

塩化カルシウム含浸珪藻土粒を用いた吸放湿型除湿・熱交換換気装置の開発とその性能把握

DEVELOPMENT OF VENTILATION DEVICES FOR MOISTURE-ABSORBENT DEHUMIDIFICATION AND HEAT EXCHANGE BY USING THE DIATOMITE SOAKED WITH CaCl_2

繪内正道 —*1 大橋正知 —*2
荒谷 登 —*3 羽山広文 —*4
森 太郎 —*5

Masamichi ENAI —*1 Masanori OHASHI —*2
Noboru ARATANI —*3 Hirofumi HAYAMA —*4
Taro MORI —*5

キーワード：
珪藻土, 湿気吸収, 除湿機, 熱交換, 換気装置

Keywords:
Diatomite, Moisture absorbent, Dehumidifier, Heat exchange, Ventilation devices

Diatomite is a famous material for efficient moisture absorbent. We can control humidity level in room air by using it. In this study, the performance of ventilation devices for moisture-absorbent dehumidification and heat exchange was developed and tested by using the diatomite saturated with CaCl_2 .

1. はじめに

夏期に冷涼な地域の低負荷建物では、搬送動力の小さい水系設備(床冷房)による顕熱除去と、換気・空調設備による全量外気の潜熱(除湿)処理を計画することができる。除湿には、ヒートポンプの蒸発器で結露させる直接冷却方式と吸放湿材による吸湿方式がある。土壁や畳などに代表される吸放湿材は、居室内の湿気変動を緩和させるが、より積極的に換気装置に吸放湿材を組み込むことで、低負荷建物の本格的な湿度調整が可能になってくる。

本研究では、住宅を対象にした通年の温湿度改善を目的として、吸放湿性能に優れた珪藻土(稚内珪質頁岩を使用)を用いた吸放湿型除湿・熱交換換気装置を試作し、性能試験を行なった。

2. 吸放湿型除湿・熱交換換気装置の開発

2-1 除湿・熱交換換気装置の概要

開発装置の概要を図1に示す。換気装置は粒状の珪藻土をパッケージ化した2個のCELLと2台の切り替えダンパーで構成される。

夏季には、換気の流れを連続的に確保しながら、1つのCELL内で新鮮外気を除湿して室内へ送り込む吸湿行程が行われ、もう一方のCELL内で室内から取り込んだ汚染空気を加熱し、珪藻土粒に蓄積されている湿気を放湿させながら屋外へ排気する放湿行程が行われる。加熱には太陽熱(日中)と電熱(雨天や夜間)を利用し、周期的に

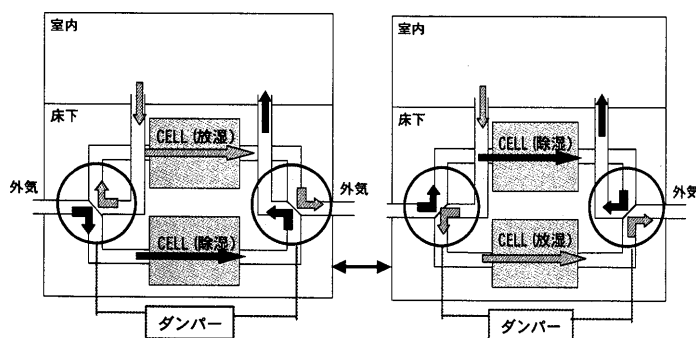


図1 開発装置の概念図

ダンパーを切り替えることで、1つのCELL内で吸湿と放湿を交互に繰り返し、吸放湿型除湿換気を行う¹⁾。

冬期には、1つのCELL内で室内から取り込んだ排気熱を蓄熱し、もう一方のCELL内では冷たい外気の予熱が行なわれる。周期的にダンパーを切り替えることで、1つのCELL内で蓄熱行程と放熱行程を交互に繰り返し、熱交換換気を行う。

