

住宅における 調湿技術と その将来

この調査研究は科学技術振興機構(JST)の社会技術研究開発センター(RISTEX)から受託した「先進技術の社会影響評価(テクノロジーアセスメント)手法の開発と社会への定着」プロジェクト(2007~2011)の一環としておこなわれているものである。テクノロジーアセスメントとは、従来の研究開発・イノベーションシステムや法制度に準拠することが困難な先進技術に対し、その技術発展の早い段階で将来のさまざまな社会的影響を予測することで、技術や社会のあり方についての問題提起や意思決定を支援する制度や活動を指す。欧米における実践では、幅広い関係者や国民一般を巻き込み、それぞれにとつての便益や、安全やリスクに対する考え方の違いを認識し、対話を図りながら科学技術の発展の方向性を舵取りしている。こうした活動はわが国においても断片的に行われているものの、問題の俯瞰的な把握、不確実性や価値の多様性の考慮といった点で、政策決定者のニーズや社会からの信頼に十分に応えているとはいいがたい。先進技術の社会影響評価が制度化することで、長期的・戦略的視点から先進技術の社会導入や普及に貢献し、既存の政策決定システムに対する補完的な役割を務めることが期待される。

当プロジェクトでは、今後わが国でどのようにテクノロジーアセスメントが制度化し定着しうるかを探るとともに、医療・食品・エネルギーなどの分野におけるナノテクノロジーに関する事例を取り上げて、実際にテクノロジーアセスメントを実施している。

1 はじめに

戦後、新建材とアルミサッシの使用により住宅の気密性が高まり、蒸し暑い夏を過ごすためにすき間風だらけの家で冬の寒さを我慢してきた日本の古来の伝統家屋の欠点の見直しが図られた。だが他方で、換気が不十分なことから換気量の不足を招き、結露の発生が問題となることもあった。さらに換気不足のために、新建材から放出される化学物質によって室内空気が汚染される懸念も増えてきた。こういった側面は近年になってわが国の住宅施策が省エネ化を志向し、冷暖房効率の優れた高气密・高断熱住宅が増加するに伴い、ますます強調されるようになってきている。こうしたことから住宅における環境や健康への関心が高まるなか、調湿建材や素材、そこに使われる技術の発展が期待されている。農的な暮らしやオール電化、シェア住居など、一般市民にとって理想とする住まい像は多様であるが、その中でも調湿建材はおしなべて有望な技術とされている¹。だが調湿は、その言葉の持つ響きや、技術の文化的・歴史的な背景と併せて、曖昧で多様な解釈がなされてきた。そこから今後の調湿技術の発展に対する影響も示唆される。そこで本ノートでは調湿とは何かについて改めて考えるとともに、先端的な調湿技術の応用への期待やリスク、評価にかかる課題、文化的側面など多角的な観点から調湿技術の将来を展望する。

2 調湿とは何か

2-1 調湿の定義と基本特性

調湿とは室内における空気中の湿度をある一定水準に収まるように調節または調整することである。室内居住環境の観点から考えれば、人にとって快適な条件を維持するように湿度を調整することが重要である。建物の湿度環境が適切に保たれていなければ、結露の発生やカビ・ダニ等の微生物汚染につながる危険性があり、居住者の健康にも影響を与える可能性が高い。一方、低湿度の環境では居住者の乾燥感、アトピー性皮膚炎や喘息の悪化の問題が見られ、環境の敏感な人に対してシックハウス症候群の症状の悪化が見られた事例もある²。

個人差はあるものの、人にとって快適な湿度環境は相対湿度50～60%と言われている。建築物衛生法³の建築物環境衛生管理基準では相対湿度は40%以上70%以下と定められている。このことから、調湿とは相対湿度が40%以下のときは加湿し、70%以上のときは除湿することにより、相対湿度

40%以上70%以下の範囲を維持すること、という定義もある⁴。

調湿に関する重要な特性として、平衡含水率と湿気伝導率（透湿率）、吸放湿特性がある。吸湿量は、接する空気の水蒸気量と建材の構造で決まるが、特に空気の水蒸気量として、相対湿度が物性の整理に利用される。空気中に含まれることのできる最大の水蒸気量を飽和水蒸気量といい、温度によって決まる。水蒸気量と温度が与えられると水蒸気圧も求められる。この水蒸気圧（量）を飽和水蒸気圧（量）で割ったものが相対湿度である。相対湿度が同じであれば、そのときに吸湿される水分量はほぼ決まっており、それを平衡含水率と呼ぶ。建材中の水蒸気は水蒸気圧の勾配に比例して移動するが、この比例常数が湿気伝導率であり、材料内部の水蒸気の移動の速さを表す。瓶があるとして、平衡含水率は瓶の大きさで、湿気伝導率は瓶の入口の大きさに喩えられる。調湿においてはこの両方が重要である。したがって、瓶は大きいが入口が小さいコンクリートなどは調湿速度が遅いということになる。また、吸放湿性のある材料が壁体に使用されると、室内温度の上昇あるいは湿度の低下がある場合には材料から湿気が室内に放出される。逆に温度の低下あるいは湿度の上昇がある場合、室内から材料へ湿気が吸収される。このような効果に影響を与える材料特性として、吸放湿特性がある。これは室内絶対湿度の単位変化に対する吸放湿量 κ および室内温度の単位変化に対する吸放湿量 ν によって規定される。

2-1 調湿の方法

調湿の方法には機械力を用いたアクティブ型と、用いないパッシブ型があり、前者は主に空調や除湿機、加湿器を利用し、後者は主に調湿建材を利用する。パッシブ型については後述するため、ここではアクティブ型のみ触れる。

アクティブ型調湿に用いられる主な除湿方法として、最も一般的なものは空気を露点以下に冷やすことで空気中の水分を結露し除去する冷却減湿方式である。これはコンプレッサ方式除湿機やエアコンの除湿運転に利用されている。これに対し、空気中の水分を吸着剤に吸着し除湿する吸着減湿方式があり、この方式による吸着剤ロータを搭載した除湿機が

北陸地方で冬季に好んで使われている。また、産業用として塩化リチウム水溶液などの吸収液を用い、空気中の水分を吸収液に吸収させる吸収減湿方式もある。吸着剤による減湿を乾式、吸収液による減湿を湿式として、これらをデシカント除湿と呼ぶ。このほか、空気を直接圧縮して、全圧を高めることで空気中の水蒸気圧を飽和状態とし、結露除去させる圧縮減湿方式もある。

