

# NHL (天然水硬性石灰) を用いた環境調整建材の開発

# DEVELOPMENT OF ENVIRONMENT CONTROLLABLE BUILDING MATERIALS USING NHL (NATURAL HYDRAULIC LIME)

中島裕輔 — \* 1      山田正也 — \* 2  
中村仁子 — \* 3      池田勝利 — \* 4

Yusuke NAKAJIMA — \* 1      Masaya YAMADA — \* 2  
Satoko NAKAMURA — \* 3      Katsutoshi IKEDA — \* 4

キーワード：  
NHL (天然水硬性石灰), 環境調整, 熱物性, 吸放湿, ガス吸着

NHL (Natural Hydraulic Lime) is a traditional building material in Europe. NHL has declined after popularization of portland cement, but recently, it has been reevaluated because of its durability and environmental performance. In this paper, various experiments were carried out to examine the environmental performance of NHL about thermophysical properties, absorption and desorption of water vapor, and gas adsorption capability. The results show that NHL has various good environmental performance and has a great deal of possibility as environment controllable building materials.

Keywords:  
NHL (Natural Hydraulic Lime), Environment control, Thermophysical properties, Absorption and desorption of water vapor, Gas adsorption capability

## 1. はじめに

近年、地球環境への配慮やシックハウス対策として、自然素材利用建材や温湿度などの環境調整建材が注目されつつある。例えば内装材では調湿機能・ホルムアルデヒド低減機能を持つ磁器質タイルや珪藻土系左官材、外装材では吸水・蒸発冷却機能を持つ緑化レンガや保水性ブロックなどが挙げられ、環境調整建材の担う役割は大きい。一方で、自然素材を使用しているにもかかわらず固化剤やバインダー剤に化学物質が用いられて素材本来の性能を無くしてしまったり健康被害の原因となるケースも少なくない。

そこで、欧州で古くから用いられ、ポルトランドセメント普及とともに使用量は激減するも近年欧州でその活用方法が見直され始めている NHL (天然水硬性石灰) に着目した。NHL は日本での認知度は低く施工例も少ないが、高耐久性と様々な環境調整機能を有する自然素材である。欧州では強度によって規格化されているが、環境性能物性についてはデータが整っていない。本研究ではこの NHL の熱・空気・湿気に関わる各種環境性能についての基礎的調査と分析を行い、環境調整建材としての用途開発につなげることを目的としている。

## 2. NHL 材料の概要と特徴

### 2.1 NHL 材料の歴史と現状

天然水硬性石灰 - Natural Hydraulic Lime (NHL) は、欧州規格 EN459-1 (建築用石灰, 2001) において「粉砕に関係なく消化工程によって粉末化した、いくらか粘土質または珪質の石灰石の焼成によって作られる石灰。すべての NHL は水硬性を持つ。大気中の炭

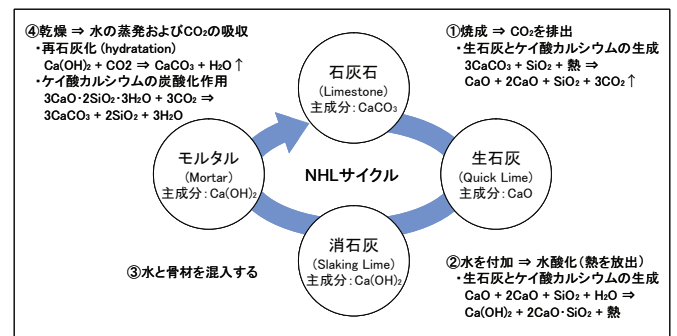


図1 NHLの循環サイクル

酸ガスは、硬化に寄与する。」<sup>注1)</sup>と定義されており、その歴史は英国の土木技術者スミートンの発見に基づいている。スミートンはエディストーン灯台の建設において、厳しい波風に耐える固化材の研究に着手しており、アバーソウの石灰岩を焼成することにより水で硬化して強度を発揮する水硬性石灰の発見に至る。さらには、水硬性の性質がこの石灰岩に含まれる粘土質によることを見出し、その後の水和特性研究のきっかけを築くこととなる。

水硬性の発見は70年余りの技術改良を経てポルトランドセメントの発明に終着し、硬化の緩やかで強度に劣る水硬性石灰はセメント利用の時代へと移り変わり今日に至っている。近年では石造建築物のセメントモルタルの施工による石材劣化をきっかけに、歴史的建造物の修復を手がける研究者の間から昔ながらの工法を用いた水硬性石灰による修復が奨励されるなど、建物の耐久性や環境特性の面から NHL を見直す動きが高まっている。

