アロフェン系調湿建材に関する研究 —数値シミュレーションによる調湿性能設計—

服 部 和 彦^{1,3}・福 水 浩 史²
野 上 正 行³

Study on a New Humidity Controlling Material Porous Soil “Allophane” —Design of Humidity Controlling Performance by Numerical Simulation—

Kazuhiko HATTORI^{1,3}, Hiroshi FUKUMIZU² and Masayuki NOGAMI³

¹INAX Corporation, General Research Institute of Technology, Aichi 479-0848, Japan

²INAX Corporation, Product Development Office, Tile & Building Materials Division, Aichi 479-0002, Japan

³Nagoya Institute of Technology, Department of Materials Science and Engineering, Aichi 466-8555, Japan

Japanese houses have been highly airtight and shut out the fresh air. Therefore, the quality of indoor air becomes inferior. The problems related to the damp of indoor environment have been increased with the change of lifestyles and architectural methods. Humidity control building material using porous soil “allophane” has been developed to control humidity environment in living space. Numerical simulation method based on heat and moisture transfer model was studied to estimate performance of humidity control material in various living space. It was found that building material could decrease humidity changes and inhibit overdry.

Key words: ceramic raw material, allophane, humidity controlling material, humidity control property, numerical simulation

1. はじめに

近年の日本の住宅は快適性と省エネルギーの両立をめざし、高气密、高断熱化が進んでいる。特に省エネルギーは地球温暖化防止の観点からも重要な課題であり、断熱・気密性能が次世代省エネルギー基準として定められている。しかしながら、我が国はアジアモンスーン地域に位置し、夏などは非常に蒸し暑く、また冬は寒く乾燥する気候条件である。さらに、住宅の内装材としてビニールクロスなど吸放湿性能が乏しい材料が多用されるため、住宅の高气密、高断熱化により、高湿度あるいは過乾燥といった湿度環境に陥りやすく、結露の発生やアレルギー疾患の原因といわれるカビ、ダニの発生などの問題がクローズアップされてきている。これらの問題の対策はエアコンなど機械設備が主流となっているが、これら

はエネルギーが必要であり、必ずしも最良の方法とは言えない。

これら湿度環境問題の解決のため、我々はエネルギーを使用せずに湿度調整ができる建材（調湿建材）の開発を行ってきた。アロフェンという多くの微細な孔を持つ火山灰起源の粘土鉱物を用いており、木材以上の吸放湿性能を持っている。試験棟での模擬実験ながら、本建材を住空間に使用する事で結露抑制などの効果がある事が明かにされている^{1,2)}。また、開発した建材の調湿性能が非線形の局所平衡熱水分同時移動方程式により精度良く予測できる事をガラスデシケータ試験との比較により明らかにした³⁾。この結果を踏まえ、実際の住空間を想定し、様々な住まい方や季節による湿度変動を数値シミュレーションにより予測した。実空間を利用した模擬試験は長時間に及び、また実験設備も大がかりなものが必要で、多数の実験をすることは難しく、住環境も住まい方により様々な変化する。このように様々な条件下での調湿建材の性能を予測するためには数値シミュレーションの利用は有用である。本報では開発した調湿建材を使った住空間の調湿性能設計について報告する。

キーワード: セラミックス原料, アロフェン, 調湿材料, 調湿特性, 数値シミュレーション

¹ 株式会社 INAX 総合技術研究所

² 株式会社 INAX タイル建材事業部商品開発室

³ 名古屋工業大学環境材料工学科

平成 17 年 10 月 4 日受理

2. アロフェン系調湿建材について

2.1 調湿建材作製方法

主要原料として使用したアロフェンは、火山灰土壌にしばしば含まれ、Si-O-Al 結合が不規則に配列している非晶質粘土鉱物であり、ナノメートルサイズの微細な細孔を多く持っている⁴⁾。アロフェンを多く含む「鹿沼土」(栃木県鹿沼市周辺で産出する)と一般の陶磁器原料の粘土などを調合・成形し、900℃程度の低温で焼成することによって調湿建材を得ることができる。