加湿方法として、蒸気を噴き出して空気に吸収させることで空気を加湿する水蒸気吹き出し方式、水を霧状に吹き出して空気を加湿する水噴霧方式、水と空気との接触面を多くして接触面で水を気化させて加湿する気化方式があり、いずれも水を直接気化させるもので従来からの実績も多い。これに対してデシカント加湿方式は、吸放湿材に吸湿された水分を空気に放湿させることで加湿するものである。

こうした除加湿をしている場合、換気のために外気を取り入れると、外気と室内との湿度の差によって除湿機や加湿器の負荷が大きくなる。これらの負荷を軽減する目的で利用されているものに全熱交換器があり、国内では静止形と回転形が利用されている。静止形全熱交換器は水分と熱を伝えることのできる特殊な紙を挟み、屋外からの給気と室内からの排気が直交流の形で流れる仕組みとなっている。給気と排気の間で水分と熱の回収が行われる。回転形全熱交換器では水分と熱を蓄積できるロータが外気を室内に導入する給気通路と室内の空気を屋外に排出する排気通路との間で回転する仕組みとなっている。

表 主な調湿方法

アクティブ型	除湿	冷却減湿	露点以下まで冷却し、水分を結露、除去
		吸着減湿(乾式 デシカント除湿)	固体吸着剤による水蒸気の吸着
		吸収減湿(湿式 デシカント除湿)	塩化カルシウム、塩化リチウム水溶液などによる 水蒸気の吸収
		圧縮減湿	全圧を高めることで、飽和湿度を減少
	加湿	蒸気吹き出し	蒸気を吹き出して空気に吸収
		水噴霧	水を霧状に吹き出して空気を加湿
		気化	水と空気との接触面を多くして接触面で水を気化
		デシカント加湿	吸放湿材に吸湿された水分を空気中に放湿
	負荷軽減	静止形全熱交換	吸気と排気が直交流で流れ、水分と熱を回収
		回転形全熱交換	水分と熱を蓄積できるロータが吸気排気通路間で回転
パッシブ型	木質系	木繊維系、木材	
	土質系	珪藻土系、火山灰系、粘土系、漆喰系	
	石質系	ゼオライト系、ケイ酸カルシウム系、セラミック系	
	その他新素材	ALC、アルミナ系、カーボンナノチューブ	

2-2 調湿の機能

調湿は室内の湿度調整のほか、防露、臭いや化学物質の吸着・分解も期待できる。以下ではこの三つの機能についてそれぞれ見てみることにする。

2-2-1 湿度の調整

調湿材は室の温度湿度の変化にかかわらず相対湿度の変動を抑える方向で働く。平均湿度の良好な部屋での調湿効果は相対湿度で10%程度期待でき、それは体感によって違い

が分かるレベルだという意見もあるが⁶、相対湿度に対する人間の感度はそれほど良くないという報告もある⁷。調湿材を外壁として用いれば、冬季には室内の湿気を室外に排出でき、日射照射のない条件下であればより効果的とされる⁸。ただし、湿気排出という点では隙間をつくる方が効果的である。

建築研究所が標準的な生活住戸で実施した実証実験によれば、機械・自然換気と内装材や家具による水蒸気の吸着・放出の効果を比較すると、夏季における1日の除湿量については換気が卓越し、加湿量については吸放湿の影響が強いことが示された。ただし、絶対量で比較した場合、換気による水蒸気の排出量と室内での水蒸気の発生量のバランスで室内湿度がほぼ決定される⁹。そのため、内装材に調湿性の高い材料を用いたとしてもそれほど室内湿度調整に寄与せず、逆に過乾燥を防止するためには換気量を少なくすることの方が効果的である。快適な湿度環境を維持するためには適切な換気計画が求められるが、換気量を少なくすることは空気質の低下を招くおそれもあるため、換気によってのみ湿度の調整を図ることは難しいという見方もある¹⁰。

2-2-2 防露

結露現象は、高温状態で飽和点以下であった空気中の水蒸気が、空気が低温になるに伴い飽和水蒸気量が低下した結果、水滴へと相変化を起こすことをいう。熱を与えて温度を高くしてやれば水蒸気から水滴への相変化は抑えることができる一方で、調湿によって水蒸気を吸湿することで室空気を飽和水蒸気圧に達しないよう調整することもできる。調湿材は室内の露点温度を下げ、水分発生などによる室内湿度の上昇を抑えることで、建材の腐朽、カビ、汚れ、内装の剥離といった被害の原因となる表面結露の防止効果がある。ただし、低湿な外気との間の換気量が減少すると、調湿の有無にかかわらず結露が発生する可能性がある¹¹。結露は壁などの材料表面ないし内部の水蒸気と温度の関係で起こる物理現象であるから、暖（冷）房と断熱・気密と換気が影響する。どのようなときでも室温を上げれば結露は防げるため、調湿性は必ずしも防露の必要条件ではない¹²。

調湿系断熱材のセルローズファイバーは、室内側から流入した水分の一部を内部に取り込むことによって結露を防ぐ。これに対しグラスウールでは保水能力が極めて小さいために流入水分は一気にシージング（断熱ボードにアスファルト処理をした構造用面材で、強度があり防水防湿性に優れる）に向かい結露状態になる¹³。基礎断熱住宅の床下は低湿に保たれ、居室の影響によって地盤の温度が年々上昇するため、床断熱住宅の床下より夏季の結露が起こりにくく、床下に置く調湿材の効果が期待できる¹⁴。

2-2-3 臭いや化学物質の吸着・分解

近年、調湿建材には悪臭や健康被害を及ぼす化学物質を除去することも期待されるようになってきている。臭いについては、調湿材がアンモニアや硫化水素といった臭気物質を吸着して濃度を低下させることが確かめられている¹⁵。