2-2 通気性能の把握

本換気装置は、CELL部の通気抵抗が少ない程、送風機の消費電力を軽減できるので、実用化の可能性が広がってくる。珪質頁岩を粉砕し、粒径を可能な限り揃えてパッケージ化した場合と、図2示すように径と形状が揃ったゴルフボール大の吸放湿ボールをパッケージ化した場合との通気特性を比較した。ゴルフボール大の吸放湿ボールは次のような手順で製作した。珪質頁岩の粉体とバインダー用粘土を重量比85:15の割合で配合し、傾斜型回転パン型造粒機を用いて粒径8mmの球状の珪藻土粒を作り、600℃で24時間焼成後、常温まで冷却し、吸放湿性能を向上させるため、塩化カルシウムを含浸させた。吸放湿ボールは、ナイロン製の網を用い、焼成含浸珪藻土粒を詰めて直径を45mmになるように作成した。焼成含浸珪藻土粒は105℃で乾燥させ、常温まで冷却し、幾つかの市販製品の中か

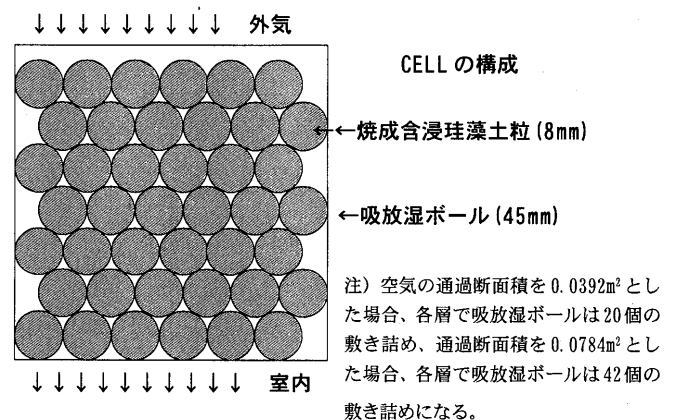


図2 吸放湿ボールのセット

*1 北海道大学大学院工学研究科 教授・工博
(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

*2 榊大林組 修士(工学)

*3 北海道大学 名誉教授・工博

*4 北海道大学大学院工学研究科 助教授・博士(工学)

*5 北海道大学大学院工学研究科 助手・博士(工学)

*1 Prof., Graduate School of Engineering, Hokkaido Univ., Dr. Eng.

*2 Obayashi Corporation, M. Eng.

*3 Prof. Emeritus, Hokkaido University, Dr. Eng.

*4 Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Hokkaido Univ., Dr. Eng.

*5 Instructor, Graduate School of Engineering, Hokkaido Univ., Dr. Eng.

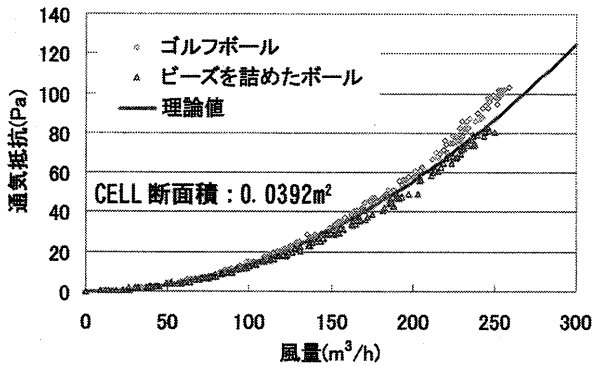


図3 模擬球体の通気抵抗 (3層の敷き詰め)

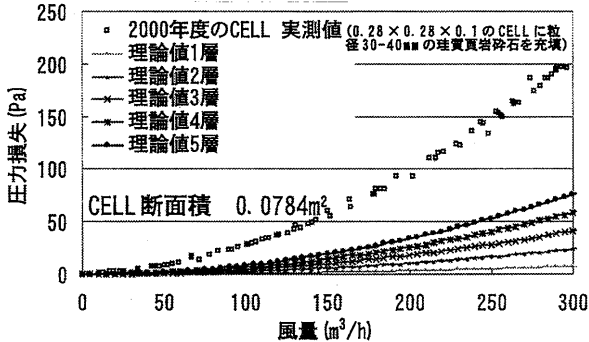


図4 CELLの通気抵抗の比較 (CELL長: 0.1m)

ら釣り用の「こまセネット」を採択して、焼成含浸珪藻土粒を球状に詰め込むことにした。

ゴルフボールをCELLに詰め込んだ場合の通気抵抗と、同径のビーズを詰めたボール (吸放湿ボールの代替球) の通気抵抗を図3に示す。図2のように球形粒子がCELL内で規則配列をしていると仮定し、Steinourの式から空隙率関数を求めて^{4),5)}、圧力損失を推定した結果も併記しているが、解析的に推定した結果と実測結果は概ね一致した。その結果、焼成含浸珪藻土粒を詰め、径と形状を整えた吸放湿ボールを使用した場合には、図3の結果を用い、図4のようにCELLの通気抵抗を、CELLの断面積と吸放湿ボールの想定層数に応じて算定することができる。