<sup>1)</sup> 工学院大学工学部建築都市デザイン学科 准教授・博士 (工学) (〒163-8677 東京都新宿区西新宿1-24-2)  
<sup>2)</sup> ダイダン(株) (元 工学院大学大学院生) 修士 (工学)  
<sup>3)</sup> 工学院大学大学院 修士課程  
<sup>4)</sup> クスノキ石灰(株) 博士 (工学)

<sup>1)</sup> Assoc. Prof., Dept. of Design in Architecture and Urbanism, Kogakuin Univ., Dr. Eng.  
<sup>2)</sup> DAI-DAN Co., Ltd., M. Eng.  
<sup>3)</sup> Graduate Student, Kogakuin Univ.  
<sup>4)</sup> Kusunoki Sekkai Corporation, Dr. Eng.

## 2.2 NHLの配合材料と適用用途

NHLは、骨材および水との混合によって、主にモルタルとして左官壁や目地材など、湿式工法に用いられる。骨材は通常、川砂や山砂といった天然の骨材が用いられており、セメントと同様に様々な種類のものを選んで混合できるのが特徴である。また、植物系の繊維質素材との相性がよく、ひび割れ防止などの効果に結びついており、さらには、麻チップや靱殻の配合によって断熱特性などの環境性能を付加することが可能である。

特にヨーロッパではNHLと麻チップとの混合物を型枠に養生して打放す工法が行われており、米食が中心である日本ではこれを靱殻に代替した試みも行われている。水硬性石灰は水分で硬化後、気中の炭酸ガスにより徐々に炭酸カルシウムへと変換し、耐久性が増す(図1)。このようなNHLの特性に加え、天然の骨材や植物繊維などを利用した構法を用いて、単なる建築材料のリサイクルという視点を超え、自然循環特性そのものをも考慮した技術として期待ができる。

## 3. 環境性能調査項目と試験体概要

### 3.1 調査項目

NHLは古来欧州では外装用の仕上げ材や目地材に多く使用されていたが、本研究では主に内外装左官材としての用途を考える。室内外の環境調整機能をふまえ、熱物性として熱伝導率及び容積比熱、湿気物性として吸放湿性能、空気質に関わる物性としてガス吸着性能を取り上げ、これらの性質を変化させる材料側の要素として、NHL種類、配合骨材種類と配合比、すさなどの混入材料に着目した。また湿気物性に関わる特性として比表面積及び細孔径分布についても調査を行った。

### 3.2 試験体概要

前述の調査項目をふまえ、NHLや骨材の種類・配合比等を変えて製作した31種類の試験体を用いて評価を行う(表1)。配合比については左官材使用を前提とした許容範囲内で選定を行った。グループAでは主として骨材の配合割合を変えた場合、グループB, C, Dでは混入素材の種類や試験体厚さを変えた場合の環境性能の変化を見ることを目的としており、これらに吸放湿・ガス吸着性能の比較対象として既製品のグループPを加えている。表2に配合材料の概要を示す。混入素材には従来の土壁や漆喰に用いられる靱殻、すさ類に加えて、近年の調湿建材で使用されている珪藻土とシラスを選定した。

## 4. 熱物性調査

### 4.1 調査概要

NHLの熱物性として、熱伝導率及び容積比熱の測定を行った。熱伝導率は、250×250mmの試験体を用い、迅速熱伝導率計(非定常細線加熱法)にて測定を行った。容積比熱は、φ50×100mmの試験体を用い、(財)建材試験センターの断熱型熱量計にて測定を行った。なお、グループBの容積比熱については、試験体の都合上14体中6体のみ測定を行った。

### 4.2 調査結果

熱伝導率、容積比熱、及びこれらの結果より算出した熱拡散率の測定結果を図2に示す。

表1 試験体一覧 注2)