珪藻土、ゼオライト、石膏などの多孔質物質、比表面積の大きい物質はホルムアルデヒドをはじめとする揮発性有機化合物（VOC）を物理的に吸着する。そこでは建材とVOCの親和性により吸着力が決定し、また、吸着量が大きくなった場合や温度が上昇した場合には吸着していたVOCが再放散されると考えられる。この場合、VOCに対する吸着能に応じてバッファー効果が期待できる¹⁶。ホルムアルデヒドの吸着は、調湿材が吸湿した水に化学物質が溶け込むことで生じる。そこで、調湿材が水を吐き出すときに、化学物質も同時に再放出されるおそれがある。しかし、近年は、化学処理メカニズムを用いることによって、調湿材で吸着した後のホルムアルデヒドの空気中の再放出を防ぐ市販調湿建材がある。だが、こうした対策は化学的吸着と呼ばれ、建材にVOCと反応する化学的薬剤を混入または塗布して、室内空気中のVOC濃度を低減しようというものである。ホルムアルデヒドやアセトアルデヒド類に対して、ヒドラジド系化合物などの化学的キャッチャー剤が広く実用化されている。化学的キャッチャー剤の効率や寿命は含有化合物によって幅があり、また、光、熱、水分、酸・アルカリやその他の化学物質の影響により変質するため、建材が使用される環境下で必ずしも安定とは限らない。

3 調湿建材・素材と技術

3-1 調湿建材・素材

調湿建材の2005年における市場規模は7,030千m²、2006年が7,600千m²(前年比108.1%)、2007年が7,500千m²(同98.7%)であった。2007年の市場規模のうち、調湿塗り壁が5,800千m²、タイルが1,700千m²であり、安価な塗り壁の割合が圧倒的に高いものとなっている。これにより、2007年の段階では200億円規模の市場と想定される。調湿建材は自然素材ブームや高气密住宅の増加に伴う結露の問題を背景に市場を拡大してきたが、2007年は主力の戸建住宅向けが改正建築基準法の影響を受け伸び悩んだ。一方の調湿タイルは堅調に伸びたものの、総市場としては前年を割り込む形となった¹⁷。社団法人日本建材・住宅設備産業協会では、「調湿建材」に客観的な評価を行い、一定以上の性能を有する製品に「調湿建材認定マーク」を表示する制度を2007年10月に制定し、運用している。2010年7月28日現在、24の商品が調湿建材登録・表示製品として認定を受けている。このうち2008年に登録を受けたものが14件、2009年が7件、2010年が3件となっており、近年は新規参入企業も少ないことから市場に広がりがなくなってきたことを窺わせる。

調湿建材はいろいろな素材があり、形状もボード状、タイル状または塗材(塗り壁材)のように多岐にわたるが、材質により分類すると大きく3つに分けられる。(1)木質系:木繊維系、木材など、(2)土質系:珪藻土系、火山灰(シラス)系、粘土系、漆喰系など、(3)石質系:ゼオライト系、ケイ酸カルシウム系、セラミック系など¹⁸。このうち珪藻土は多孔質構造で、その細孔が湿度をコントロールする吸放出機能を発揮しており、調湿素材として最も代表的なものとなっている。

3-1-1 珪藻土

珪藻土は、海や湖に浮遊する単細胞の植物性プランクトン（藻類）の遺骸が湖底や海底に堆積して形成された化石堆積物の一種であり、通常、珪藻殻のほかに、砂、火山灰、粘土類などを少量含んでいる。化学成分としては、可溶性の珪酸を50～70%含むことが特筆され、そのほかに、少量のアルミナ、鉄分、硫酸分、有機物などが共存している。アメリカ地質調査書の資料に基づくと、世界の珪藻土生産量は215万t/年程度で、アメリカが約1/3を占めている。日本の珪藻土は生産量が約20万t/年で、世界全体の10%弱となっている。鉱床は、稚内、秋田、石川、岡山、大分、鹿児島などを中心に100ヶ所以上知られ、新第三紀海成層および第四紀湖成層中に胚胎している。現在稼働中の鉱山は20ヶ所程度で、採掘は露天掘りにより行われている。埋蔵量については詳しい記載は見当たらないが、膨大な量が存在する¹⁹。

珪藻土は木炭の数千倍という超多孔質で、粒径が10～30 μm の微細な孔が無数に配列している材料である。空気層を有して優れた耐火性や断熱性を示すため、古くから、耐火煉瓦、七輪、コンロなどに使用されてきた。現在の用途はビール、食品、医薬品などの濾過助剤の原料や吸収剤など幅広い。珪藻土の無数の孔は水を吸着する作用があり、特に水蒸気を吸着するのに適した大きさである。このような特性から、空気中の湿気を吸放湿する調湿機能を有して、結露を防止したりカビの発生を抑制したりする効果を示す。こうした調湿性に加え、保湿性・断熱性も高いことから、仕上材料への利用が図られており、自然素材として、近年、注目を浴びている。その他にも、抗菌・殺菌性や防虫・殺虫性なども認められ、実用化の研究が進められている²⁰。臭いや煙を吸着して室内空気を清浄する作用が期待でき²¹、断熱性、保湿性、吸音性や耐火性にも優れており、省エネルギーにも寄与できる天然の空調機能を示す²²。珪藻土建材はアンモニアやトリエチルアミンなどの化学物質の吸着性能が確認されているものの、市販されている建材間に性能の差があり、建材によっては吸着した化学物質を再放出するものもあるとされる²³。

3-1-2 その他の調湿素材

珪藻土以外の調湿素材として、木材や漆喰がよく知られているほか、天然シラス、アロフェン、ゼオライト、ALCやバーミキュライトが実用化されている。

木材の持つ吸放湿特性は、木材の力学強度に影響を及ぼし、膨張や収縮による変形や割れなどの崩壊を誘発するため、木造建築技術者には十分な予測能力が要求される²⁴。漆喰はカルシウムを主成分としており、古くから土蔵や家屋の土で造られた内外壁の上塗り材として用いられている。天然シラスは火山灰として噴出したもので、斜長石、石英の鉱物も混じっているが、大半は多孔質の軽石状を成す非晶質の火山ガラス粒子により構成されており、その多孔質構造が調湿、消臭機能を備えている。アロフェンは二酸化珪素・酸化アルミニウムの水和物で火山灰土壌中に存在する天然の粘土鉱物である。アロフェン系調湿建材はビニールクロスに比べ、製造・廃棄時の環境負荷が大きいものの、ホルムアルデヒドの吸着に伴う環境影響の低減効果がある²⁵。ゼオライトは結晶中に微細孔を持つアルミノ珪酸塩である沸石類という鉱物の総称であり、珪藻土と同じく多孔質構造のため、調湿、消臭機能に優れている。床下調湿材や内装材として商品化されている²⁶。ALCは高温高圧養生処理して作られた軽量気泡コンクリートと呼ばれる建材である²⁷。バーミキュライトは蛭石を原料とし、農業や園芸の土壌改良用土として知られている。