1住戸の取り入れ外気量を150m³/hとして、珪質頁岩を粉碎し、可能な限り粒径を揃えてパッケージ化した2000年度の通気抵抗と比較すると、径と形状が揃ったゴルフボール大の吸放湿ボールをパッケージ化した場合の通気抵抗は、約1/5に軽減された。

2-3 吸放湿性能の把握

断面積0.0392m²のCELLを用い、相対湿度80%・温度25℃の空気を除湿側に、相対湿度50%・温度25℃の空気を放湿側に給気し、風量とダンパー切り替え周期と吸放湿ボールの敷き詰め層数を変えながらCELL通過前後の湿湿度を測定した。

吸放湿性能を表わす指標として、固体材料内の水分状態を表す水分化学ポテンシャル (式1) を用い、

$$\mu = R_v \cdot T \cdot \ln(P_v/P_{vs}) \quad (1)$$

μ : 水分化学ポテンシャル [kg/J] T : 温度 [°C] P_v : 水蒸気圧 [Pa] P_{vs} : 飽和水蒸気圧 [Pa] R_v : 水蒸気のガス常数 [Pa・m³/(kg・K)]
水分化学ポテンシャル交換効率 = (除湿前後の水分化学ポテンシャル差 / (除湿前の水分化学ポテンシャル - 放湿前の平均水分化学ポテンシャル)) を使用した。吸放湿性能を表わす指標として水分化学ポテンシャルを採用した理由は、相対湿度を使用するよりも水分化学ポテンシャルを使用する方が理論的に厳密であると考えたためである。

実験結果から水分化学ポテンシャル交換効率を推定し、無次元時間 η を横軸にして、交換効率の検討を試みた (図5~7)。

また、無次元時間 η には式2を与えている。

$$\eta = t/t_d \quad (2)$$

η : 無次元時間 (-) t : 滞留時間 [s] t_d : ダンパー切り替え時間 [s]
滞留時間 t はCELLを通過する時間であり、次式になる。

$$t = d/v \quad (3)$$

t : 滞留時間 [s] d : CELLの厚さ [m] v : 風速 [m/s]

ダンパー切り替え直後は、ダンパーをはじめとする付属機器への熱移動など (非定常状態) の影響が現れる。図6に示す○印の付いた結果は、切り替え周期を最短の15分とした場合の交換効率を表し

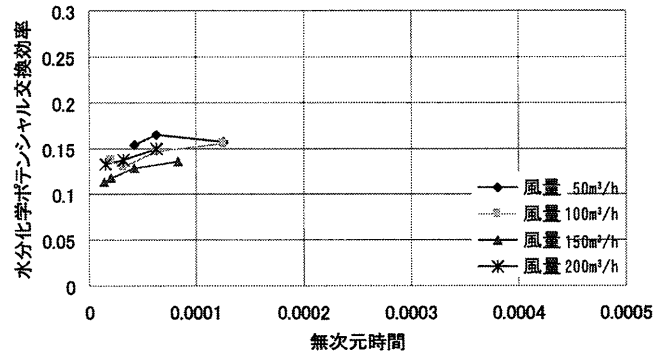


図5 水分化学ポテンシャル交換効率 (2層)

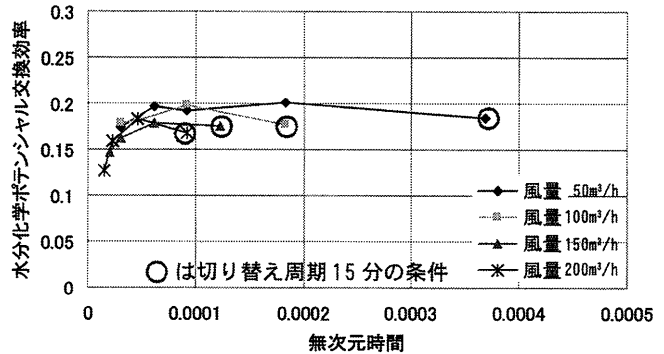


図6 水分化学ポテンシャル交換効率 (3層)

