表にまとめた。すべての実験は九州大学大学院農学研究院等倫理委員会の承認(2012年11月21日、承認番号21および2015年6月26日承認、承認番号34)を得て行った。また、実験参加者には事前に実験に関する説明会を実施し、同意書にてインフォームドコンセントを得た上で実験を行った。

第1表 実験期間および実験参加者の概要

実験期間	季節	人数	年齢	区分
2014年 5月～6月	梅雨	10	18～22	大学生 (男性)
2015年 1月～2月	冬季	16	18～22	大学生 (女性)
2015年 2月～3月	春季	10	50～65	中高年 (女性)
2015年 6月～7月	梅雨	10	18～22	大学生 (女性)

2.2.2 実験手順

実験参加者は実験期間中の夜間に計2回実験に参加した。実験参加者は指定された日に、A棟およびB棟でそれぞれ1回ずつ睡眠を取った。睡眠中の室内の温度および湿度を記録した。各日の実験参加者の実質拘束時間は約10時間であった。

実験に関する注意事項の説明が終わると、実験者は各実験棟から退室し、実験参加者に23時前後から翌朝7時前後までのおよそ8時間睡眠をとるように教示した。睡眠時間中の室内および屋外の温度および湿度は、データロガー(TR-72 Ui: ティアンドデイ)を用いて、1分毎に記録した。1つの実験棟で1日に実施する実験の参加者は1名のみとし、すべての実験において、A棟とB棟で睡眠する順番はカウンターバランスを取って行った。

実験の開始前にエアコンおよび加湿器を用いて、実験参加者入室時の室内温度および湿度を調整した。季節に合わせ、温度は18～20℃程度、湿度は60～70%程度とし、両棟で同等になるようにそれぞれ設定した。人滞在時の各実験棟における吸湿作用を調査するため、実験中はエアコン、調湿器、換気扇は使用せず、原則として扉や窓の開閉も行わないことで、外的影響を極力除いた。実験参加者の水分補給や排泄のため、実験中に扉を開けて出入りすることもあったが、温湿度の変化に大きな影響は認められなかった。また、空気質の悪化を防ぐため、適宜、実験時間外に換気を行った。なお、起床直後の二酸化炭素濃度は、事務所衛生基準規則で基準として定められている0.5%以下であった。

2.3 統計解析

本研究におけるすべてのデータに関して、比較対毎のKolmogorov-Smirnov test および Bartlett's test にて、それぞれ正規性および等分散性を確認した。その結果、一部の比較対でしか正規性と等分散性が確認できなかった。そこで、本研究の推測統計にはノンパラメトリック検定を採用した。

室内温度および室内湿度は、就寝時から起床時まで、1分毎に記録した8時間のデータすべてから、被験者毎の平均値を算出した。算出した平均値から、同じ実験条件毎に中央値を求めた。同実験期間内におけるA棟およびB棟との間に温度差および湿度差が認められるか確認するため、温湿度の値をWilcoxon signed rank test (exact 法) で対比較し、Bonferroni 法にて p 値を補正した。

室内湿度については、1分毎に記録した8時間のデータを1時間毎に区切り、8つの時間帯で、それぞれ被験者毎に平均値を算出した。算出した平均値から、同じ実験条件毎に中央値を求めた。1時間毎の実験棟間の中央値をWilcoxon signed rank test (exact 法) で対比較し、Bonferroni 法にて p 値を補正した。同様に8つの時間帯における経時的変化の差は、実験時期毎に各実験棟に分けてFriedman test を用い、時間帯の主効果を検討した。Friedman test にて有意な主効果があった経時的変化に対しては、さらに下位検定としてWilcoxon signed rank test (exact 法) による多重比較を行い、Bonferroni 法にて p 値を補正した。