この他、実用化が期待されているものとしては、水酸化アルミニウム粉末を熱処理したアルミナ系調湿材料²⁸や、床下調湿材として商品化されている多孔質鉱物のセピオライト²⁹、カオリナイト³⁰、価格や生産性の点から将来的な展望としてカーボンナノチューブ⁶が挙げられる。

3-2 ナノテクノロジーによる調湿技術

調湿機能に影響を与える材料の吸放湿特性（容量、速度）を制御するためには、材料の細孔構造の制御が重要となる。優れた調湿性能を得るためには、吸放湿容量を支配する、すなわち毛細管凝縮が起こる数nm～10nm オーダーの細孔と水蒸気の拡散を支配する30nm以上のマクロ領域の細孔を制

御することが重要である³¹。日本人の生活において最適とされる相対湿度60%で細孔による調湿を行うために必要な細孔半径は2.4~6.2nmというデータもある³²。1996年度から4年間行われた工業技術院による官民連帯共同研究では、ケルビンの毛細管凝縮の理論に着目し、細孔径が数nmと小さく、均一で、大量に存在すれば特定の湿度で吸湿と放湿を自律的に行う材料を開発した。これにより吸放湿量も従来の乾燥剤より数倍から一桁程度大きい材料が合成された。この自律的に吸放湿する多孔体を無機系の材料で作成すればシロアリや火災などの危険性もなくなると考えられる³³。特に結露問題と凍害を考慮すれば、毛細管凝縮が起きるサイズで、かつ、侵入した水分子が凍結できない5nm径以下の細孔を素材や材料に多く持たせることが望ましい。だが、材料強度を考えれば5nm径のハニカムが理想的とされる³⁴。ナノオーダーの細孔径を得る方法はある意味で自然の力や偶然性を活用している部分が多い。一般的に、多孔質にすると材料強度が低下し、また、強度を高くするために高温で焼成した場合には、吸放湿特性を持つ原料の微細孔が減少し、吸放湿特性が低下する。よって、建材として必要な強度を維持しつつ、吸放湿特性を付加するためには、原料の選択ならびに焼成温度が重要なポイントとなる³¹。

近年、調湿効果を高めるために、調湿建材だけでなく調湿建材と乾式デシカント除湿を併用することが有望視されている。デシカント除湿による空調は従来の冷却減湿方式と比較して、過冷却防止のための再加熱エネルギーを必要としない。また、乾燥材を乾かさず熱源には、これまで利用し尽くされて捨てられていた工業低温排熱や空調から排出される低温排熱を利用できるため、電力消費量を少なくすることができ、省エネルギー効果が期待されている。デシカント空調に求められる乾燥材としては、幅広い湿度領域で水蒸気を吸着・放出できる必要があるが、これに対応すべく産業技術総合研究所では「ハスクレイ」という高性能な無機系吸放湿材料を開発した。ハスクレイは粘土鉱物由来の高い比表面積と微小細孔を有する非晶質アルミニウムケイ酸複合物で、ナノサイズの粒状体である。ナノチューブ状のケイ酸塩であるイモゴライトの部分的な構造を持ちながらも、大量合成が可能とされている³⁵。ハスクレイの技術移転を受けた戸田工業では調湿材として2009年より少量生産を開始し、将来的には年間数百トンレベルの生産を見込んでいる³⁶。

4 健康・環境面から見た調湿技術

4-1 住宅の省エネルギー化

調湿技術を住宅に応用することにより、以下の点で住宅の省エネルギー化が期待される。まず、調湿建材を内装材として用いることにより、夏季に室内の湿度を低くでき、冷房の設定温度をあまり下げなくてすむ。これにより冷房の消費電力を抑えることができる。また、デシカント方式による除湿冷房を用いることによって、空調による電力消費量を少なくすることもできる。

一方で、調湿壁材による吸湿により室温が高くなり、その対策のために通風や冷房を行うことで冷房エネルギーを増加させる可能性もある³⁷。シミュレーションでは、壁体の吸放湿は冷暖房の潜熱負荷を増加させることが示されている³⁸。潜熱負荷とは、冷暖房負荷のうち温度変化が伴わない水蒸気量の出入りによる増減を指す。これに対し、空気の温度を変化させる熱負荷は顕熱負荷と呼ばれる。また、最近の冷房に用いられる再熱除湿運転を調湿建材と組み合わせて利用すると、冷房の負荷が大きくなることが明らかとなっている。こうしたことにより、調湿材の指標として通常用いられる κ 値（室内絶対湿度の単位変化に対する壁材の吸放湿量）を大きくしてもアクティブ調湿との組み合わせでは消費電力の軽減にならないこと、また相対湿度を低く抑える方向に働かない可能性がある。一方で、今までまったく注目されていなかった壁材の ν 値（室内温度の単位変化に対する壁材の吸放湿量）を大きくすることで、除湿運転時のエアコンの消費電力を削減できるとともに、冷房運転時に相対湿度の上昇を抑える可能性も示されている³⁹。

4-2 調湿建材の健康への影響

調湿建材の使用による人体の影響について、実際に調湿建材を内装に使用したグループホームでは、認知症の症状が良くなった、生き生きとしているなど、入居前より健康的になったとの感想が得られている。また、調湿建材を施工した個室に被験者が滞在する実験では、時間帯によっては体温や心拍数が低くなる傾向が見られた⁴⁰。これらのことから、調湿建材は居住者の体調を良好に保ったり、安心感を与える可能性がある。