グループ及び試験体No.	NHL種類	骨材(珪砂)	混入素材	配合比(重量比)			厚さ(吸放湿・ガス吸着用)	
				NHL	骨材	混入素材		
A	NHL2	5号	-	1	-	1	10mm	
						2		
						3		
		7号				1		
						2		
						3		
	NHL3.5	5号				1		
						2		
						3		
		7号				1		
						2		
						3		
B	NHL2	4号	-	1	2	0.05	10mm	
			靱殻					
			飛出しすさ					
			しらがすさ					
			珪藻土(乾燥)					
			珪藻土(融剤焼成)					
			シラス					
			-					
			靱殻					
			飛出しすさ					
			しらがすさ					
			珪藻土(乾燥)					
			珪藻土(融剤焼成)					
			シラス					
C	NHL2	-	靱殻	1	-	0.20	-	
					-	0.23		
D	NHL2	4号	-	1	3.42	-	10mm	
			靱殻		1	1.37	0.09	7mm
			-		-	-	-	10mm
P	-	-	ホルムアルデヒド低減建材認定タイル既製品			-	5mm	
			調湿珪藻土建材既製品			-	3mm	

※:体積比より重量比に換算

表2 配合材料の概要

配合材料	概要
NHL種類	含有成分の違いにおける強度指標による分類 数値が大きいかほど圧縮強度が高い
骨材種類	珪石を粉砕したものなど ひび割れ、剥離防止に使用される
混入素材	靱殻:左官用に利用されているよく乾燥したもの 飛出しすさ:良質の古藁縄を集積、切断、分離し精選した1cm内外のもの しらがすさ:繊維強靱なマニラ麻 使用済みのロープなどを加工したもの 珪藻土(乾燥):珪藻土を乾燥工程まで終えたもの 真比重2.1 平均粒子径11.1μm 珪藻土(融剤焼成):粒径拡大のために焼成時に融剤を加えたもの 真比重2.3 平均粒子径28.7μm シラス:シラス台地を形成する60~70%の火山ガラスからなる通常の火山灰

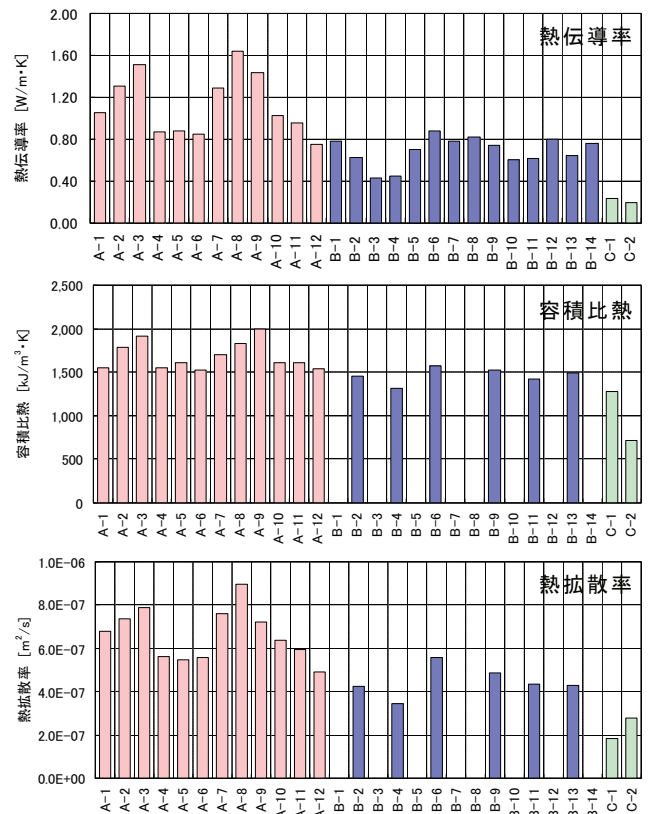


図2 熱伝導率、容積比熱、熱拡散率の測定結果

熱伝導率では、珪砂5号配合のものが4号、7号配合に比べて熱伝導率が高い。また5号配合では骨材割合が大きいほど熱伝導率も大きくなる傾向が見られた。NHL種類による傾向はほとんど見られない。また、すさを混入すると熱伝導率が小さくなる傾向が見られ、骨材のないグループCでは0.2W/m・K前後とさらに小さくなる結果となった。

容積比熱では、全体的に1,500kJ/m<sup>3</sup>K前後に多く分布している。傾向としては熱伝導率に類似しており、珪砂5号配合の骨材割合が大きいものが若干大きく、すさ配合のものが若干小さく、骨材のないものはさらに小さい。

