

室内環境のパッシブデザインと化学

一 ポリマーデシカント材を適用した調湿建材の開発および ノルボルナジエン(NBD)誘導体の光異性化反応を用いた蓄エネルギーシステムの研究 一

北海道職業能力開発大学校 三浦 誠

1. はじめに

建築物は古来より風雨や外敵から身を守り、暑さ寒さを緩和するシェルター（避難所）の役割を担ってきた。それは現在も変わらないが、人間の生活様式が多様化し高度化するにつれて、室内で生活する時間は長くなり、室内の快適性が求められるようになってきた。そして、室内の温湿度の快適範囲は狭くなり、暖房機やエアコン、加湿器・除湿器、換気設備などの設備技術を活用する「アクティブな手法」が用いられるようになってきた。一方で、これらアクティブな手法は、多くの場合、化石燃料の消費により支えられているのが実情である。

そこで、太陽からの日射や日照、通風などを利用する「パッシブな手法」が見直されている。これらパッシブな手法は、自然界の持つポテンシャルを活用するが、そのポテンシャルを蓄積する材料も天然素材を選択する場合が多い。パッシブな手法を志向する方は、環境配慮や健康に対する意識が高いためと推察できる。しかし、天然素材であるがゆえの不安定性や機能の限界もある。そこで、筆者らは室内環境のパッシブデザインの機能向上と持続性を確保するため、機能性ポリマーなど化学合成された材料を検討し、従来よりも省エネルギーで快適な室内環境の構築を目指している。

本稿では、当大学校の共同研究で得られた成果であるポリマーデシカント材による調湿建材の開発についてと、ノルボルナジエン（NBD）誘導体の光異性化反応を用いた蓄エネルギーシステムの開発に

ついて紹介する。また、これらの研究は当大学校の専門課程建築科2年生の総合制作実習の課題でもあり、その実践報告でもある。

2. ポリマーデシカント材による調湿建材の開発

2.1 背景

室内の快適な湿気環境は、相対湿度が40%~60%とされている。これよりも湿度が低い場合はインフルエンザウイルスなどの感染や呼吸器系の疾患が多くなり、高くなれば真菌類やカビなどの発生が問題となる。そこで近年、調湿建材を使用したパッシブ調湿が注目されている。これらの方法は天然素材である珪藻土に代表される無機系の多孔質材による水蒸気の物理吸着を利用した方法が主流となっている。しかし、吸放湿量には限界があり、繰り返しの吸放湿においては、履歴による放湿量の減少が報告されている。

一方で天然素材よりも高い吸放湿性と繰り返しの安定性が期待できる化学吸着機構を利用した有機系調湿建材の研究例は少なく、本研究では、水蒸気を化学吸着するポリマーデシカント材を活用した調湿建材の開発を試みた¹⁻⁴⁾。

2.2 ポリマーデシカント材

ポリマーデシカント材（J S R 株式会社提供）を写真1に示す。水分子を化学吸着する親水性官能基を多く含み、かつ水分子と接触する比表面積の大きい粒子状の材料である。水を吸収してゲル化するポリマーとしては、紙おむつなどに使われる高吸水性



写真1 ポリマーデシカント材

樹脂 (Super Absorbent Polymer, 以下SAP) が有名だが、SAP粒子は自重の数百倍の水を吸収する優れた性能を持つが、デシカント材として使用した場合には放湿しやすい性質 (ヒステリシスロス) がある。これらの特性を向上させるために、親水性のカルボキシル基をもつポリマーをベースにし、吸湿性はゲル中の解離イオン濃度を高め浸透圧を高めることで制御する。また、放湿性はゲルの架橋密度により制御できる⁴⁾。

ポリマーデシカント材を建築材料として使用するためには、既存の内装用左官材などと混和する必要がある。ポリマーデシカント材を活用した調湿建材の調湿機能が確認できる簡単な実験例を紹介する。外形45cm角の断熱材 (FP板4cm厚) の箱を2つ用意し、ひとつには内壁と天井にポリマーデシカント材を10wt.%混和させたプラスター (左官材) を施工し、もうひとつにはビニールクロスを施工した (写真2)。