すべての統計解析には R ver.3.3.0⁹⁾ を用い、外れ値を除外せずに行った。

3. 結果

3.1 温度

全4実験の室内温度について、1分毎に記録した8時間すべてのデータから、被験者毎に平均値を算出し、算出した平均値から同じ実験条件毎に中央値を算出した。各実験条件における室内温度の中央値について、2014年5月～6月ではA棟：22.14℃・B棟：22.07℃、2015年1月～2月ではA棟：14.63℃・B棟：14.53℃、2015年2月～3月ではA棟：13.91℃・B棟：13.12℃、2015年6月～

7月ではA棟：23.53℃・B棟：23.73℃であった。

すべての実験期間において、実験棟間で室内温度に差は認められず、室外温度についても同様に両棟間で有意な差は認められなかった。

3.2 湿度

全4実験の室内湿度について、1分毎に記録した8時間すべてのデータから、被験者毎に平均値を算出し、算出した平均値から同じ実験条件毎に求めた中央値を第2表にまとめた。また、箱ひげ図を用いて、室内湿度の経時的変化を第2図に示した。箱の下辺および上辺は、それぞれ第1四分位数および第3四分位数を示し、箱の中の横線は中央値を表す。第1四分位数より四分位範囲の1.5倍以上小さい値、第3四分位数より四分位範囲の1.5倍以上大きい値を外れ値とし、図中に示した。箱の外に描かれたひげは、外れ値を省いた最大値および最小値を表す。睡眠をとるように教示したおよそ23時前後から1時間経過時点までの値を x 軸 1.0 の値として、次の時間帯以降の1時間を 2.0 以降に表した。

各実験条件における室外湿度の中央値について、2014年5月～6月ではA棟で83.54%・B棟：78.18%、2015年1月～2月ではA棟：76.70%・B棟：72.86%、2015年2月～3月ではA棟：68.16%・B棟：66.96%、2015年6月～7月ではA棟：92.95%・B棟：89.83%であった。実験棟間で室外湿度には差が認められず、以下では室内

第2表 各条件における室内相対湿度 (%) の中央値および 95%信頼区間ならびに p 値

実験期間	実験棟	中央値	中央値の 95% 信頼区間	調整された p 値
2014年 5月～6月	A棟	72.79	70.87～74.72	0.0117*
	B棟	85.23	83.08～87.38	
2015年 1月～2月	A棟	72.11	71.09～73.13	0.00128**
	B棟	80.79	77.54～84.03	
2015年 2月～3月	A棟	68.01	66.79～69.23	0.0117*
	B棟	87.88	81.81～93.94	
2015年 6月～7月	A棟	77.88	76.66～79.10	0.0234*
	B棟	90.36	87.44～93.27	

p 値は、Bonferroni 補正した Wilcoxon signed rank test (exact 法) の結果を示す。アスタリスクは、実験棟間の有意差を示す (* p <0.05, ** p <0.01)。A棟での湿度はB棟と比較して、常に低いことが明らかとなった。

湿度についてのみ言及する。

2014年5月～6月に実施した実験では、実験棟間による湿度に有意な差が認められた ($p < 0.05$, 第2表)。経時的変化については、両棟において有意に湿度が上昇していた ($p < 0.05$)。時間帯毎に両棟間で比較したところ、経過時間にかかわらず有意な差が認められ、B棟よりA棟で湿度が有意に低く保たれた ($p < 0.05$, 第2図a)。

2015年1月～2月に実施した実験では、湿度はA棟が有意に低い結果となった ($p < 0.01$, 第2表)。また、B棟では徐々に湿度が上昇したのに比べ ($p < 0.05$)、A棟では有意な経時的変化は認められなかった。時間帯毎に両棟間で比較したところ有意な差が認められ、睡眠開始の教示から3時間経過後以降はB棟よりA棟で湿度が有意に低く保たれた (3時間時点; $p < 0.05$, 4時間時点; $p < 0.01$, 5時間時点以降; $p < 0.001$, 第2図b)。