図2の熱拡散率グラフ及び図3の熱伝導率・容積比熱の相関散布図を見ると、NHLは骨材や混入素材の種類・配合により、木材に近い性質からコンクリートに近い性質まで幅広い熱物性を発現できるため、厚塗りが可能な特徴も生かして、断熱層や蓄熱層など左官部位によって多様な使い方ができる素材と言える。

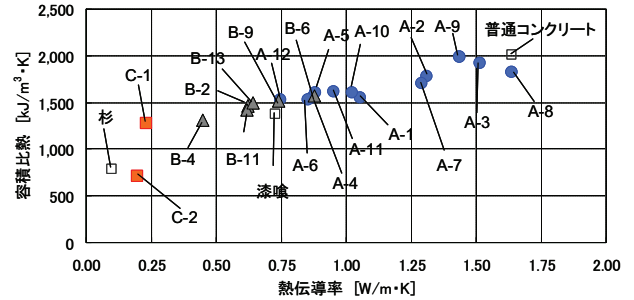


図3 熱伝導率・容積比熱の相関散布図<sup>1)</sup>

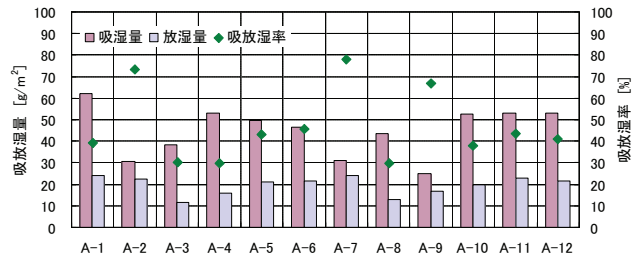


図4 吸放湿量と吸放湿率 (グループA / 48h)

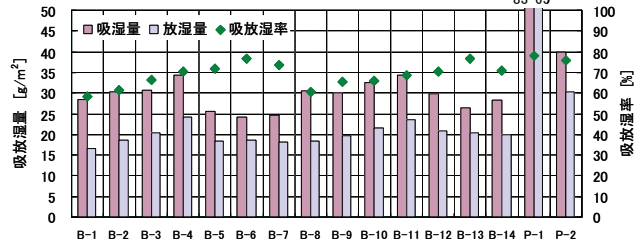


図5 吸放湿量と吸放湿率 (グループB, P / 24h)

## 5. 吸放湿性能調査

### 5.1 調査概要

JISA1470-1「調湿建材と吸放湿試験方法—第1部：湿度応答法」の中湿域条件に準拠し、熱伝導率試験に用いた試験体を用いて試験を行った。なお、JIS改定により1周期の時間が48時間から24時間になったため、グループAは48時間、グループB, Pは24時間で実施している。

### 5.2 調査結果

試験体ごとの吸湿量、放湿量、及び吸湿量に対する放湿量の割合(図中ではこれを吸放湿率と表記)を図4、図5に示す。グループAでは珪砂7号配合の方が5号配合よりも吸湿量が多い傾向が見られた。NHL種類による差異はほとんど見られていない。グループBでは配合材料の種類ごとに傾向が現れており、特にすさを加えることで吸放湿性能が向上していることが分かる。逆に珪藻土やシラスを加えると吸放湿性能は低下する傾向が見られる。グループPでは特に既製品タイルP-1の吸放湿量が大きく、左官材P-2もNHL試験体に比べるとやや大きい。

珪藻土・シラス混入以外のNHL試験体については、建材試験センターの定める調湿建材の調湿性能評価基準<sup>2)</sup>の等級1(12時間の吸湿量が29g/m<sup>2</sup>以上)をクリアしており、調湿建材としての機能を有していることが確認できたと言える。

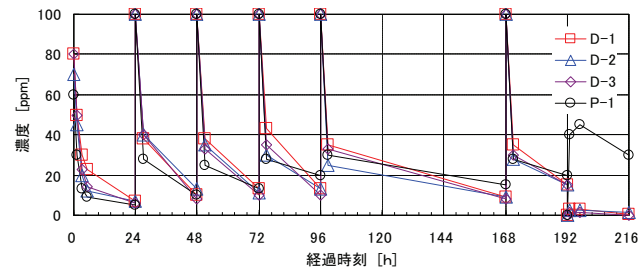


図6 ホルムアルデヒド濃度変化 (グループD, P / 100ppm)

