木材と感性

5. 温湿環境と木材[†]

葉石 猛夫* 則元 京**

Sensory and Emotional Characteristics of Wood V: Temperature-Humidity Environment and Wood

by

Takeo HAISHI* and Misato NORIMOTO**

Key words: Wood, Wooden house, Thermal characteristic of wood, Room temperature, Relative humidity, Humidity conditions

1 はじめに

木材は、人にやさしく、温かみのある材料として知られている。また、古くて新しい材料とも言われている。

“温かい”は、鉄やコンクリートなどと違って触ってもヒヤッとせず、手触りも程よく、色彩も暖色系であることから受ける印象であろう。

ところで、木材の特徴は、一つか二つの特に突出した性質に依存した材料ではないこと、そして他材料と比べたとき、木材のもつ個々の性質は中位か中の上の数値を示すことが多い、ということと言い表せる。

しかし、個々は中庸ではあってもその組み合わせの非凡さ、またはバランスの良さが木材の“特有”の性質である、と表現した方がもっと適切であろう。

一方、近代科学技術によって産み出された多くの物質や材料が持ち得ない、生物素材ならではの性質を木材が持っているという、そのことへの関心が“新しい”という評価につながっていると考えられる。

しかし、突出した性質はないと言っても、木材という材料の個性をアピールする性質はいくつか存在する。その一つが、木材の“温湿度”に対する性質である。

これらを述べるに当たっては、紙数に限りがあるので焦点を絞り、温度環境は葉石、湿度環境は則元が担当することとした。

2 温度環境と木材

2・1 木材の温熱的性質

まず、組み合わせのよさの一例として、諸性質の中ではかなり高位にランクされる木材の熱絶縁性と、構造用途材でありながら密度は $0.35 \sim 0.65 \text{g/cm}^3$ 程度と軽量であること、したがって密度で強度値を除いたときの比強度値は鋼材などの数値を上回る、ということが挙げられる。材料としての強度と熱絶縁性という二つながら優れた性質を合わせもつ材料は極めて希な存在である、といっ

この特性を活かした好例が南極昭和基地の管理棟である(図1, 2)^{1), 7)}。外見は、鈍い色を放つ近代的な建物で鉄骨造を思わせるが、1階を除き、2, 3階が木造、正確には、2cm 厚以上の板を積層接着した大断面の集成材構造からなる木質構造である。集成材を骨格に使ったのは、内外温度差が最大 65℃差という大きな温度差からくる熱(冷)橋(ヒートブリッジ)現象を防ぐためである。しかし、それだけの目的でないことは、本講座を通読された読者は理解して頂けるであろう。

木材の優れた性質の一つである熱絶縁性、すなわち熱伝導率が低いことであるが、これを他材料と比較すると(図3)²⁾ スギの熱伝導率は $0.09 \text{W/m} \cdot \text{K}$ 程度であり、熱絶縁材料のグループに含まれる。スギはコンクリートの約 10~12 分の 1、鋼の 500~600 分の 1 しか熱を伝えない材料である。住宅など構造体では熱を伝えにくい材料の方が有用であることは言うまでもない。

もちろん、ウレタンフォームやスチロフォームなど熱絶縁専用の材料にはかなわないが、木材は柱やはりなど力を受け持つ構造材としての役割も果たしている点が一

図1 南極昭和基地管理棟外観¹⁾

[†] 原稿受理 平成9年3月7日 Received Mar. 7, 1997

* 農林水産省森林総合研究所 〒305 茨城県稲敷郡基崎町松の里, Forestry and Forest Products Res. Inst., Tsukuba, Ibaraki, 305

** 正会員 京都大学木質科学研究所 〒611 宇治市五ヶ庄, Wood Res. Inst., Kyoto Univ., Gokanosho, Uji, 611

般の断熱材とは決定的に違っており、繰り返し強調されてよい点であろう。

木材がこのような断熱材としての性能を備えているのは、図 4³⁾のような細胞構造をもち、空気という一、二を競う最高の断熱材が無数の細胞内腔の中に“封入”されているからである。