2015年2月～3月に実施した実験では、湿度はA棟が有意に低い結果となった ($p < 0.05$, 第2表)。経時的変化については、B棟では徐々に湿度が上

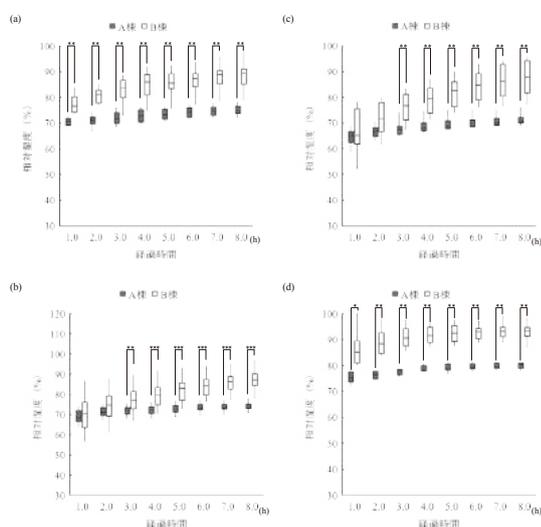
昇したのに比べ ($p < 0.05$)、A棟では有意な経時的変化は認められなかった。時間帯毎に両棟間で比較したところ有意な差が認められ、睡眠開始の教示から3時間経過後以降はB棟よりA棟で湿度が有意に低く保たれた ($p < 0.05$, 第2図c)。

2015年6月～7月に実施した実験では、湿度はA棟が有意に低い結果となった ($p < 0.05$, 第2表)。経時的変化については、B棟では徐々に湿度が上昇したのに比べ ($p < 0.05$)、A棟では有意な経時的変化は認められなかった。時間帯毎に両棟間で比較したところ有意な差が認められ、睡眠開始の教示から3時間経過後以降はB棟よりA棟で湿度が有意に低く保たれた ($p < 0.05$, 第2図d)。

4. 考察

本研究で実施したすべての実験における室内湿度について、実験棟間で有意な差は認められなかった。本実験で使用した内装材の違いは、湿度に影響を与えなかったと考えられる。

人の滞在時におけるA棟およびB棟の室内湿度の差異については、2014年5月～6月では時間帯に関わらず、A棟の湿度がB棟より有意に低いことが示された (第2図a)。外気の湿度が高い梅雨季においては、調湿機器の使用を中止すると、B棟では容易に湿度が上昇するが、A棟では木材の吸湿作用が働き、湿度の上昇が抑制された可能性を示唆する。他の3実験でも睡眠開始の教示から3時間時点以降については、A棟の湿度がB棟より有意に低下していた (第2図b～d)。どの季節においてもA棟では湿度が小さな範囲内に収まり、B棟では比較的大きな範囲に収まる結果となった (第2図)。これらの結果は、牧・青木 (2006)⁸⁾ の報告と同様、人滞在時において、無垢材を内装に使用した空間の吸湿作用を支持するものである。一方、木質系の空間でも、ビニールクロスを内装に使用した空間においては、無垢材を内装に使用した空間と比較すると、吸湿作用が小さいことが明らかとなった。さらに、本研究では、空間の構造や立地条件、換気状況、エアコンの使用条件などの外的要因を統制しているため、吸湿作用の有無は、内装材の差異に由来していると考えられる。



第2図 A棟およびB棟の室内相対湿度の経時変化 (a: 2014年5月～6月, b: 2015年1月～2月, c: 2015年2月～3月, d: 2015年6月～7月)
 各箱ひげ図の中央線は中央値を示し、下端および上端はそれぞれ第1四分位および第3四分位を示す。ひげの下端および上端はそれぞれ最小値および最大値を示す。アスタリスクは、Bonferroni補正したWilcoxon signed rank test (exact法)により、A棟およびB棟間に有意差が認められたことを示す (* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$)。A棟における相対湿度は、B棟よりも常に低かった。