この中に熱湯の入ったビーカーを入れ、箱内の相

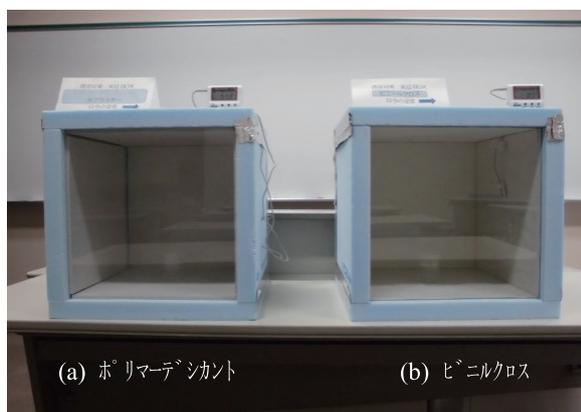


写真2 調湿機能可視化用の簡易箱

対湿度の経時変化を測定し比較した。実際の測定結果を図1に示す。吸放湿しないビニールクロスでは、加湿直後に相対湿度は100%に達し、アクリル板表面に結露が生じた。一方、ポリマーデシカント材を施工した箱では、相対湿度の上昇は抑制され、55%程度で推移した。先に述べた湿気環境の快適範囲を維持する性質が確認できた。

これらの材料が調湿建材として認定されるためには、調湿建材判定基準を満たす必要がある⁵⁾。その一つとして、中湿度領域 (相対湿度50%–75%) における試験体の吸湿量が 29g/m^2 以上という規定がある。そこで、プラスターをベースに表1に示す混和率でポリマーデシカント材を調合し、6種類の試験体を作成して、繰り返しの吸放湿試験をおこない性能を評価した。

2.3 チャンバー法による繰り返し吸放湿試験

試験体は恒温恒湿装置内に静置し (図2, 写真3), 温度を 23°C に保ちながら、湿度変化が25%の矩形波となるように12[h]間隔で切り替え, 1サイクル24[h]

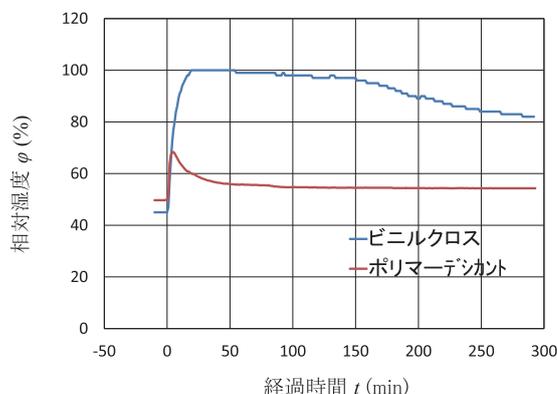


図1 調湿効果の簡易実験の結果

表1 試験体概要

母材	調湿素材	名称	混和率
P プラスター	-	ブランク	0wt.%
	Dep デシカント材	PDep03	3wt.%
		PDep05	5wt.%
		PDep07	7wt.%
		PDep10	10wt.%
	ビニールクロス	ビニル	0wt.%

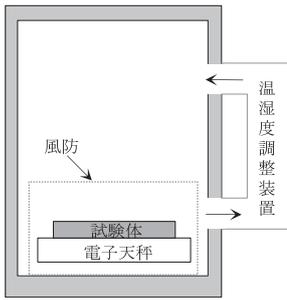


図2 チャンバー法



写真3 恒温恒湿装置内

として、5サイクル繰り返した。そのときの試験体重量を1分間隔で測定することで吸放湿量を求めた。25%の湿度変化は、高湿域 (70%–95%)、中湿域 (50%–75%)、低湿域 (30%–55%) の3域を設定し、それぞれについて吸放湿量を測定し評価をおこなった。