2・2 温度と健康

断熱材としての一面をもつ木材を用いた木造住宅は、したがって暖かいはずであるが、実際はそうでない場合が多い。アジアモンスーン気候地帯に属するその気候風土から、住宅は昔から夏向きに作られてきたこと、そのため熱絶縁性が悪いガラス戸や窓などの開口部が多数あって隙間が多い、という構造上の宿命があったからである。図 5 は、脳卒中死亡率と気温の関係を示す⁴⁾ものであるが、地域の住構造、特に住宅内の温度状況を示唆するものとしてよく引用される。北海道は暖房を積極的に行うという地域性、大阪、東京は都市の狭い家という状況が読みとれる。長野県や他県からは、暖房がいき届か

ない広い家屋敷での生活、そしてコールドショックの存在が指摘される。

なお、木造の名誉のため付け加えれば、近年、北海道以外でも十分に暖かい住宅が出現していることを言い添えておく。平均的断熱水準の木造住宅の“暖房中の部屋”は十分暖かいのである。問題視しているのは、暖房された部屋とそうでない部屋、廊下、トイレとの温度差、そして暖房を切った後の早朝の低温化現象である。

図2 管理棟内部¹⁾

図3 材料の密度と熱伝導率の関係²⁾
(文献2)から引用した図を一部改変)

図4 スギ材の電顕写真図³⁾

図5 脳卒中死亡率と気温の関係⁴⁾

ところで、住生活水準の向上に伴ない冷暖房機器が普及した現今、省エネルギーのための断熱性と気密性の強化が一段と進められている。しかし、その結果、木造でも室内空気汚染という重大な事態を招いている。住宅の性能を改善しようとするとき、卑近な喩えだが、“モグラ叩き”となりやすい。現今の工法は、個別の性能向上に気をとられ、そのバランス性に留意する水準に達していないといつてよい。

2・3 木造住宅の温度環境

木造住宅と対照的なのはコンクリート住宅である。これらの代表的な2種類の住宅の温度環境、とくに暖かさについて住人から聞き比べたとき、木造は寒い、コンクリート造は寒くない、という意外な答えが返ってくる。この原因は、熱容量の少ない木造は暖まりやすいが冷めやすい、熱容量の大きいコンクリート造は暖まりにくい冷めにくい、ということになるのであろう。

木造が寒いという印象は、朝方起きた時の寒さを想い出した体験結果であらう。一方、コンクリート造では、暖房中さほど暖かなくても朝方の冷え込みが小さいので寒くない、という印象をもつと推測される。したがって、木造の居住性、保健性を向上させる上からは、朝方の著しい低温化の防止、および図5で指摘された生活空間での極端な温度差を少なくすることが必要である。

暖房停止後の急速な室温低下を防ぐには、構造躯体の熱容量を増やして蓄熱性を向上させる必要がある。この蓄熱の効果、すなわち保温性を評価するためには、室温の低下速度から判断することになる。外気温が一定の場合の室温低下式は式(1)、(2)で導かれている。⁵⁾

$$W(\theta - \theta_c)dt + Qd\theta = 0 \quad (1)$$

ここで、 W は内外温度差 1°C 当たりの室の熱損失率 ($\text{kcal/hr} \cdot ^\circ\text{C}$)、 Q は室温 1°C 低下時の室から失われる熱量 ($\text{kcal}/^\circ\text{C}$)、 θ は室温 ($^\circ\text{C}$)、 θ_c は外気温 ($^\circ\text{C}$) である。

暖房停止時を $t=0$ 、 $\theta = \theta_0$ とすると、式(1)は式(2)になる。式(2)が外気温一定の時の室温低下式である。

$$\theta = \theta_c + (\theta_0 - \theta_c) \exp(-Wt/Q) \quad (2)$$

しかし、外気温が一定であることは例外的であり、この式は現場測定向きではない。また、通常、外気温は夜半から午前6時～7時までにかけてなだらかに低下することが多い。そこで、外気温を式(3)のように指数関数に近似させる。次に、 f を式(1)に代入して式(4)、(5)とする。