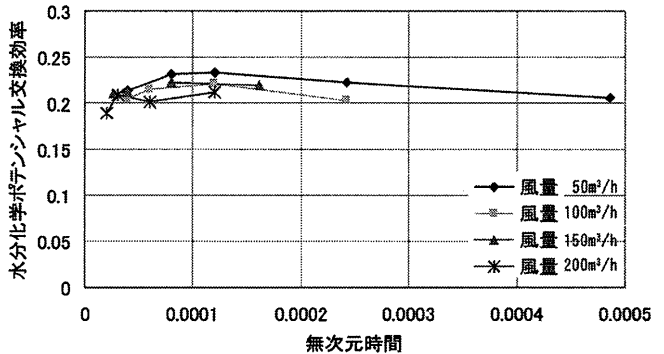


図7 水分化学ポテンシャル交換効率 (4層)

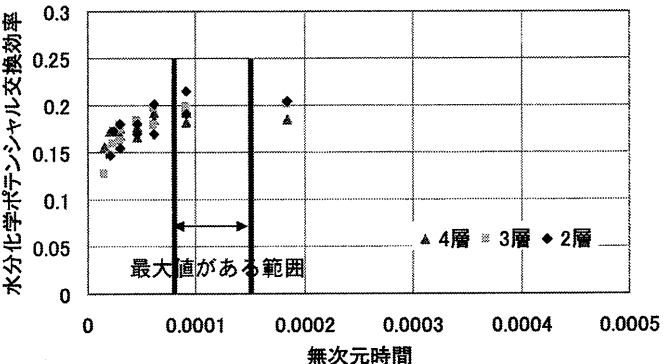


図8 交換効率の最大値がある範囲 (3層に換算評価)

ているが、このような交換効率の低下は、温湿度一定の空気をCELLに送り込む状態になるために、数分を要した結果と考えられる。

水分交換効率を最大にする無次元時間 (η_{max}) があると仮定すると、区間 $0 < \eta < \eta_{max}$ では、 η が0に限りなく近づけば近づくほど、風速が非常に速くなり、有効な物質伝達の機会が減少し、交換効率は0に近づく(滞留時間の短縮現象)。区間 $\eta_{max} < \eta < \infty$ では、無次元時間 η が ∞ に限りなく近づけば近づくほど、ダンパーの切り替え周期が非常に短くなり、交換効率は0に近づく。

以上の推論から、水分化学ポテンシャル交換効率は、無次元時間上で同一線上にあり、その線上に交換効率を最大にするポイントが存在すると考えることができる。

上述の推論の是非を検証するために、2層と4層の交換効率を3層の交換効率への置き換えを試みた。図8に3層に置換した時の、無次元時間と水分化学ポテンシャル交換効率を示す。ばらつきはあるものの傾向は類似的で、水分化学ポテンシャルは概ね同一線上にあることが見てとれる。本除湿型換気装置の交換効率の最大値は、概ね無次元時間で、0.0008~0.00015の範囲にあると考えられる。

無次元時間の範囲をかなり広くとっているように思われるが、この範囲内では、交換効率の値がそれ程変化しないため、実際に装置を運転する際には、システムや使用(管理)者側の都合に合わせて切り替え時間を設定すれば良く、実用化に際し、大変都合が良い特性と言える。ただし、切り替え時間を短縮(例えば15分)すると、水分ポテンシャルが期待値よりも下回るようになることから、切り替え周期が30分以下と推定された場合にも、30分に設定することが望ましいと考える。