実験開始から48[h]経過 (2サイクル) した中湿域における各試験体の吸放湿量 w_{a12} [g/m²] を図3に示す。PDep10, PDep7, PDep5の試験体で調湿建材判定基準である29g/m²を上回る結果が得られた。PDep10における5サイクル繰り返し吸放湿試験によるサイクル図を図4に示す。また各湿度域での5サイクルの平均吸放湿量の結果を整理し表2に示す。吸放湿の繰り返しによるヒステリシスロスは見られず、安定した性能が確認できた。また周囲の相対湿度が高いほど吸放湿量が大きくなることが確認できた。ビニールクロスについては吸放湿量が少なく、測定器の下限値以下となり、正確な値が得られなかった。

2.4 実験モジュールによる繰り返し吸放湿試験

調湿建材を壁面に施工した際の相対湿度変動の抑制効果を評価するため、屋内実験室に2棟の実験モジュール (以下、実験棟) を設置して検討を加えた。実験棟は施工性を考慮して枠組壁工法 (2×4工法)

を採用した。デシカント棟にはポリマーデシカント材を湿式工法で、ブランク棟にはビニールクロスを乾式工法でそれぞれ施工し、繰り返し加湿を与えて相対湿度の挙動を観測した。実験棟の測定項目の概要を図5に、実験棟の仕様を表3に示す。実験棟は学生自ら施工した (写真4)。加湿には応答性に優れた蒸気式加湿器を使用し、第3種機械換気装置により

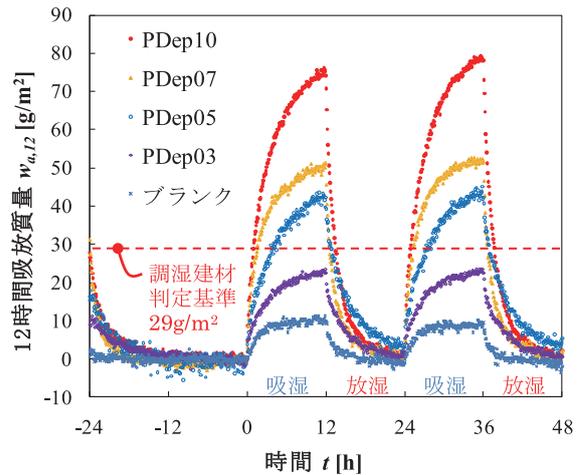


図3 中湿域12時間吸放湿量 (2サイクル)