2.2 調湿建材の材料物性

上記の方法で作製した調湿建材の湿気容量を Fig. 1 に示す。湿気容量とは平衡吸湿量を相対湿度で微分した値であり、材料の調湿性能を示す重要な物性値である。高湿度領域で急激に湿気容量が大きくなり、開発した建材が大きな調湿性能を持っている事が分かる。

平衡吸湿量は、サンプルを 60℃で乾燥後、所定の相対湿度にされた 25℃の恒温恒湿槽中に入れ、重量が平衡に達した値から求めた。重量増加が 0.1 wt%/day 以下になったところで平衡に達したという判断をした。なおこの平衡吸湿量の測定は、吸湿過程で行った。

その他シミュレーションに使用した値を Table 1 に示す。

3. 数値シミュレーションについて

3.1 計算方法

材料の調湿性能は材料内の湿気拡散により発現する。結露が生じない領域(ハイグロスコピック)では材料中

※kg/m³RH: 材料の平衡吸湿量増加に必要な単位体積、単位相対湿度あたりの湿気重量を示す

Fig. 1 Moisture capacity of building material.

Table 1 Material properties for numerical simulation

熱伝導率 W/mK	9.51E-2
密度 kg/m³	1.74E3
定積比熱 J/m³ K	5.7E5
湿気伝導率 kg/msec (kg/kg')	1.65E-6
空隙率	0.35
表面熱伝達係数 J/m² sec K	9.44
表面湿気伝達係数 kg/m² sec (kg/kg')	4.44

の水分移動は湿気拡散が支配的であり、その振る舞いは熱水分同時移動方程式で表すことができる⁵⁾。局所平衡熱水分同時移動方程式は熱拡散式(1)と水分拡散式(2)から構成される。式(1)、(2)から材料中の熱と湿気の移動量を求め、材料と住空間との間の熱と湿気(人や器具からの湿気発生や外気との換気による湿気変動も含む)の収支式を計算し、住空間の湿度変動を求める。

(1)、(2)式を材料厚さ方向1次元の有限差分法で計算した。厚み方向を0.5mmに分割し、時間刻み0.1秒の陽解法を採用した。初期条件として、材料の温度、湿気量を均一(初期室内温湿度)とした。また、境界条件として材料表面側を熱伝達、湿気伝達境界とし、材料裏面側を断熱、断湿とした。

$$C \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \gamma \frac{\partial w}{\partial t} \quad (1)$$

$$C_a' r_a' \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial t} = \lambda' \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \quad (2)$$

C: specific heat

λ: heat conductivity

γ: latent heat

C_a': moisture capacity of air

r_a': pore ratio

λ': vapor conductivity

w: moisture capacity

θ: temperature

H: absolute humidity

t: time

開発した建材は大きな湿気容量を持っており、その大きさは Fig. 1 から相対湿度に対して非線形で変化する事が分かる。そこで(1)、(2)式中の $\partial w / \partial t$ を変数分離し(3)式、湿気に関する物性値を(4)、(5)式で与えた。

$$\partial w / \partial t = dw/dH \cdot dH/dt + dw/d\theta \cdot d\theta/dt \quad (3)$$

$$\kappa = dw/dH = dw/d(RH) \times 1/Hs \quad (4)$$

$$v = dw/d\theta = dw/d(RH) \times H \times d(1/Hs)/d\theta \quad (5)$$

w: moisture capacity

RH: relative humidity

Hs: saturated absolute humidity

H: absolute humidity

 θ : temperature

3.2 シミュレーションと実験との比較

実験装置を Fig. 2 に示す。Fig. 2 に示す様に調湿建材を恒温恒湿槽に静置し、所定の温湿度で平衡状態にする。密封したガラス容器（容積約 0.011 m³）内に平衡状態になった調湿建材（面積 0.0056 m²：気積比 0.5 m⁻¹）を静置し、そのガラス容器を恒温恒湿槽に入れ、所定の温度変動を与えた場合のガラス容器内の温湿度状況を測定した。温度変動は 1°C/hour の降温，昇温を設定した。ガラス容器内にセンサーを入れ、温湿度を測定間隔 10 分でデータストッカーに取り込んだ。

実験とシミュレーションの湿度変動を比較した結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3 から実験とシミュレーションは良好な対応を示し、シミュレーション方法が妥当である事がわかる。

Fig. 2 Experimental apparatus.