3. 数値解析による換気装置の吸放湿性能把握

3-1 CELL 通過前後の空気性状のモデル化

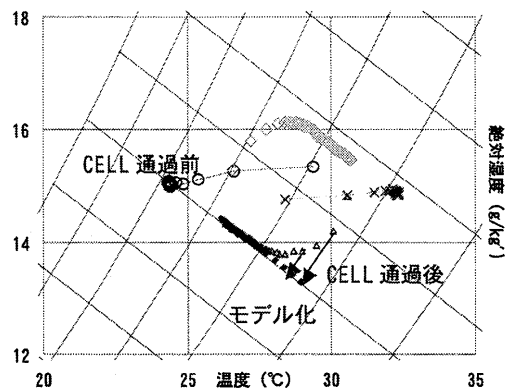
CELL断面積を 0.0784m^2 として、吸放湿ボールを4層敷き詰めた時の吸放湿型除湿・熱交換換気装置の夏期の吸放湿性能を数値解析の方から検討した。CELL通過前後の空気性状を空気線図上に表すと、図9に示すように変化する。吸放湿型除湿・熱交換換気装置の水分化学ポテンシャル交換効率を0.23とし、一定と仮定してその値からCELL通過後の空気の水分化学ポテンシャルを求め、CELL通過後の空気状態が、CELL通過前の等エンタルピー線上にあると想定することで、通過空気の温湿度変化をモデル化した。CELL通過後の空気が等エンタルピー線上に乗る迄の時間は非常に短い(ダンパー切り替え時間間隔を十分にとる)と仮定して、装置の熱容量などの影響は無視して解析を進めている²⁾。

3-2 解析対象住戸・外界条件・生活状況のモデル化

解析対象住戸を図10に示す。解析は吸放湿型除湿・熱交換換気装置を設置する床下、その上階の居室部の2室モデルで行った。壁体の非定常伝熱に関しては、逐次積分法(分割時間0.1時間)を用い、換気装置の吸放湿量と消費電力量の検討を主目的にしたため、壁体の吸放湿を無視した簡易解析を行っている。外気取り入れ量は $150\text{m}^3/\text{h}$ 、隙間換気量は0.1回/hとした。壁の仕様を表1に示す。

最暑期を想定し、外気温、外気相対湿度、日射量はHASP-SAPPOROの7月26日から8月7日のデータを時刻別に平均化し、これを周期的非定常解析用の外環境設定条件として使用した。外界条件、室内の生活状況の詳細を表2に示す。

表3に示すように、CELL内の湿気を放湿させるため、屋内排気の再加熱用の主熱源を、日中はソーラーパネル(日射吸収率=0.7、上面の総合熱伝達率=23 W/(m²K)、ダクト周壁完全断熱)、夜間はヒートコイル(電熱)とした場合①と、夜間にヒートポンプ(COP=3)を使用し、取り入れ外気の冷却源としても利用した場合②の2パターンについて検討した。ソーラーパネルは最大で約8℃上昇させ、アースチューブは最大で約2℃冷却して換気装置に空気を送り込めることが分かった。室温変動、相対湿度変動、時間当たり平均除湿量の



注) ↓はモデル化したCELL通過後の空気性状を表す。解析に際し、ダンパーなど装置の熱容量による時間遅れを無視したモデル化を試みている。

図9 CELL 通過前後の空気性状のモデル化

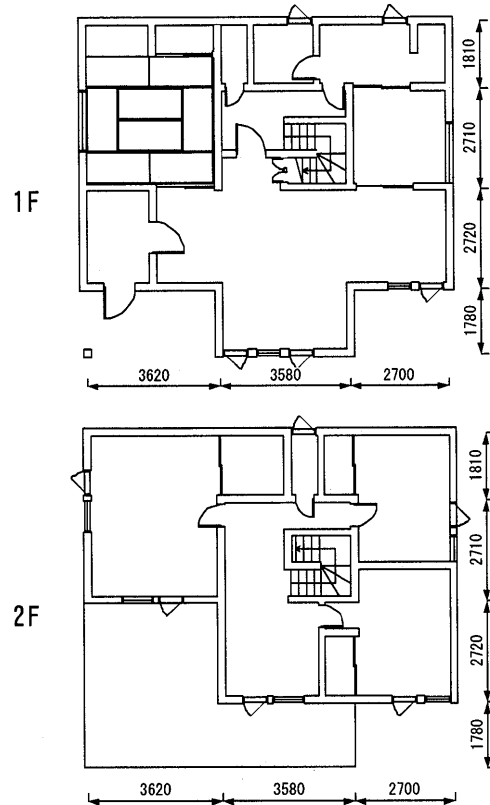
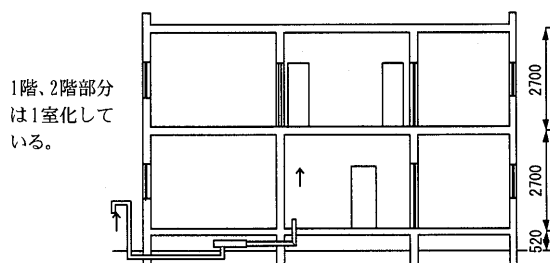