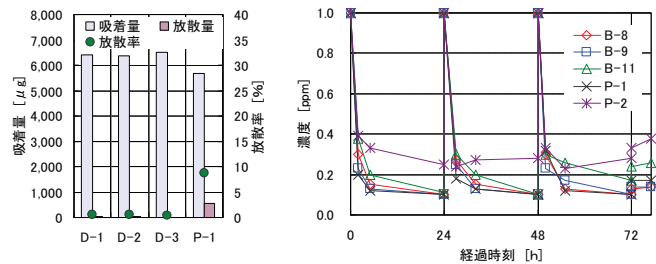


図7 ホルムアルデヒド吸着放散量 (グループD, P / 100ppm)

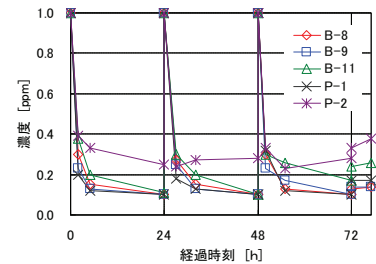


図8 ホルムアルデヒド濃度変化 (グループB, P / 1ppm)

## 6. ガス吸着性能調査

### 6.1 調査概要

シックハウスの原因物質として建材の放散濃度規定が設けられているホルムアルデヒドについて、その吸着・放散試験を実施した。試験方法としては、実験室(平均室内温度21℃)にて71×71mmの試験体(表面積0.005m<sup>2</sup>)を入れて密閉した容積9リットルの袋内に設定濃度の対象ガスを添加して静置し、経過時間ごとのガス濃度を検知管にて測定した後、24時間後に同濃度のガスを再添加する作業を繰り返す。これを数サイクル繰り返した後、最後の24時間後にはガスを再添加せず、放散試験として試験体を新しい袋に移して40℃の恒温槽に入れて静置し、同じく経過時間ごとのガス濃度を検知管にて測定した。ガスの設定濃度は、グループDの

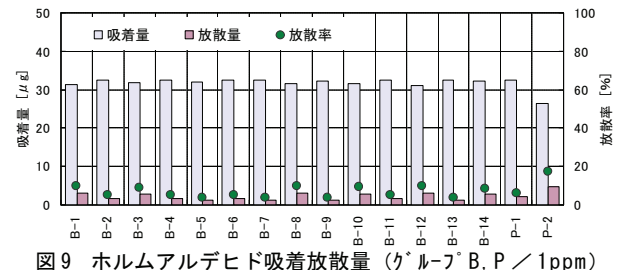


図9 ホルムアルデヒド吸着放散量 (グループB, P / 1ppm)

測定では100ppm、グループBの測定ではより生活環境に近い1ppmとし、既製品のグループPについては両方の濃度で実施した。試験にあたってはブランク袋の濃度測定も同時に行い、袋への吸着が比較分析に影響のないレベルであることを確認している。なお、試験体P-1はホルムアルデヒド低減建材の認定<sup>注3)</sup>を受けているタイル製品である。

## 6.2 調査結果

図6にグループD、Pの試験体における袋内ホルムアルデヒド濃度変化を示す。吸着速度に若干の違いはあるが、どの試験体も24時間後には濃度が10分の1程度に低減され、また6サイクル経過後でも吸着性能の衰えは小さく、吸着容量の限界は見えていないと言える。一方放散過程では、NHLの試験体にほとんど放散が見られなかったのに対して、既製品P-1では明らかな放散が見られた。図7の放散率で比較しても、P-1では10%弱の放散が見られるが、グループDの放散率は1%程度である。

図8、図9にガス設定濃度を1ppmとしたグループBの試験結果を示す。この試験においても、NHL試験体では24時間後には濃度が10分の1程度に低減され、3サイクル後の放散過程でも既製品に比べて放散量が少ない結果となった。<sup>注4)</sup>

これらの試験より、NHL建材が優れたホルムアルデヒド吸着性能を有することが示されたと言える。

## 7. 細孔径分布調査と環境調整機能の検討

### 7.1 比表面積・細孔径分布調査

吸放湿及びガス吸着性能においては多孔質材料の持つ細孔の状況が大きく影響する<sup>3),4)</sup>。図10にNHLの電子顕微鏡写真を示す。本

表3 細孔径分布調査試験体一覧と測定結果

表1 試験体 No.	NHL種類	骨材	混入素材	測定結果		
				細孔容積 [cm <sup>3</sup> /g]	比表面積 [m <sup>2</sup> /g]	平均細孔直径 [nm]
①	-	3.5	-	0.041	16.6	9.97
②	-	-	グラスファイバー	0.048	37.2	5.68
③	B-8	2.0	珪砂7号	0.019	4.2	18.12
④	B-1		-	0.015	2.9	17.23
⑤	B-2		珪砂4号	0.013	1.9	24.67
⑥	B-4		粗砂	0.012	2.2	20.42
⑦	P-1	ホルムアルデヒド低減建材認定タイル既製品		0.096	31.1	12.34
⑧	P-2	調湿性珪藻土建材既製品		0.101	30.3	13.14
参考		石膏ボード		0.003	4.4	3.01