Fig. 3 Comparison between experiment and calculation.

4. 様々な住空間の調湿設計

4.1 シミュレーション条件

調湿設計を行うにあたり、モデルとなる住空間を想定した。設定した条件を Table 2 に示す。空間広さ 32 m³ は 8 畳に相当する。自然換気回数は高気密住宅の標準的な値を設定した。調湿建材の施工面積については、施工面積と調湿性能の関係を調べるため 3 水準を設定した。32 m³ の空間に対し、建材施工面積 9 m² は空間を構成する内壁の 1 面全面施工に相当する。

住空間は寝室を想定した。寝室は空調設備を使う事が少なく、冬季の早朝の窓面結露など湿度問題が顕著に表れる空間であり、調湿建材の効果が期待できる。寝室の生活パターンを基に、外気、室内温度、加湿条件を設定した。設定条件を Table 3 に示す。22:00～翌 6:00 まで人が在室するとして加湿（60 g/hour、人体から発生）を設定し、日中は在室していないという設定で加湿しない。室内温度に関しては、空調設備を使用しないという条件で、各季節の最高温度、最低温度を設定し、正弦関数をもとにしたモデルで変動させた。また、外気湿度は、冬は 1 月の平均温湿度、夏は 7 月の平均温湿度を参考に設定した。

4.2 シミュレーション結果（調湿設計）

冬季のシミュレーション結果を Fig. 4 に、夏季のシミュレーション結果を Fig. 5 に示す。Fig. 4, 5 より、冬季、

Table 2 Simulation condition

空間広さ m ³	32
調湿建材施工面積 m ²	9, 18, 27
換気回数 回/hour	0.5

Fig. 4 Calculation Results (in case of Winter).

Table 3 Simulation condition (living condition)

季節	外気, 室内温度
冬	<ul style="list-style-type: none"> ・初期室内湿度 (AM6:00) : 8°C, RH70% ・外気湿度 : 0.0039 kg/kg* (6°C, RH66%相当) ・室内温度変動 : 8°C ~ 18°C
夏 (梅雨)	<ul style="list-style-type: none"> ・初期室内湿度 (AM6:00) : 25°C, RH70% ・外気湿度 : 0.0178 kg/kg* (25°C, RH80%相当) ・室内温度変動 : 25°C ~ 30°C

*kg/kg: 乾燥空気中に含まれる湿気重量を表す

Fig. 5 Calculation Results (in case of Summer).

夏期のいずれもブランク (比較: 調湿建材なし) に比べ、調湿建材を施工した場合は湿度変動が抑えられており、調湿効果が表れている事が分かる。

ブランク、調湿建材を施工した場合とも、6:00 から 14:00 までの温度上昇により相対湿度が低下し、14:00 以降の温度低下により相対湿度が上昇、特に 22:00 以降は人からの水蒸気発生により、急激に相対湿度が上昇する傾向を示している事が分かる。冬期においてはブランクでは温度が高い昼間に、相対湿度 40%以下の過乾燥状態

を示すが、調湿建材を施工した場合では相対湿度が 40%を超えており、過乾燥を抑制する効果が期待できる事が分かる。また、就寝時 (22:00 ~翌 6:00) において、調湿建材を施工した場合には、相対湿度の急激な上昇を抑えており、窓面結露の軽減効果も期待できる事が分かる。さらに、温度変化や湿度発生により、ブランクでは急激に相対湿度が変動するのに対して、調湿建材を施工した場合には相対湿度の変動を抑制しており、調湿性能を発揮していることがわかる。