調湿建材を用いない場合、快適性のために夏期の冷房温度は低く設定される傾向にある。「建築物における衛生的環境の確保に関する法律施行令」⁴¹では、居室の温度と外気との差は著しくしないこととしているが、温度差が大きくなると人間の体温調節機能が低下し、自律神経系の調節機能が乱れて心理的な不安感が起こり、心身両面の異常が生じるようになる⁴²とされている。これはいわゆる冷房病と呼ばれるもので、長時間にわたって身体が冷やされることでも起きる。温度差の人体影響は室内外の滞在時間や居室の温度にも左右される⁴²。温度差が5度を超え、滞在時間が長くなると心理的に大きな影響を与えるとともに皮膚温を大きく変動させる⁴³。また、直腸温変動も顕著で体温調節系への負荷が大きい。滞在時間が短く温度差の大きい場合、心拍数の大きな変動がしばしば見られ、身体負荷が大きい⁴⁴。冷房設定温度を28℃というやや高め⁴⁴の温度に設定したときでも、湿度制御を行って乾燥した状態にすると、半袖着用から長袖着用にすると乾湿感が緩和され、快適感が得られるという⁴⁵。

4-3 シックハウス対策

住宅の健康に及ぼす影響が社会問題として広範に認知されるようになったのは、倦怠感・めまい・頭痛・湿疹・のどの痛み・呼吸器疾患などの新築の住居などで起こる症状が「原因不明」ではなく、ホルムアルデヒドなどのVOCを原因として生じるシックハウス症の可能性が疑われ始めてからのことである。こうした背景によって、2002年には建築物衛生法改正による一定条件の下でのホルムアルデヒドの測定及び対策の義務づけ、さらに2003年にはシックハウス対策が盛り込まれた改正建築基準法が施行され、2種類（クロルピリホス及びホルムアルデヒド）の化学物質について規制がかけられた。クロルピリホスについては、それを添加した建築材料の使用が禁止された。ホルムアルデヒドについても、内装の仕上げに使用するホルムアルデヒド発散建築材料は面積制限をうけることとなった。さらに2003年7月1日以降に着工された全ての建築物に機械換気設備の設置が原則義務付けられ、シックハウスへの優先的対策として法的に明示された。

他方で、機械換気設備とは別に、シックハウス症候群には、調湿材の利用によって対処できる部分もあると考えられる。シックハウス問題以降、自然素材などを活用した健康住宅が注目されるようになり健康住宅ブームの後押しで調湿建材の普及が見られた。先に述べたように、調湿建材にはVOCの吸着作用が期待でき、シックハウス症候群のリスク低減に寄与しうる。また、シックハウス対策には化学物質や生物学的要因のみならず、高湿度状態である住環境などの要因対策が必要であるとも言われており⁴⁶、その観点からも調湿の期待される役割は大きい。さらに、湿度70%になるとカビやダニが発生し、40%以下ではインフルエンザ感染伝搬率が高くなることから、調湿は感染症やアレルギー疾患との関係でも重要である⁴⁷。

5 調湿技術の社会的・文化的含意

5-1 珪藻土をめぐるリスクと応用上の注意

調湿素材として使用される珪藻土について、健康に対するリスクがあるかどうかについて議論が繰り広げられている。1996年、国際がん研究機関（IARC）によって、珪藻土に含まれる結晶シリカが発がん性物質のグループ1「発がん物質」に分類された。これは単純に発がん性があるということではなく、『珪肺患者が肺がんを併発する可能性が高まる』という報告である。非結晶シリカはグループ3「発がん性が分類できない」とされ、がんの可能性については分からないという位置づけになっている⁴⁸。結晶シリカについては、2009年3月に再レビューを受け、報告書が近刊される予定である⁴⁹。シリカ（二酸化珪素）は塵肺（珪肺症）の原因と言われており、珪藻土が室内に舞って大量に吸い込むと問題になると言われている⁵⁰。結晶シリカ（クリストバライト）は地球の地殻の60%を構成しているもので、建築材料としても一般的に使用されている。珪藻土は未焼成の場合、結晶シリカはほとんど入っていない⁵¹。焼成すると結晶シリカが生成するが、現在商品化されている建材のほとんどについて、珪藻土が焼成されているかどうかはきちんと明示されていない。結晶シリカは一般に非結晶シリカより調湿効果も落ちるとされる。

日本では1997年、労働省において職業がん対策専門家会議を開催するとともに、IARCの発がん性分類においてグループ1「発がん物質」に分類されている化学物質又は工程の中で、行政対応が一部のみか、またはされてないと考えられるもののうち、医薬品等特殊なものを除く17項目について検討・整理を行った⁵²。その後、暫定期間の末に2001年4月、日本産業衛生学会が「シリカの発がん性に関する疫学的知見について十分な証拠があるとしたIARCの判断は妥当である」との結論を下し、IARCの評価に支持を表明した⁵³。結晶シリカが塵肺の主要な原因物質であることから、2001年7月、厚生労働省労働基準局に「肺がんを併発するじん肺の健康管理等に関する検討会」が設けられた。検討結果は2002年10月に報告書としてまとめられたが、結晶シリカそのものの発がん性を明らかに肯定する知見は得られなかった⁵⁴。

5-2 調湿材の評価について

珪藻土に代表される調湿建材が登場するのは1990年頃であり、この頃は、室内空気汚染の問題が起こって化学物質を含む建材に対して批判も起こっていた。珪藻土、炭、天然系建材が注目度を高めて市場が活性化するなか、性能評価が求められるようになった。そこで統一した調湿性の評価を目的に財団法人建材試験センターが中心となり、2002年8月にJIS A1470-1, A1470-2「調湿建材の吸放湿性試験方法」⁵⁵が制定された。この調湿性の評価のための測定法は非常に時間がかかるため、簡便な方法が求められている。ただし、材料の物性値が得られる程度のものでなければシミュレーションに 응용が利かず、中途半端な評価になってしまうおそれが指摘されている⁵⁶。さらに、実効性の性能評価の問題も存在する。たとえば調湿材を壁の中に置き、その効果を見る研究が遅れているという。セルローズファイバーのような調湿系断熱材についての研究もごく最近見られるようになったばかりである。新しい建材が登場しても、それに必要な物性値を知る人材も測定場所も限られていることが課題となっている。