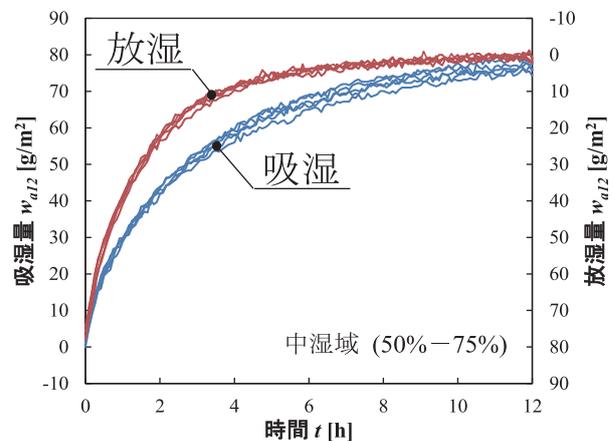


図4 中湿域における吸放湿サイクル (5サイクル) PDep10

表2 各湿度域における平均吸放湿量

試験体名	混和率	時定数 T [h]	低湿域(30%-55%)				中湿域(50%-75%)				高湿域(70%-95%)			
			吸湿量 [g/m ²]	吸湿率 [%]	放湿量 [g/m ²]	放湿率 [%]	吸湿量 [g/m ²]	吸湿率 [%]	放湿量 [g/m ²]	放湿率 [%]	吸湿量 [g/m ²]	吸湿率 [%]	放湿量 [g/m ²]	放湿率 [%]
PDep10	10wt.%	2.96	31.0±1.6	97.8	32.4±0.3	100	77.0±0.8	100	77.0±1.3	100	179.6±2.5	100	177.6±1.5	98.9
PDep07	7wt.%	2.56	21.7±1.1	97.4	22.8±0.3	100	50.7±0.5	100	50.3±0.3	99.2	146.5±1.5	100	141.5±5.4	96.6
PDep05	5wt.%	3.83	14.9±3.1	100	15.3±3.2	100	41.3±1.1	100	40.7±0.7	97.9	125.7±11.9	100	121.1±17.2	95.8
PDep03	3wt.%	3.34	5.6±1.3	85	6.7±1.2	100	22.8±0.6	99.5	22.8±0.4	99.8	89.3±0.8	100	85.3±2.2	95.5
ブランク	0wt.%	1.70	0.8±1.3	-	0.8±0.6	-	11.2±0.5	97.4	11.8±0.5	100	45.6±2.9	100	43.2±1.5	95

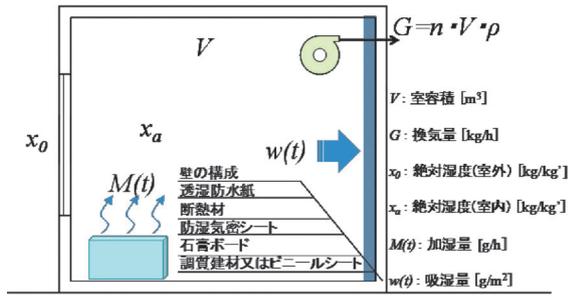


図5 実験棟測定概要

表3 実験棟の仕様

名称	ブランク棟	デシカント棟
寸法(mm)	1,820×1,820×2340(H)	
気積(m ³)		5.49
壁仕上材	ビニールクロス	PDep10
左官面積(m ²)	-	11.41
PDep10重量(kg)	-	70.83
最大吸湿量(kg)	-	0.92
最大加湿量(kg/h)	0.4(蒸気式加湿器)	
床の仕様	フローリング (2.62[m ²])	



写真4 実験棟 (実験モジュール)

換気量24 [m³/h]の換気を連続的に起こった。

ブランク棟およびデシカント棟において、24時間を1サイクルとして、加湿量145.7[g/h]のステップ加湿を3.7時間おこない吸湿させた後、放湿する繰り返しを5サイクルおこなった。加湿量と相対湿度の推移を図6に、実験棟の吸放湿量を式(1)から求め図7に示す。記号の意味は、図5を参照されたい。