$$f = a \exp(-bt) + c \quad (3)$$

ここで、 f は外気温関数、 a 、 b 、 c は定数である。

式(5)をラプラス変換して整理すると、式(6)に示す外気温低下時の室温低下式が導かれる。

$$(\theta - f)dt + qd\theta = 0 \quad (4)$$

ここで、 q は Q/W (室温変動係数) である。

$$(\theta - a \exp(-bt) - c)dt + qd\theta = 0 \quad (5)$$

$$\theta = c + (\theta_0 - c) \exp(-t/q) + (a/(1-bq)) \quad (6)$$

なお、 q は室温変動率の逆数である。

理論式も必要であるが、実際に人が住む家屋の室温低下から室温変動率が推定できると大変好都合である。そこで、式(4)を式(7)のように展開する。

$$\theta \Delta t - f \Delta t + q \xi_i = 0 \quad (7)$$

Δt をある測定期間、例えば6時間を細かく分割した微小時間とし、その時の温度低下を ξ_i とする。そして、測定期間中の式(7)を全て和すと式(8)が得られる。

$$-\xi = (1/q)S \quad (8)$$

ここで、 ξ は室温低下幅 ($\theta - \theta_0 < 0$ ($^\circ\text{C}$)), S は温度差時間幅 ($^\circ\text{C} \cdot \text{hr}$)、 $1/q$ は室温変動率 (hr^{-1}) である。

式(8)は、室温低下幅 ξ が温度差時間面積 S に対して比例定数 (室温変動率) $1/q$ でもって正比例することを意味している。したがって、図6に示すように、実際の家屋を用いて温度差時間面積と室温低下幅を測定すれば、式(8)の関係から室温変動率を推定できることになる。図中の△印は、50mm厚グラスウール断熱材装着の平均的木造住宅で、FF式石油温風暖房機で通常の暖房を行ったときの室温低下幅、+印は床内に温風の通路を設け、蓄熱用に木毛フレキボードを床下地にして温風を通した“温風床暖房”のときの室温低下幅を示している。

同図によると、在来木造 (W) を一定温度になるように暖房し、午前0時に暖房を止めた6時間後の早朝にお

図6 室温低下幅 ξ と温度差時間面積 S の関係⁶⁾
(比例定数 0.05～0.20 は構造固有の室温変動率)、
△: 通常の暖房、+: 温風床暖房、 W_m : 土塗り
5cm厚壁木造、 W : 在来木造、 C : コンクリート
造、 B : レンガ造

いて、温度差時間面積 S が $100^{\circ}\text{C} \cdot \text{hr}$ 程度のとき、室温は暖房停止直前の室温より 15°C 下がり、コンクリート造の場合は 10°C の低下、レンガ造はわずか 5°C の低下にとどまる、ということを示している。

それに対し、木造でも温風床暖房を行ったとき、コンクリート造とほぼ同等の室温変動率 0.10hr^{-1} 位の保温性を得られることが分かる。

最近、気密性と蓄熱性を上げた木造家屋での実験で、最も保温性が高いとされるレンガ造とほぼ同等の室温変動率 0.05hr^{-1} という“超保温性”木造を実現できることが分かっている。この場合、主構造は集成材で床部にモルタル 30mm を施工したものであるが、通常の木造でも十分可能な工法である。これらの結果から、“木造が最も暖かい”という感想をもたれるための技術的基盤は得られたと言ってよいだろう。

さて、ここでは専ら木造住宅の冬期の温度環境とその性能について述べたが、その熱性能向上は夏期の蒸暑対策にも有効に作用することを念頭においている。すなわち、この一連の研究は、躯体構造において断熱性や蓄熱性を向上させることに重きを置く一方、ややもすると熱ロスをおそれるあまり開口部を減らして密閉化し、通風を殺す構造へつき進んでいる現在の工法に対する菌止めを狙ったものである。つまり、木造住宅の温湿度環境を向上させる上で、開口部を減らすのではなく建具の断熱化を強化する方向にすすむべきだ、と考えるからである。この技術が進歩すれば、日本の気候風土に適した“冬夏並立構法”の実現に近づくことができるのではないだろうか。