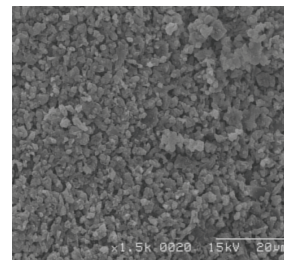


図10 NHLの多孔質構造 (NHL2.0の電子顕微鏡写真)<sup>注5)</sup>

研究ではその基礎物性である細孔径分布と比表面積について、窒素ガス吸着法<sup>注6)</sup>により調査を行った。試験体には表1のグループBの試験体から骨材と混入素材を変えた4体を選定し、これに骨材のない配合の2体と既製品2体を加えた。なお、骨材のない配合ではひび割れ等により左官材としての使用が困難なため、今回はグラスファイバーを混入している。測定試験体の一覧と試験結果の細孔容積、比表面積、平均細孔直径を表3に示す。参考値として石膏ボードの物性値<sup>5)</sup>も記述した。

吸着量に関する細孔容積は全てのNHL試験体で石膏ボードを大きく上回り、特に骨材のない①、②が大きい。マイクロ孔の存在量にも影響される比表面積では骨材配合の③～⑥では石膏ボードと同程度であるが、①、②は細孔容積と同様に大きくなってい

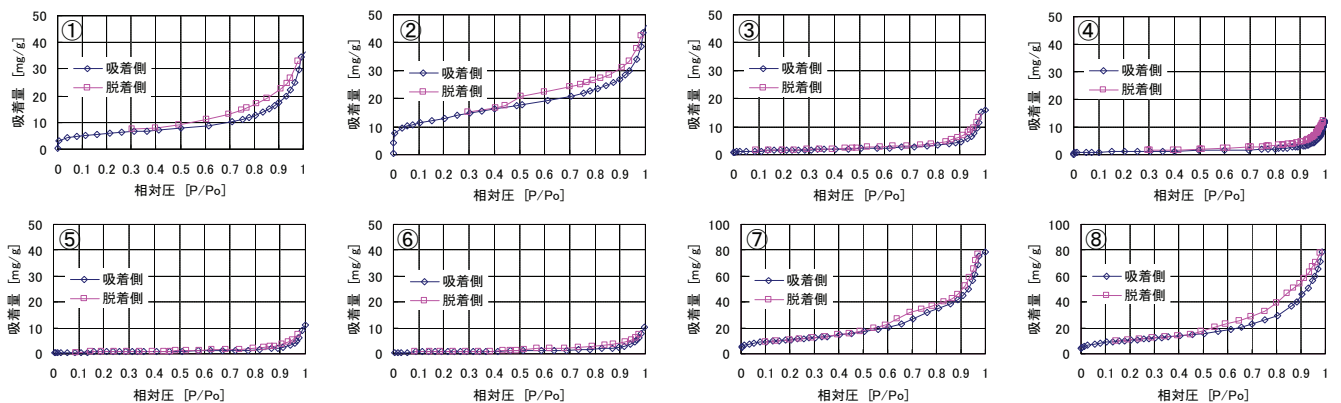


図11 NHL試験体及び比較試験体の吸着等温線

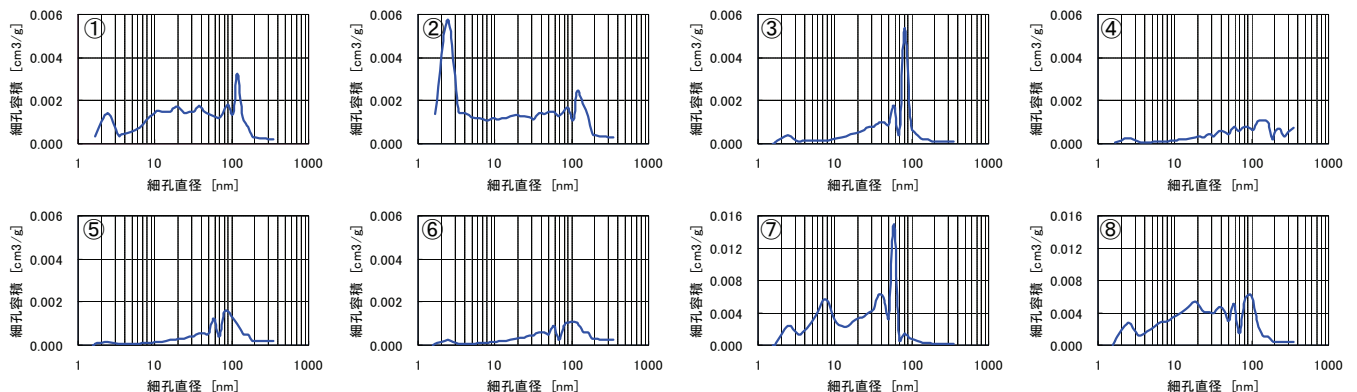


図12 NHL試験体及び比較試験体の細孔径分布

る。平均細孔直径では全試験体が石膏ボードよりも大きい、大小の傾向は前述の2項目とは逆となっている。既製品⑦, ⑧は全項目で大きな値であった。

窒素ガス吸着法による試験結果から求めた吸着等温線を図11に示す。試験体によって吸着量に違いは見られるが、すべての試験体にヒステリシス(吸着と脱着のプロセスが一致しない現象)が見られ、これは主としてメソ孔領域(2nmから50nm)の細孔での毛管凝縮に密接に関連すると言われている。水蒸気の吸脱着性能(吸放湿性能)に関してはこのメソ孔領域の細孔容量が影響しているとされる。NHL試験体の中でも特に試験体①, ②は他の試験体に比べて吸着量も多く、相対圧0.1に近い値での立ち上がりはマイクロ孔領域(0.1nmから2nm)の細孔の存在を意味する。既製品⑦, ⑧はNHL試験体に比べて吸着量がかなり多くなっている。