また、調湿建材のVOC吸着効果は、論理的にはシックハウス症候群のリスク低減に寄与するが、これらの調湿建材がどの程度の吸着効果があるのかについて定量的な実証研究は少なく、どれほど実効性を持っているのかは定かでない。建築物への機械換気設備の設置が法的に明示されたことは、シックハウス対策としての調湿機能に絶対的な評価がなされていないためとも考えられる。さらに、VOC等の化学物質の分解を行うものとして光触媒が建材に利用され始めている。光触媒の素材となる酸化チタンは太陽光に含まれる紫外線の作用により、触媒効果を発揮する。しかし、室内環境における蛍光灯からの紫外線照射レベルは屋外環境の千分の一程度であり、通常の光触媒を利用しても室内では効果を期待できない。このため、可視光でも効果を得られる可視光応答型光触媒の研究開発が活発に行われているが、この評価がまだ定まっていないという根本的な問題がある⁵⁷。

5-3 「調湿」の文化

「調湿」という言葉は情緒的に扱われることが多く、その意味は多義的である。日本人は「調湿」という言葉の響きに引かれ、それが「自然なもの」であり、「よいもの」と感じているとされる。また、それは日本の気候風土に照らした「古くて伝統的」なものと考えている。これには蔵の土壁や校倉造のイメージが強いと思われる¹²。だが、倉は調湿するから夏涼しいということや、正倉院の校倉造は構造的に調湿性があるという見方は、現在では誤った通念と考えられている。そもそも昔の家のような天然建材では調湿性は当たり前のものであり、これまで大きな関心はなかった。一方で、最近の高断熱・高気密住宅では不意に起こる結露の対策として調湿性を捉えており、ここでも調湿への関心は高くないとされる。調湿への関心が高いのは結露と空気汚染を起こしている中途半端な家づくりにおいてであり、そこでは熱に頼ることができないため調湿性を重視せざるを得ないのだ、という見解も示されている¹²。こうした家づくりでは、しばしば「呼吸する家」といった曖昧な定義に基づく表現がなされ、呼吸しない家は不健康な家と決めつけられることがある。一方で「息をする壁体」のように、温暖地域の住宅に適用することを目的として外壁や天井などの部材の面が透気機能を持ち、熱・空気・湿気の流れをコントロールできる構造の建築部材も開発されており、呼吸＝調湿ではない事例も見られる⁵⁸。このように、「調湿」という響きや、「呼吸」といった擬人化によって、本来それぞれが持つべき機能が整理されず、技術や製品が玉石混淆であることは、調湿技術の発展にとって望ましいことではないだろう。これからは「調湿」の文化的な文脈を尊重しつつ、的確な定義や適切な印象を一般に広めていくことが必要だと思われる。

5-4 調湿技術の将来

調湿技術における、(1)イノベーションや産業化、(2)規制や自主的な取り組み、について今後のあり方を展望してみたい。

(1) イノベーションや産業化

まず、イノベーションや産業化に関して、技術や生産プロセスにおける画期的なイノベーションが起きたとしても、一般の建材に対して調湿材が価格競争力を持ちうる可能性は今後とも非常に低い。そのため、価格を下げて製品を広めるよりも、価格が高くても購買したいという層をいかに作り、確保するかがポイントであると見られる。調湿材の持つ機能が付加価値として認められるには、たとえば湿度の調整であれば、居住者が体感しうるとされる10%以上の湿度調整効果を持つ建材の開発が期待される。これにおいてはデシカント空調と組み合わせることで、いずれ明確な調湿効果と省エネ効果が確認される可能性がある。VOCや臭いの吸着・分解については、建材自体がVOCや臭い対策の素材に切り替わってきていることもあり、よほど劣悪な住環境でない限り、大きなメリットはないかもしれない。だがこうした化学的吸着による効果は不安定であり、また、化学物質によって化学物質の発生を抑える手法のため、健康・環境意識の高い消費者は、多少のコストをかけても調湿材を選択することは十分考えられる。

消費者である住まい手は、現段階では快適性を犠牲にして省エネルギーを選択するインセンティブは乏しい。湿度の調整について、調湿材は、エアコンや除湿機など電気を用いたアクティブな技術のほか、戸や窓の開放による自然換気という伝統的なパッシブ手法とどう対抗・共存するかが問われている。しかし、韓国では会社員の5割以上が会社内で夏場に冷房病を経験しており⁵⁹、日本でも空調機器に過度に依存する生活に対する抵抗感は少なくないと考えられる。そうした空調機器への依存による体調不良がより顕在化してくるようになると、調湿建材の価値が高まることが想定される。

(2) 規制や自主的な取り組み

規制や自主的な取り組みに関して、調湿材に対する実効性や、シックハウス対策としての有効性など、適切な評価手法や制度が整備されていないことが課題となっている。規制当

局においては、将来的に民生部門における温室効果ガス排出に対する規制などを導入するのであれば、そのためのデータや評価のあり方を十分に検討することが先決である。そしてそれは、看過されがちなパッシブ技術に対しては特に注意して目を向けておく必要があるだろう。また、調湿建材のVOC濃度低減能力についての評価手法が確立すれば、シックハウス対策における調湿建材の有効性が認められるかもしれない。それを受けて建築基準法や施行令の改正など、何らかの法的・政策的手当てがなされれば、建築業者や一般消費者が調湿材を採用する割合が増加すると見られる。

一方、建材メーカーにおいては、調湿材の付加価値を高めるため、新たな機能性を追求するとともに、意匠や広報について工夫をすることが望まれる。それにあたり、メーカー間の連携を深め、協働しながら広く社会への認知を進めていく姿勢があるとよい。その一方で、調湿建材認定マークの取得やメリットの宣伝ばかりでなく、素材についても積極的にデータを開示し、一部の消費者からの安全性に対する懸念や疑問に真摯に対応することが求められよう。

レビューアー (50音順、敬称略)