$$w_a = M(t) - nV\rho(x_a - x_o) - \rho V \frac{dx_a}{dt} \quad (1)$$

デシカント棟では調湿建材の安定した吸放湿性能が確認できた。

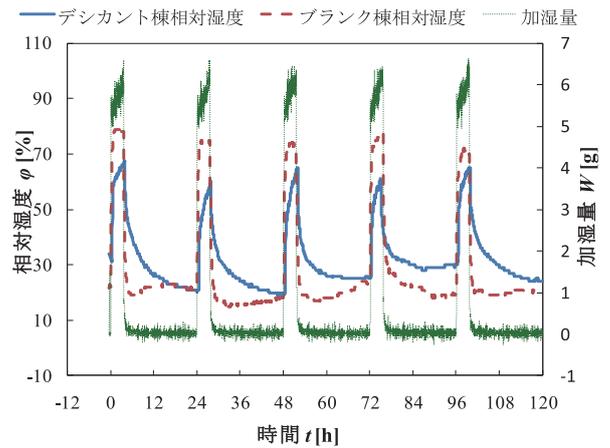


図6 実験棟における相対湿度変化

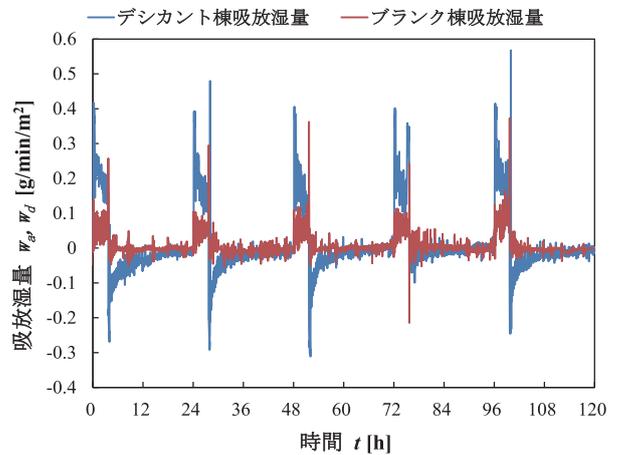


図7 実験棟における吸放湿量

3. NBD誘導体の光蓄エネルギーに関する研究

3.1 背景

近年、再生可能エネルギー利用の進展に伴い太陽光をエネルギーに変換するシステムが注目されている。代表的なものとしては、太陽電池(PV)が挙げられるが、エネルギー貯蔵に必要な蓄電池の大容量化などが課題となっている。一方、光エネルギーを直接貯蔵し、熱エネルギーに変換できるシステムとしてノルボルナジエン(NBD)-クワドリシクラン(QC)系がある。この系は光化学反応により、光エネルギーをNBD分子内に歪エネルギーとして蓄積し、貯蔵できる特徴を持っている。熱エネルギーを取り出す際には触媒反応によりQCをNBDに逆異性化することで、蓄積したエネルギーの変換が可能

なシステムである。またそれを繰り返し使用できる特徴をもっている⁶⁾。本研究では暖房システム等への応用を目的として、NBD誘導体を用いた光エネルギーの変換・蓄熱性能に関する基礎的検討を行った⁷⁾。

3.2 NBDの光原子異性化反応

NBDに太陽光を照射することで分子内の二重結合の原子価異性化反応が生じ、高歪みな結合状態のQCが生成する。生成したQCは触媒作用により逆異性化することで元のNBDに戻り、この時にQCが放出する熱量は96[kJ/mol]になる（(1)式）。単位重量に換算すれば1043[kJ/kg]と高い蓄放熱性を持っている。図8にNBD暖房システムの模式図を示す。

3.3 光原子異性化反応

NBD誘導体は水溶性のある3-フェニル-2,5-ノルボルナジエン-2-カルボン酸（NBD-ph）を用いた。溶媒としては水酸化ナトリウム12mM水溶液および有機溶媒のテトラヒドロフラン（THF）を使用した。所定濃度のNBD誘導体を溶媒に溶解させた後、太陽光または26W紫外線（UV-B）蛍光灯を所定時間照射しQCへの異性化反応を行った。異性化反応は、液体クロマトグラフィーのUV検出器（東ソー：HPLC用 UV-8010）を用い、UV

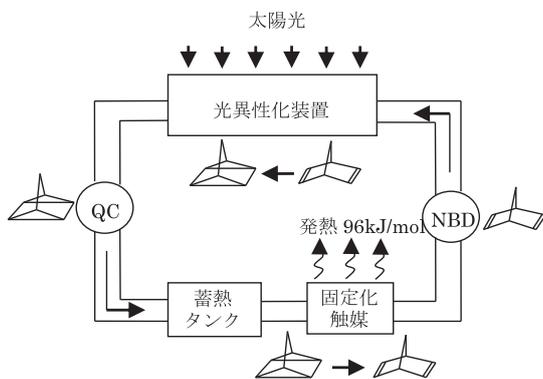
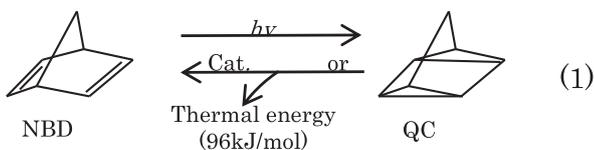