3 湿度環境と木材

3・1 木材の湿气的性質

正倉院校倉の宝物がきわめて良好な状態で保存されてきたことは、周知のことである。それは、厳重な管理に依存するところが大きい。一方では、校倉が宝物の保存に適した環境であったためとも考えられる。外気に比べ正倉院校倉における気温の日変化は約 $1/9$ 、相対湿度（以後湿度）のそれは約 $1/10$ になっている。⁸⁾ 校倉の構造的特徴は、三角形断面（正確には六または五角形）の校木を重ねた壁と高い床下にある。校木の収縮膨張によって、校倉には湿気の遮断と通風の機能があるといわれているが、実際には、校木は屋根の重さによって常に圧着されていて、隙間の開閉は認められていない。⁹⁾ さらに、宝物を収納する木製の箱（辛櫃）内では、温度変化が認められるにもかかわらず、湿度の変化はほとんど認められない。したがって、校倉や辛櫃内における良好な調湿作用は、木材の吸放湿特性によって生じていると考えることができる。このことから、木材のような吸放湿性のある材料を豊富に使って内装された住宅では、良好な調湿作用が期待できる。

3・2 湿度と健康¹⁰⁾

快適さに最も影響する気候要素は、温度であるが、湿度も無関係ではない。温度、風速をいかに調節しても、湿度が極端な場合には、快適ではない。人間は、発汗や

不感蒸泄（発汗以外の皮膚、気管からの体液水分の蒸発）によって、体温を調節している。蒸発水分量は、皮膚表面と環境との湿度差に比例するので、湿度は、皮膚の生理的な働きと深く関わっている。皮膚を通じての新陳代謝がうまくいかないと、内蔵の病気が起こりやすいといわれている。また、冬期に湿度が下がり過ぎると、鼻や咽頭粘膜の抵抗力が減退し、炎症が生じやすくなる。リュウマチや神経痛もちの人は、外気に敏感で、湿度の高い日にしばしば病状が悪化するといわれている。リュウマチ患者 84 例についてのアンケート調査で、コンクリート造に比べ、木造の住宅では、自覚症状が良好であるという統計的に有意な結果が示されている。その理由として、“風通しがよい”、“湿度が低い”ことを上げている。¹¹⁾

湿度は、住宅内に生息する細菌、カビ、ダニなどの微生物の繁殖とも深く関係する。細菌は、塵とともにカーペットなどの内部に潜んでいるが、人の歩行などによって、空中に舞い上がり浮遊菌となる。浮遊菌の生存と湿度は、密接に関係し、湿度 50% の時数分以内に大半が死滅するのにに対し、高湿度や低湿度では、長時間生存し続ける。¹²⁾ カビは、食品を腐敗させ、有毒物質を生産したり、人体の呼吸器や脳などに寄生したり、壁面や衣服類を汚損したり、床下や壁内の木材を腐朽したりする。これらのカビの異常繁殖を防ぐには、湿度を 70% 以下に保つことが必要である。ダニの問題としては、皮膚炎や虫咬症、不快感とそれに伴う不眠症、ダニ付着食品の廃棄、アレルギー疾患などが上げられる。住宅内で発見される最も多いチリダニ類は、喘息、鼻炎、アトピー性皮膚炎などのアレルギー疾患を引き起こす作用の強いものである。ダニ類は、大気中の水分を体表面より吸収して水分を供給しているので、湿度条件が生息の適否を決定する。ダニ類の発生は、湿度の減少とともに少なくなるが、異常発生を防ぐには、70% 以下に保つことが重要である。ダニの問題は、住宅の気密性が増すとともに急増してきたといわれている。床をじゅうたんや畳から木材に替えると、ダニの数は減少する。