図10 解析対象住戸の平面図



注) 換気装置はスペースをとるので、床下設置とし、床下空間を1室化している。高湿度になる程、吸湿性能が向上するので、新鮮外気はアースチューブ経由で換気装置に取り入れる。汚染空気(used air)は、上階居室から換気装置に取り込み、湿気(熱)回収後に、屋外に排出する。ヒートポンプを併用した場合、圧縮機を補助予熱源として機能させるとともに、蒸発器は外気を更に高湿化するための補助予冷源として利用することが可能になる。

図11 解析対象住戸の断面図・換気システム図

表1 対象住戸の壁仕様

部位	材質	厚さ[mm]	材質	厚さ[mm]
屋根	石膏ボード	9.5	床下	鉄筋コンクリート
	セルローズファイバー	200		モルタル
	中空層	150	基礎	鉄筋コンクリート
	野地板	12	間仕切壁	石膏ボード
外壁	発泡ポリスチレン	25	中空層	石膏ボード
	石膏ボード	12.5	中空層	石膏ボード
	グラスウール	100	1F床	パーティクルボード
	通気層	12	窓	発泡ポリスチレン
	シーリングボード	12		複層ガラス
	外装	18		

表2 外界条件および滞在者数、室内発熱量

時刻	外気温度 [°C]	外気相対 湿度[%]	法線面直達 日射量[W/m ²]	水平面拡散 日射量[W/m ²]	滞在人 数[人]	室内発 生熱[W]	照明 熱[W]
1	21.4	89	0	0	4	142	0
2	21.2	90	0	0	4	142	0
3	21.1	89	0	0	4	142	0
4	21.1	89	0	0	4	142	0
5	21.2	88	25	28	4	142	0
6	22.4	83	187	76	4	142	0
7	23.7	76	417	105	4	405	0
8	24.9	72	478	124	3	242	0
9	26.2	68	570	133	3	242	0
10	26.9	66	575	142	3	358	0
11	27.6	64	536	144	3	358	0
12	27.9	64	494	147	2	405	0
13	28.0	64	577	146	2	242	0
14	28.0	64	554	138	1	242	0
15	27.4	66	471	124	1	242	0
16	26.7	69	372	110	3	242	0
17	25.8	73	213	86	3	242	150
18	24.5	78	19	37	3	893	150
19	23.8	80	0	3	4	242	150
20	23.7	82	0	0	4	242	150
21	23.0	84	0	0	4	474	150
22	22.7	85	0	0	4	142	0
23	22.4	86	0	0	4	142	0
24	21.9	88	0	0	4	142	0

注) 一人あたり人体発熱52W(安静時)、55W(軽作業時)
一人あたり水蒸気発生量61g/h(安静時)、77g/h(軽作業時)⁶⁾

表3 シミュレーションパターン

①	吸湿行程	冷却源	補助冷却源	除湿
	放湿行程	アースチューブ	無し	珪藻土CELL
	吸湿行程	予熱源	補助予熱源	放湿
	放湿行程	ソーラーパネル	ヒートコイル	珪藻土CELL
②	吸湿行程	冷却源	補助冷却源	除湿
	放湿行程	アースチューブ	ヒートポンプ	珪藻土CELL
	吸湿行程	予熱源	補助予熱源	放湿
	放湿行程	ソーラーパネル	ヒートポンプ	珪藻土CELL

推移を、図12、図13、図14に示す。パターン①の場合には、非運転時よりも、終日、珪藻土への吸着熱によって室内温度は高めに推移する。相対湿度は日中よりも、夜間の方が低めに推移することが分かる。吸放湿型除湿・熱交換換気装置は、日中よりも外気湿度が高くなる夜間に除湿効果が高くなる事が明らかとなった³⁾。

表4に各仕様毎の消費電力量と除湿量を示す。珪藻土から夜間に除湿のために必要となる補助予熱(電熱)量は、ヒートポンプを使用することで大幅に低減し、除湿量を86%増大させることができる。径と形状を揃えた吸放湿ボールを使用すると、送風電力量は、総電力消費量の30%から50%に抑ええることが可能になってくる。