夏期は冬期に比べ温度変動が少ないため、湿度変動幅が小さいものの、調湿建材を施工する事で湿度変動を抑える事ができる事が分かる。特に就寝時 (22:00 ~翌 6:00) において、ブランクでは相対湿度 90%以上に示すのに対して、調湿建材を施工した場合には、相対湿度の上昇が 5 ~ 15%程度抑えられていることが分かる。就寝時の湿度環境を改善することから、夏のジメジメ感が軽減され、寝苦しさを緩和する効果が期待できる。

Table 4 に室内相対湿度の変動状況として、各季節モデルでのシミュレーションで求めた最高相対湿度、最低相対湿度ならびに湿度変動幅を示す。冬・夏モデルとも、調湿建材を施工した場合の最高相対湿度はブランクと比較して 10 ~ 20%低下しており、高湿度抑制効果が働いていることが分かる。また、最低相対湿度を見ると、過乾燥が問題となる冬期においては、ブランクと比較して調湿建材を施工する事で 10 ~ 20%最低相対湿度が上昇しており、過乾燥緩和効果が期待できる事が分かる。

施工面積と調湿性能の関係は、施工面積の増加に伴い、調湿効果が大きくなっている事が分かる。調湿建材を 9 m² 施工した場合に大きな調湿効果が得られているが、18 m² 施工と 27m² 施工では湿度変動幅にそれほど大きな差がなく、施工面積と調湿効果の関係が比例しない事が分かり、適切な調湿効果を得るために過剰に調湿建材を施工する必要がない事が分かる。

調湿建材を施工する事により、年間を通じて、極端な高湿度や低湿度環境になりにくくし、湿度環境をより良い状態に改善する効果が期待できる事が分かった。

Table 4 Simulation results (fluctuation band of relative humidity changes)

	施工面積 (m ²)	温度変動幅 (°C)	湿度変動幅 (%)	最低湿度 (%)	最高湿度 (%)
夏	ブランク	5.0	30.6	62.1	92.7
	9	5.0	21.5	64.4	85.9
	18	5.0	15.8	65.9	81.7
	27	5.0	12.5	66.8	79.3
冬	ブランク	10.0	58.3	35.3	93.6
	9	10.0	36.6	43.6	80.2
	18	10.0	26.0	49.0	75.0
	27	10.0	20.2	52.8	73.0

5. ま と め

火山灰起源の多孔質な粘土鉱物であるアロフェンを用いた調湿建材を住空間に施工した場合の湿度調整能力を非線形物性値の局所平衡熱水分同時移動方程式にもとづいた数値シミュレーションにより予測し、評価した。その結果、調湿建材を使用することによって、相対湿度の変動を抑制し、夏のジメジメ感や冬期の結露、過乾燥を抑制する効果が期待できることが分かった。また、施工面積と調湿性能は比例関係になく、過度に調湿建材を施工しなくても適切な調湿性能を得られることも分かった。

この様なエネルギーを使わない新たな湿度制御方法として、調湿建材を建築空間で普及させるためには、より

実際の生活を詳細に反映したシミュレーション方法の構築が必要となる。今後、試験棟や実住宅でのフィールドデータを利用して、シミュレーション手法の検証と精度向上を進める予定である。

References

- 1) H. Fukumizu and S. Yokoyama: Nihon Kenchikugakkai Taikai Kyogaishu, **D2**, pp.255–256 (1999)
- 2) H. Fukumizu and S. Yokoyama: Nihon Kenchikugakkai Gijutsu Hokokushu, **10**, pp.21–24 (2000)
- 3) K. Hattori, H. Fukumizu, S. Yokoyama, T. Ohsawa: Transactions of the Materials Research Society of Japan, **25** [2], pp.605–607 (2000)
- 4) A. Henmi: Nendo Kagaku, **31** [2], pp.75–81 (1991)
- 5) M. Matsumoto: dissertation 11 (1978)