前田 雅喜 産業技術総合研究所中部センター
サステナブルマテリアル研究部門
メソポーラスセラミックス研究グループ

銚井 修一 京都大学大学院
工学研究科建築学専攻科 教授

I2TAプロジェクト・エネルギーチーム

吉澤 剛 東京大学公共政策大学院 特任講師

山口 健介 東京大学公共政策大学院 特任研究員

- [1] I2TAプロジェクト・柏の葉アーバンデザインセンター（UDCK）共催「未来の住まいフォーラム in 柏」（2010年7月17日）の結果による。
- [2] 長谷川兼一・松本真一・源城かほり・吉野博（2005）「住宅の湿度環境と健康影響に関する研究 その1 研究計画の立案に至った経緯」『日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）』987-988頁。黒木康輔・長谷川兼一・松本真一・源城かほり（2005）「住宅の湿度環境と健康影響に関する研究 その2 国内外における文献調査」『日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）』989-990頁。畑村祐希・長谷川兼一・松本真一・源城かほり（2005）「住宅の湿度環境と健康影響に関する研究 その3 秋田県由利本荘市の児童を対象としたアンケート調査の概要と単純集計結果」『日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）』991-992頁。
- [3] 「建築物における衛生的環境の確保に関する法律」（昭和45年4月14日法律第20号）。
- [4] 前田雅喜（2005）「調湿で化学物質が消せるのか」『建築技術』660号、171-173頁。
- [5] 小椋大輔（2005）「多孔質材料の調湿メカニズム」『建築技術』660号、132-135頁。
- [6] 前田雅喜（2010）インタビュー、2010年7月8日。
- [7] 銚井修一氏のコメントによる。
- [8] 山崎正英・垂水弘夫・前田雅喜・鈴木和徳（2008）「調湿外壁による排湿効果の検討」『日本建築学会大会学術講演梗概集（中国）』291-292頁。
- [9] 細井昭憲・斉藤宏昭・澤地孝男（2005）「換気が先か調湿が先か」『建築技術』660号、148-149頁。
- [10] 本間義規（2005）「調湿材で過乾燥は防げるか」『建築技術』660号、157-159頁。
- [11] 小椋大輔・銚井修一（2005）「調湿材で表面結露は防げるのか」『建築技術』660号、154-156頁。
- [12] 南雄三（2005）「わかっているつものの調湿」『建築技術』660号、100-101頁。
- [13] 土屋喬雄（2005）「調湿系断熱材は内部結露に対して安全というが」『建築技術』660号、163-165頁。
- [14] 岩前篤（2005）「床下は調湿材が必要か」『建築技術』660号、152-153頁。
- [15] 光田恵（2005）「調湿でにおいが消せるのか」『建築技術』660号、168-170頁。
- [16] 本橋健司（2005）「シックハウス対策建材」『未来材料』5巻12号、24-29頁。
- [17] 日本セラミックス協会（2008）「業界動向 2007年度総論」。
http://www.ceramic.or.jp/cs/gyoukai_doukou/gyoukai_doukou_07/souron_2007.pdf
- [18] 細井昭憲・斉藤宏昭・澤地孝男（2005）「換気が先か調湿が先か」『建築技術』660号、148-149頁。
- [19] 西山孝・方堂毅・山田将巳・別所昌彦（2003）「シリカコーティングによる有害元素の流出防止に関する基礎的研究」『応用地質』43巻6号、390-395頁。
- [20] 能登谷恭一（2000）「珪藻土を用いた湿式仕上げ材料」『FINEX』2000年11月12日号、26-27頁。
- [21] 稚内産珪藻土材料の脱臭能に対する湿度の影響として、100ppm以下の実験では相対湿度が高いほど初期吸着速度および吸着速度定数が高いことが明らかにされた。菅野亨・川村啓介・小林正義・堀内淳一・多田清志（2002）「珪藻土材料の脱臭能に対する湿度の影響」『粘土科学討論会講演要旨集』46号、102-103頁。
- [22] 近藤照夫（2001）「地球環境に優しい塗り仕上げ珪藻土」『FINEX』2001年5月6日号、43-44頁。
- [23] 高山勝行・熊野康子・唐木卓哉（2002）「珪藻土建材の吸着性能・再放出性能に関する研究」『日本建築学会大会学術講演梗概集 構造系（A-1）』415-416頁。また、珪藻土塗り材のホルムアルデヒド吸着能と環境濃度低減効果を確認した研究もある。坂本新・岡田慎一郎（1999）「珪藻土壁材によるホルムアルデヒド低減に関する研究」『日本建築学会大会学術講演梗概集』773-774頁。天然素材のマグネシアからなるマグネシアセメントを結合材として、大量の珪藻土とゼオライトの混入が可能になるとされる。それにより、JIS A 6909規準値の約5倍の吸放湿量、代表的なアルデヒド類及びVOCの低減効果、悪臭の原因となる主な臭気成分の濃度低減効果が確認されている。室田昌彦・古賀一八・吉成拓也（2006）「室内環境の改善を目的としたマグネシアセメント系内装仕上材の開発」『日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）』1093-1094頁。
- [24] 佐藤真奈美（2005）「木材の調湿メカニズム」『建築技術』660号、136-139頁。
- [25] 金子友梨恵・伊坪徳宏・渡邊修（2007）「シックハウス症候群の影響を考慮したVOC吸着壁材の健康影響評価」武蔵工業大学環境情報学部2006年度卒業研究要旨。
<http://www.yc.tcu.ac.jp/itsubo-lab/Research/report/summary2006-03.pdf>
- [26] たとえば、新東北化学工業株式会社 (<http://www.s-zeolite.com/>)、ジークライト株式会社 (<http://www.zeeklite.co.jp/>) など。
- [27] <http://www.asahi-kasei.co.jp/maison/rent/performance/hebel/>
- [28] 前田雅喜ら（2003）「自律的調湿機能を有するアルミナ系建材の製造方法」特許第3469208号。
- [29] 西垣康広・鈴木憲司（2005）「消石灰及びセピオライトより成る調湿機能を有する新規壁材の基礎研究」『日本建築学会構造系論文集』588号、29-33頁。
- [30] 前田雅喜ら（2001）「自律的調湿機能を有する内装壁材の製造法」特許第3156003号。
- [31] 鈴木昭人（2008）「機能性建材（調湿等）（1998年～現在）」『セラミックス』43巻2号、132-134頁。
http://www.ceramic.or.jp/museum/contents/pdf/2008_02_03.pdf
- [32] 工業技術院名古屋工業技術研究所の発表による。鈴木産業株式会社（2006）「稚内層珪藻土調湿・消臭建材—稚内層珪藻土頁岩を利用した調湿・消臭材料について」『REFORM』23巻8号、51-55頁。
- [33] 工業技術院官民連帯共同研究制度「インテリジェント型調湿材料の開発に関する基礎研究」（1996年度～1999年度）研究成果概要集（2000）より。