## 7.2 細孔径分布と環境性能

細孔径分布を図12に示す。どのNHL試験体もメソ孔からマクロ孔における細孔容積分布が見られ、既製品⑦, ⑧には及ばないが、試験体①, ②は細孔容積量も多い。試験体③~⑥では重量比でNHLの2倍を占める骨材が細孔容積を減らす要因になっていると考えられる。既製品⑦は焼成タイルで製作方法が全く異なるが、図5より試験体③~⑥と珪藻土系左官材⑧とは細孔容積の差ほど吸放湿性能に大差はないことから、試験体③~⑥程度の細孔径分布でも吸放湿性能は十分発揮できると言える。また、試験体①, ②の細孔容積量からすると、試験体③~⑥についても配合する骨材の種類や性状に工夫を加えることで、細孔容積量やその分布を増加・向上させ、さらに吸放湿性能を向上させる余地があると考えられる。

ホルムアルデヒド等の揮発性有機化合物の吸着性能と細孔径分布の関係性についてもまだ解明途上ではあるが、NHL試験体の吸着試験結果からも、これら細孔の存在が大きく影響していると考えられ、吸放湿性能同様の分析を進めていく必要がある。

## 8. まとめ

NHL(天然水硬性石灰)の熱・空気・湿気に関わる環境性能について基礎的調査を行った。得られた主な知見を以下にまとめる。

- (1) 熱物性については、骨材や混入素材の種類・配合を調整できるNHLの特徴を生かし、熱伝導率・容積比熱ともに木材に近い性質からコンクリートに近い性質まで幅広い熱物性を発現できることが分かった。
- (2) 吸放湿性能については、同じくNHLの特徴を生かし、調湿建材としての機能を有することができることが分かった。
- (3) ガス吸着性能については、ホルムアルデヒド吸着性能はNHL試験体全般に高く、ホルムアルデヒド低減建材認定品の既製品を上回る吸着性能を持たせることもできることが分かった。
- (4) 比表面積・細孔径分布を調べたところ、吸放湿性能との関係性がおおよそ把握できた。また、さらなる吸放湿性能向上の可能性もあることも示唆された。

本調査のように、NHLは、熱・空気・湿気物性に関わる環境性能を適度に併せ持つ素材であることが確認された。このことは単一機能に特化しがちな近年の機能性建材には見られない特徴であり、省エネルギーや室内の熱的快適性・空気質の向上など、総合