図7 小型住宅内の温度および相対湿度の変化¹³⁾
太線：木材内装，点線：ビニル壁紙内装，
細線：百葉箱内

湿度の大きな変動は、家具など家財道具類の狂いや割れ、書籍や美術工芸品の劣化の原因となる。文化財の保存に際しては、特に湿度の厳密な管理が行われている。

以上のことを考慮すると、住宅内の湿度は、40～70%の範囲に保たれることが望ましい。

3・3 木材内装住宅の湿度環境

一室平屋建6畳の小型住宅2棟を用い、窓とドアを除く全面に、一方には木材を、他方にはビニル壁紙を内装し、住宅内の中央床上90cm（座姿呼吸線）の位置における温度と湿度を観測した結果を図7に示している。¹³⁾雨天時に図中の矢印の時点で窓を開放して湿気を流入させ、*印の時点で窓を閉鎖して、その後の温度、湿度を比較したものである。木材内装の場合、湿度は、太線で示すように、窓開放時に89%に達するが、窓閉鎖後急激に減衰し、約1日後には55～60%になる。ビニル壁紙内装の場合、湿度は、点線で示すように、窓開放時に91%に達し、窓閉鎖後には、細線で示す百葉箱で観測される結果と同様に、温度変動に対応して大きく変動する。実際の生活環境では、様々な要因で見かけ上内装材料による調湿作用が不明瞭になる場合もあるが、住宅は、潜在的に調湿作用を備えていることが重要である。

住宅内の湿度変動は、温度変化と水蒸気の発生や流出入によって生じる。炊事のときなどの水蒸気の多量発生時には換気し、晴天時には窓などを開けて風通しをよくし、雨天時には窓などを閉めて湿気の流入を防ぎ、付加的な湿度変動に対応している。したがって、湿度変動の基本的な原因は、温度変化と考えることができる。

住宅の内装には、多種の材料が様々な組み合わせで用いられている。これらの材料単独あるいは組み合わせた場合について、簡便かつ迅速に調湿性能を数値化し、評価する方法が望まれる。いくつか提案されている評価法の中で、密閉箱内の温度変化に伴う湿度変化が、その内面に内装された材料の吸放湿特性によって緩和される程度を、内装面積と箱の気積（容積）の比率に応じて定量化する方法が実用的と思われる。

密閉箱内の温度変化に伴う湿度の変化を、湿度 $H(T)$ の対数と温度 T の次の直線式で表わす。^{14)~17)}

$$\log H(T) = BT + \log H(0) \quad (9)$$

ここに、 B ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) は、箱内の湿度の対数と温度変化を関係づける勾配、 $\log H(0)$ は、 $T=0$ における湿度の対数である。箱内に吸湿性の材料を含まない場合、箱内の絶対湿度を $1.73\sim 15.6\text{g}/\text{m}^3$ の範囲で一定に保ち、 T を $0\sim 40^{\circ}\text{C}$ の範囲で変化させた時、計算で求められる $\log H(T)$ と T の関係は、ほぼ直線で表される。その勾配 B は、若干絶対湿度に依存するが、平均すると $-0.0245^{\circ}\text{C}^{-1}$ となる。¹⁴⁾ 20°C 、65%RHの空気を密封して求めた実験値は、 $-0.0255^{\circ}\text{C}^{-1}$ である。¹⁵⁾一方、箱内に吸湿性のある材料を内装した場合、温度変化速度が大きい時、 $\log H(T)$ と T の関係は、直線とならずヒステリシス曲線を描く。^{14), 15)}しかし、温度変化速度が実際の住宅でみられるように小さくなると、ヒステリシスの幅が小さくなり、ほぼ直線で近似できるようになり、勾配 B は、 $-0.0255^{\circ}\text{C}^{-1}$

より大きな値となる。温度が変化しても湿度が変化しない理想的な調湿作用が実現する場合には、 $B=0$ となる。したがって、 B 値によって材料の調湿性能を定量的に評価できる。 B 値は、材料の吸湿性の程度、箱の気積 V (m^3)に対する材料の内装面積 A (m^2)の比 A/V (m^{-1})、温度変化速度に依存する。平均温度を T_0 、その時の湿度を $H(T_0)$ 、温度変化幅を ΔT とすると、湿度変化幅 ΔH は、次式で求められる。^{14), 19)}

$$\begin{aligned} \Delta H &= H(T_0)10^{B\Delta T/2}(10^{-B\Delta T} - 1) \\ &\approx -2.303H(T_0)B\Delta T \end{aligned} \quad (2)$$