- [34] 芝崎靖雄(2001)「吸脱着材料(自律型調湿材料の開発経緯と現状)」『ナノマテリアルの技術』普及版(2007年)、80-86頁所収。
- [35] http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2008/pr20081008_2/pr20081008_2.html
- [36] <http://www.todakogyo.co.jp/docs/news/menu091008.html>
- [37] 岩前篤(2005)「調湿材で夏の除湿はできるのか」『建築技術』660号、160-162頁。
- [38] 隈裕子・尾崎明仁・小笹(香川)治美・福田展淳(2008)「暖冷房負荷へ及ぼす壁体吸放湿の影響に関する研究—潜熱負荷の要因解析」『日本建築学会環境系論文集』73巻632号、1171-1178頁。
- [39] 銚井修一監修(2010)『快適な住環境のための調湿技術研究会』報告書』トステム建材産業振興財団、157頁。
- [40] 小川晴久ら(2009)「調湿建材の使用が室内環境及び人体に与える影響調査に関する研究」『室内環境』12巻2号、125-131頁。
- [41] 「建築物における衛生的環境の確保に関する法律施行令(昭和45年10月12日政令第304号、最終改正:平成16年3月19日政令第46号)」
- [42] 興水ヒカル・高橋美加・栃原裕(1997)「冷房時の室内外の温度差と滞在時間が人体生理反応に及ぼす影響 その2.二室間移動の自律神経系への影響」『日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)』393-394頁。
- [43] 磯田憲生・久保博子・梁瀬度子(1985)「冷房時における室内外気温の人体影響について」『日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)』565-566頁。磯田憲生・久保博子・早川和代・梁瀬度子(1987)「冷房時における室内外気温差の人体影響について(第2報 冷房温度26.5℃の場合)」『日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)』257-258頁。
- [44] 高橋美加・興水ヒカル・栃原裕(1997)「冷房時の室内外の温度差と滞在時間が人体生理反応に及ぼす影響 その1.二室間移動に伴う生理心理反応」『日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)』391-392頁。
- [45] 平松義久・垂水弘夫(2003)「冷房時の人体温冷感における湿度制御の有効性に関する研究—室温を28℃に設定した場合の湿度制御に関する検討」『日本建築学会北陸支部研究報告集』46号、173-176頁。
- [46] 西條泰明・吉田貴彦・岸玲子(2009)「シックハウス症候群への湿度環境・生物学的汚染の影響」『日本衛生学雑誌』64巻3号、665-671頁。田中かつ子・岸玲子・西條泰明ら(2009)「シックハウス症候群と住まい方—居住環境にかかわる疾病予防」『厚生学の指標』56巻7号、24-31頁。
- [47] 橋口邦夫・橋本賢二・赤尾勝(2007)「呼吸する建材で健康な病院に—化学物質過敏症や臭いの対応」『治療』89巻6号、2155-2163頁。
- [48] IARC(1997) IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 68: Silica, Some Silicates, Coal Dust and Para-Aramid Fibrils. International Agency for Research on Cancer, World Health Organization.
- [49] IARC (in prep) IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 100, Meeting C: Metals, Arsenic, Dusts and Fibres. International Agency for Research on Cancer, World Health Organization.
- [50] 珪藻土は粒子形状がアスベストと似ていることからドイツで使用が禁止されているとブログ等に記載されているが、情報源は明示されていない。
- [51] 国際化学物質安全性カード「けい藻土(未焼成品)」ICSC番号:0248。
<http://www.nihs.go.jp/ICSC/iccss-c/icss0248c.html>
- [52] その結果として、2000年11月に「疫学調査及び、動物実験からシリカの発がん性を的確に評価することは困難であり、現時点ではシリカそのものの発がん性に関しては引き続き情報収集に努めることが望ましいと考える」という報告をまとめた。労働省「職業がん対策専門家会議における物質の発がん性についての検討結果」2000年11月17日。
http://www.jil.go.jp/kisya/kijun/20001117_02_k/20001117_02_k_betten.html
- [53] 日本産業衛生学会許容濃度等に関する委員会(2001)「発がん物質暫定物質(2001)の提案理由:結晶質シリカ 発がん物質分類 第1群」『産業衛生学雑誌』43巻4号、133-144頁、2001年4月6日。引用は138頁。
- [54] 結論は以下の通りである。「結晶質シリカを含む粉じんのばく露を受けた集団に肺がんリスクが若干上昇していることは、その集団に含まれるじん肺有所見者群のリスク上昇や喫煙その他攪乱要因も影響していると考えられる。今回得られた疫学的結果からは、じん肺病変を介さない結晶質シリカそのものの発がん性を明らかな肯定する知見は得られなかった」。肺がんを併発するじん肺の健康管理等に関する検討会(2002)『肺がんを併発するじん肺の健康管理等に関する報告書』2002年10月1日。
- [55] 2008年3月の改正で「建築材料の吸放湿性試験方法」と名称が改められたほか、国際規格との整合、適用範囲・試験方法の見直しなどがなされた。
http://www.jtccm.or.jp/library/jtccm/public/mokuji08/kikansi/0806_kikakukijyun.pdf
- [56] 黒木勝一(2005)「調湿性の測定方法と規格」『建築技術』660号、128-131頁。
- [57] 本橋健司(2005)「シックハウス対策建材と光触媒」『Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan』12巻(315号)、143-147頁。
- [58] 朴天吉・梅干野晃・尹聖婉(2002)「『息をする壁体』の年間にわたる自然換気・断熱・透湿性能」『2001年度日本建築学会関東支部研究報告集Ⅰ, 材料・施工・構造・防火・環境工学』72号、525-528頁。
- [59] 聯合ニュース「会社員の5割以上、夏場に『冷房病』を経験」2010年7月13日。

TA Note

Technology Assessment Note

技術の社会的影響評価

<http://www.i2ta.org/>

発行 **i2ta**
発行日 2011年1月7日
執筆・作成 i2taプロジェクト・ナノテクTA実践グループ・エネルギーチーム
吉澤剛・山口健介
デザイン 中島剛

I2TAグループ 連絡先
〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1 法文1号館23番教室
東京大学公共政策大学院内
Tel: 03-5841-7846 Fax: 03-5841-7880
E-mail: info@i2ta.org