住宅の調湿作用は、内装材料の吸放湿量・吸放湿速度・表面積に大きく依存すると考えられている⁵⁾。木材は多孔質材料であり、その成分であるセルロースやヘミセルロースは多数のヒドロキシ基を有するため、水分子が吸着しやすい特性を持つ。木材の水分保持能力は、空気中の水分保持能力と比較して著しく大きいため、木材中からの水分の出入りにより住宅空間の湿度を適度にコントロールすることが可能となろう。この調湿作用のメカニズムは、木材の平衡含水率によって部分的に説明が可能である。平衡含水率とは、木材の含水率が環境の蒸気圧と釣り合い、一定となった値を指す。木材の含水率は環境の温度および蒸気圧によって決定されるため、物理・化学的な材質の大きな変化がない限り、平衡含水率は樹種には大きく影響しないと考えられている⁹⁾。したがって、本実験で使用したスギ材以外の無垢材でも、同様の結果が期待できるものと考えられる。

一方、ビニールクロスを内装に使用しているB棟では、一連の実験をとおして、人滞在時の湿度がA棟と比較して高くなりやすいことが明らかとなった。湿気を通しにくいビニールクロスなどを表面に施した建材を使用した居住空間では吸湿量が小さく、平衡含水率も小さいため、高い吸湿作用を発揮しづらい可能性が考えられる¹⁰⁾。

5. 結論

本研究では、人滞在時における室内の温度・湿度を測定することで、スギ無垢材を内装に用いた室内空間における人滞在時の吸湿作用を検討することを試みた。2014年から2015年にかけて人滞在時における温湿度の調査を4回にわたり実施した結果、A棟では、B棟に比べて有意に湿度の上昇が抑制されることが明らかになった。これらの結果から、本実験の条件下では、無垢材を内装に使用した建物は、人の滞在時において高い吸湿作用を有することが明らかとなった。

謝 辞

本研究は、複数年にわたる研究であり、以下の助成を頂いた。年度毎に、林野庁「平成25年度地域材供給倍増事業のうち木造建築物等の健康・省エネ等データ収集支援事業」、平成26年度CLT等新たな製品・技術の開発促進事業のうち住宅等における製品・技術の開発・普及の一層の促進（木造住宅等の健康・省エネ性についての定量化のための調査）事業」、平成27年度CLT等新たな製品・技術の開発・普及事業（木造建築物等の健康・省エネ性等データ整備のうち木造建築物の健康・省エネ性等データ収集・分析）」、平成28年度都市の木質化等に向けた新たな製品・技術の開発・普及委託事業」の助成を受けて実施された。ここに深く謝意を表す。

文 献

- 1) 増田 稔：木材学会誌, 51, 22-24 (2005)
- 2) 大釜敏正, 則元 京, 小原次郎：木材研究資料, 28, 48-58 (1992)
- 3) 則元 京, 山田 正：木材研究資料, 11, 17-35 (1979)
- 4) 西垣康広, 安藤敏弘, 村田明宏：木質住環境の快適性評価に関する研究(第1報)ダニの繁殖性実験. 岐阜県生活技術研究所研究報告 10, 31-34 (2008)
- 5) 斉藤平蔵：建築気候, 共立出版, 東京, 181-182 (1974)
- 6) 牧 福美, 則元 京, 山田 正：木材研究資料, 14, 77-86 (1979)
- 7) 牧 福美, 則元 京, 山田 正：木材研究資料, 21, 87-95 (1985)
- 8) 牧 福美, 青木 務：木材学会誌, 52 (1), 37-43 (2006)
- 9) Ihaka, R., R. Gentleman : J. Comp. Graph. Stat., 5, 299-314 (1996)
- 10) 則元 京, 山田 正：木材工業, 29 (7), 301-305 (1974)

(2018. 3. 22 受理)