4. おわりに

塩化カルシウム含浸珪藻土粒径の規格化に繋がる吸放湿ボールを提案し、吸放湿ボールを敷き詰める面積・層数の選択など、吸放湿型除湿・熱交換換気装置の設計を容易にする基礎的検討を行った。
1) 径と形状を球状に揃えた吸放湿ボールを敷き詰めたCELLの通気特性を明らかにし、その有効性を確認した。
2) 水分化学ポテンシャル交換効率と無次元時間の関係を明らかにして、最大効率範囲を特定した。
3) 数値解析を用い、最暑期の温湿度環境と除湿量を推定し、実用化に繋がる基礎的な検討資料を得た。熱交換特性は次報で検討する。

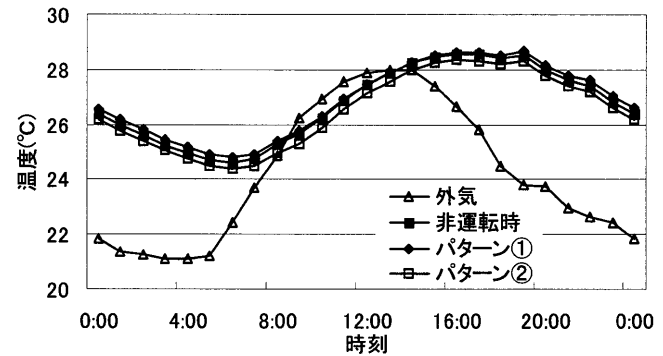


図12 上階居室の温度変動の推移

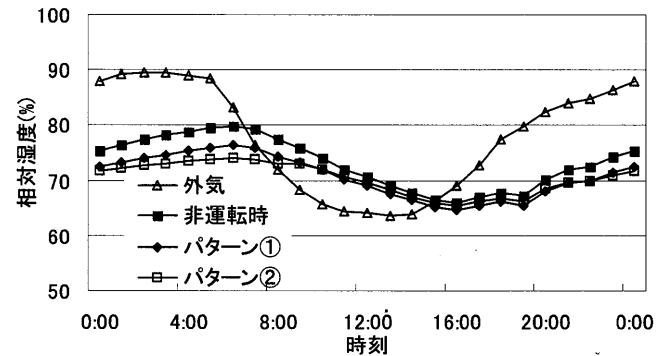


図13 上階居室の相対湿度変動の推移

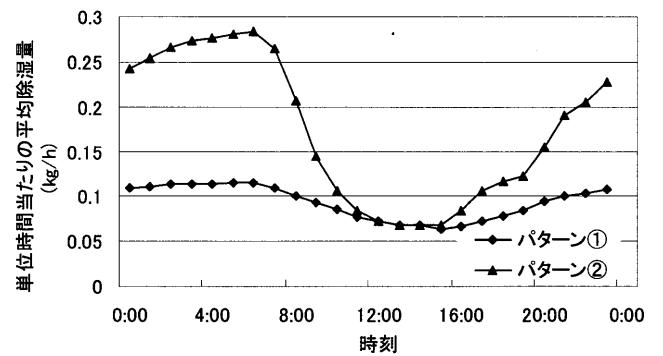


図14 各仕様毎の時間当たり平均除湿量の推移

表4 各仕様毎の消費電力量と除湿量 (kJ表記)

シミュレーション パターン	総合消費 電力量 (kJ/day)	予熱負荷 (kJ/day)	送風機の消費 電力量 (kJ/day)	除湿量 (kg/day)
パターン①	28466	20690	7776	2.24
パターン②	14389	6613	7776	4.17

参考文献:

- 1) 笹森礼子、荒谷登、繪内正道:全熱回収装置と兼用する吸放湿除湿器の試作・試験 日本建築学会北海道支部研究報告集 No. 70, pp. 333-336, 1997. 3
- 2) 西澤繁毅、湯浅岳雄、繪内正道、荒谷登:数値解析による吸放湿型除湿器付設住宅の夏期の温湿度改善効果 日本建築学会北海道支部研究報告集 No71, pp. 265-268, 1998. 3
- 3) 大橋正知、繪内正道、西澤繁毅、荒谷登:含浸珪藻土粒を用いた吸放湿型除湿換気装置の試作及びその性能試験に関する研究 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) pp. 303-304, 2001. 9
- 4) 粉体工学会編:粉体工学便覧、日刊工業新聞社
- 5) 狩野武:粉体粒子の挙動 理論と実際、産業技術センター
- 6) 井上宇一:新版 空気調和ハンドブック、丸善

[2002年9月9日原稿受理 2003年2月25日採用決定]