的に見た環境調整建材として様々な建築部位への活用が期待できる素材と言える。また、本研究では詳しく触れなかったが、NHLは施工後の硬化過程で空気中の二酸化炭素を吸収しながら石灰石に戻っていく循環型の自然素材であるため地球温暖化対策及び資源循環の面にも寄与する材料と言え、炭素収支をライフサイクルで評価することも重要である。

今後は、更に環境性能に関わる物性の調査・分析を進めて汎用性のある物性データベースを構築するとともに、耐久性、強度、施工性などの検証も合わせ、用途開発と普及に向けた取り組みを進める計画である。

## 謝辞

本研究の試験の一部は、文部科学省学術フロンティア推進事業「地震防災および環境共生に関する新技術の応用に関する研究」(平成18~20年度)の助成を受けて実施した。実験・分析では、京都府立大学尾崎明仁教授、横浜国立大学河端昌也准教授には貴重なご助言をいただきました。関連試験では、(財)建材試験センター萩原氏、(財)日本食品分析センター吉川氏、日本ベル(株)、棚島津製作所、不破博志氏、大森基伊氏、当時中島研究室卒論生の福應、竹内、小野松、鈴木、寺田、松岡、林下、綿貫、渡邊、池嶋、名古屋、斉藤、丸山君他多数の協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

## 注

注1) NHL規格(EN459-1)の原文を次に示す。

‘Limes produced by burning of more or less argillaceous or siliceous limestones with reduction to powder by slaking with or without grinding. All NHL have the property of setting and hardening under water. Atmospheric carbon dioxide contributes to the hardening process.’

注2) 試験体グループごとに製作・試験実施年度が異なるため、グループによって試験実施の項目は異なる<sup>6)~10)</sup>。また、グループC及びグループDの試験体については製作時に配合比を体積比で計量しており、C-1はNHL: 粉殻=7:10、C-2はNHL:粉殻=6:10、D-1はNHL:骨材=1:1、D-2, D-3はNHL:骨材:粉殻=1:0.4:0.6であった。表中の数値はこれらをNHLを1とした場合の重量比に換算したものである。

注3) (財)日本建築センターの「室内空気中の揮発性有機化合物汚染低減建材認定基準」(BCJ-CS-5-2003)による認定。

注4) 放散量の少なさについてはNHLの持つアルカリ成分によるホルムアルデヒドの中和効果が推察されるが、本報ではその詳細分析は実施していない。

注5) 元名古屋大学教授の松原輝男氏の撮影によるものである。

注6) 日本ベル(株)のBELSORP-mini IIを使用し、測定温度-196℃で測定した。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会編: 建築設計資料集1(環境), 丸善, 2001
- 2) (財)建材試験センター: 調湿建材の調湿性能評価基準, 2006.3
- 3) 長野克則, 足立卓彌他: 改質珪内珪質頁岩を用いたVOC吸着性能の向上, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2007.9
- 4) 中林沙耶, 長野克則他: 潮解性物質担持珪内珪質頁岩の吸放湿特性, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2007.9
- 5) 長野克則: 調湿材の技術の進展, 空気調和衛生工学第82号第8号
- 6) 池嶋良, 中島裕輔他: NHL(天然水硬性石灰)の環境性能に関する研究(その1) 吸放湿性能・ガス吸着性能評価, 日本建築学会関東支部研究報告集, 2009.3
- 7) 名古屋尚代, 中島裕輔他: NHL(天然水硬性石灰)の環境性能に関する研究(その2) 試験体による熱的性能調査とシミュレーションによる室内環境評価, 日本建築学会関東支部研究報告集, 2009.3
- 8) 山田正也, 中村仁子, 中島裕輔: NHL(天然水硬性石灰)の各種環境性能調査と用途開発に関する研究(その1) 試験体による基礎的環境性能調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集D-2, 2008.9
- 9) 綿貫博文, 林下昂, 中島裕輔他: NHL(天然水硬性石灰)の環境性能調査と用途開発に関する研究, 日本建築学会関東支部研究報告集, 2008.3
- 10) 松岡美帆, 中島裕輔: NHL(天然水硬性石灰)の各種ガス吸着性能とLCCO2評価に関する研究, 日本建築学会関東支部研究報告集, 2007.3

[2009年2月20日原稿受理 2009年4月6日採用決定]