図8 NBD暖房システム模式図²⁾

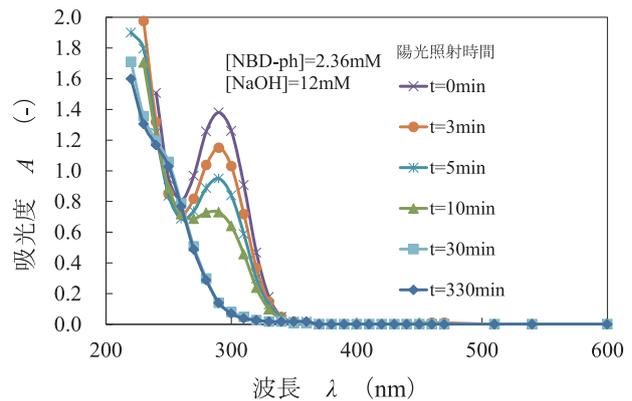


図9 吸光度と陽光照射時間の関係

スペクトルの吸収ピークから定量を行った。

NBD-ph溶液における吸光度の推移を陽光照射時間ごとに整理して図9に示す。陽光照射時間の増加に伴い、NBD-ph水溶液の290nm吸光度が減衰し、陽光によるQC誘導体への異性化が確認でき、30分で異性化率100%が達成できた。

3.4 逆異性化反応

QCの逆異性化反応は、コバルト（II）テトラフェニルポルフィリン（Co-TPP）触媒を添加する方法⁶⁾を試みた。Co-TPPを添加して逆異性化反応を行った結果を図10に示す。NBD-phの異性化により消失していた290nm吸光度の吸収ピークが再現し、QCの逆異性化が確認できた。異性化したQC溶液に飽和Co-TPP溶液を加え、NBDへ逆異性化させたときの放熱量を測定した。図11に逆異性化による温度上昇とNBD-ph濃度の関係を示す。放熱量は（2）式で定義した。

$$q = c\rho V\Delta\theta \quad (2)$$

温度上昇がNBD-ph濃度に依存し、236mMの溶液で約9.4[K]の温度の上昇を確認できた。図12に放熱量とNBD濃度の関係を示す。破線はNBD蓄熱量の既値（96kJ/mol）でありNBD濃度が高くなるほど、単位モル当りの比放熱量は減少した。Co-TPP濃度に対するNBD濃度が高いほど効率が下がっていることから放熱量はCo-TPP濃度に依存していると考えられる。