また、材料の単位面積当たりの放湿量 K_1 および吸湿量 K_2 (g/m^2)は、温度 T_0 、 $T_0 + \Delta T$ 、 $T_0 - \Delta T$ における飽和絶対湿度 (g/m^3)を $h_s(T_0)$ 、 $h_s(T_0 + \Delta T/2)$ 、 $h_s(T_0 - \Delta T/2)$ とすると、次式で算出できる。

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{H(T_0)V}{100A} \{10^{B\Delta T/2}h_s(T_0 + \Delta T/2) - h_s(T_0)\} \\ K_2 &= \frac{H(T_0)V}{100A} \{h_s(T_0) - 10^{-B\Delta T/2}h_s(T_0 - \Delta T/2)\} \end{aligned}$$

$20 \times 20 \times 30\text{cm}^3$ の気積をもつ鋼製箱の内壁の所定の面積に材料をパラフィンで固定し、それを 20°C 、65%RHの雰囲気中で十分調整した後、温湿度センサーを取りつけた蓋で密閉し、箱の外周温度を $15\sim 25^{\circ}\text{C}$ の範囲で24時間周期で変化させた時の箱内の温度と湿度を測定する。¹⁵⁾温度変化のパターンは、小型住宅で観測されたものを基本に若干の修正を加えたものを用いる。図8は、種々の内装材料について求めた B 値と A/V の関係を示してい

図8 B 値と箱の気積 V に対する材料の内装面積 A の比の関係^{15), 17)}

○：天然木化粧合板（ナラ，無塗装），●：天然木化粧合板（塗装有），◇：インシュレーションボード，◆：ロックウール，□：布壁紙（合板下地），△：布壁紙（石膏ボード下地），▽：布壁紙（コンクリート下地），▲：ビニル壁紙（石膏ボード下地），■：ビニル壁紙（合板下地），▼：ビニル壁紙（コンクリート下地），□：ポリエステル化粧合板，Pタイル

参 考 文 献

- 1) 佐野雅史, 極地, **55**, 1 (1992).
- 2) 田中俊六, 武田 仁, 足立哲夫, 土屋喬雄, “最新建築環境工学”, p.21 (1993) 井上書院.
- 3) 藤井智之 (森林総合研究所木材利用部組織研究室), 写真提供.
- 4) 建設省住宅局生産課監修, “健康快適住宅宣言”, p.22 (1991) ケイブン出版.
- 5) 田中俊六, 武田 仁, 足立哲夫, 土屋喬雄, “最新建築環境工学”, p.198 (1993) 井上書院.
- 6) 葉石猛夫, 末吉修三, 外崎真理雄, 木材学会誌, **38**, 6 (1992).
- 7) 岡野 健他 8 名編, “木材居住環境ハンドブック”, p.35 ; 82 (1995) 朝倉書店.
- 8) 永田四郎, 古文化財教育研報, No.2, 13 (1973).
- 9) 永田四郎, ハウスクリマ研究ノート, No.10, 9 (1984).
- 10) 岡野 健他 8 名編, “木材居住環境ハンドブック”, p.25 (1995) 朝倉書店.
- 11) 山田 正編, “木質環境の科学”, p.420 (1987) 海青社.
- 12) 齊藤平蔵, “建築気候”, p.182 (1975) 共立出版.
- 13) 則元 京, 山田 正, 木材研究資料, No.11, 17 (1977).
- 14) 則元 京, 大釜敏正, 山田 正, 木材学会誌, **36**, 341 (1990).
- 15) 則元 京, 大釜敏正, 小原二郎, 木材研究・資料, No.28, 48 (1992).
- 16) 太田利彦, 張 東海, 高田晃彦, 繊維学会誌, **52**, 234 (1996).
- 17) 則元 京, 大釜敏正, 小原二郎, 日本インテリア学会論文報告集, No.3, 41 (1993).
- 18) 大釜敏正, 上野 崇, 則元 京, 木材研究・資料, No.31, 56 (1995).
- 19) 牧 福美, 則元 京, 山田 正, 木材学会誌, **24**, 797 (1978).
- 20) 上野 崇, 大釜敏正, 則元 京, 木材学会誌, **43**, 839 (1997).
- 21) 牧 福美, 則元 京, 山田 正, 木材学会誌, **27**, 828 (1981).