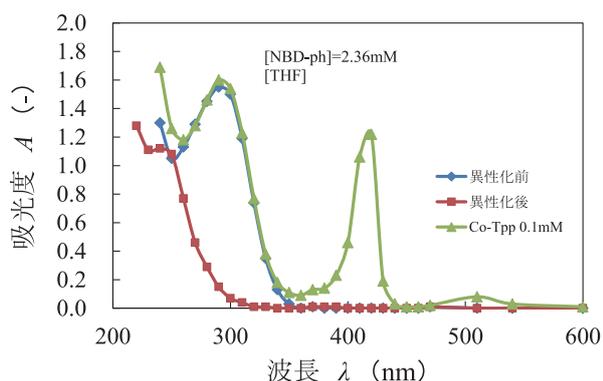


図10 Co-TPP添加による逆異性化反応

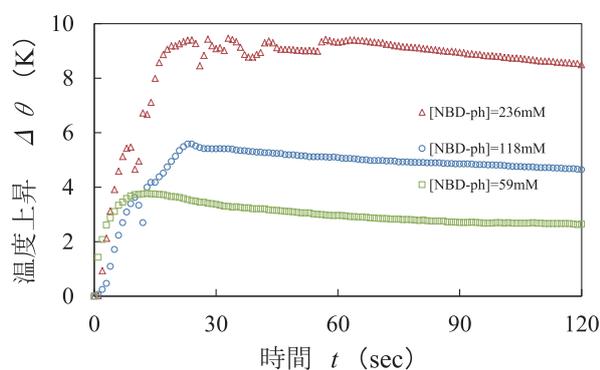


図11 温度上昇とNBD濃度の関係

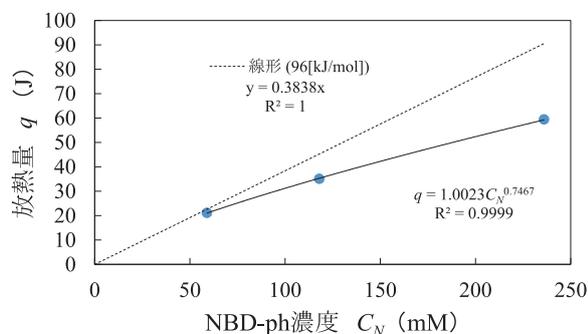


図12 放熱量とNBD濃度の関係

4. おわりに

本稿では、室内環境のパッシブデザインについて、ポリマーデシカント材を適用した調湿建材の開発とNBD誘導体を使用した蓄エネルギーシステムについて紹介した。NBD誘導体については既往研究も多くあるが、暖房システムとして実用化できていないのが現状である。クリアしなければならない課題も多いが、これからも研究を継続したい。

また、その他のパッシブ技術としてPCM（潜熱

蓄熱材）による蓄熱建材に関する共同研究もおこなっているのので、機会があれば紹介したい。

謝辞

本稿で紹介した成果は、室内気候研究所の石戸裕二先生、東京大学大学院工学系研究科の草間友花学振研究員との共同研究によるものです。また、本研究は当大学の共同開発支援の援助を受けました。ポリマーデシカント材およびNBD誘導体はJSR株式会社様から提供いただきました。ここに記して謝意を表します。最後に、総合制作実習の課題として真摯に実験に取り組んだ小沢修也氏、鳥海里紗氏、内田樹氏、加藤泰氏に感謝申し上げます。

記号

A : 吸光度 (-), c : 比熱 ($\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$), C_N : NBD濃度 (mM), q : 放熱量 (J), t : 時間 (min), V : 溶液量 (m^3), $\Delta \theta$: 温度上昇 (K), ρ : 密度 (kg/m^3)

<参考文献>

- 1) 小沢修也, 石戸裕二, 草間友花, 三浦誠: ポリマーデシカント材を適用した調湿建材に関する研究 その1デシカント調湿建材の吸放湿性能に関する検討, 日本建築学会北海道支部研究報告集 88, pp.179-182 (2015.6).
- 2) 鳥海里紗: ポリマーデシカント材を適用した調湿建材に関する研究 その2 実験棟における調湿効果の評価法に関する検討, EEGs'14第9回環工学系・卒業論文発表会 梗概集 D-3 (2015.3).
- 3) 内田樹, 石戸裕二, 草間友花, 三浦誠: ポリマーデシカント材を適用した調湿建材に関する研究 その3吸放湿履歴が調湿性能に及ぼす影響, 日本建築学会北海道支部研究報告集 89, pp.173-176 (2016.6).
- 4) 突廻恵介: ゲル粒子の環境材料としての可能性 ポリマーデシカントの吸放湿特性と調湿壁材としての実証検証, 化学と工業, 68 (6), pp.505-507 (2015.6).
- 5) 一般社団法人日本建材・住宅設備産業協会: 「調湿建材登録・表示制度」に関する調湿建材判定基準 (2014.4).
- 6) 飯澤孝司: 光エネルギーの熱エネルギーへの変換, 高分子, 45 (5) (1996).
- 7) 加藤泰, 三浦誠, 石戸裕二, 草間友花: ノルボルナジエン(NBD) 誘導体の光異性化反応を用いた蓄エネルギーシステムに関する研究 その1, 日本建築学会北海道支部研究報告集 89, pp.161-164 (2016.6).