資源鉱物を主とする高度物質循環型環境制御技術の開発

研究代表者　　山﨑　淳司
（創造理工学部 環境資源工学科　教授）

１．研究課題

本プロジェクト研究の目的は、未利用の資源鉱物および各種生産プロセスから大量に排出される廃棄物をグリーンプロセスで改質し、さらに対象により実質的に利用可能な無機系の原料素材を組み合わせることによって、イオン・分子の高選択吸着性・触媒分解性を有する素材を創製し、ゼロエミッションを基本とする高度循環型の環境浄化・制御技術を構築し、SDGsの実現に寄与する社会実装の実現を目指すことである。本プロジェクトでは、前プロジェクト研究からの継続テーマも含めて、主に（１）高機能性の規則的ナノ細孔質アルミノケイ酸塩物質、（２）メソ細孔質のアルミノケイ酸塩ポリマー（ジオポリマー）硬化体、（３）金属ケイ酸塩または金属シリサイドおよびそれらを２次処理することによって得られる複金属酸化物、などの物質系を中心に、既存のイオン・分子ふるい材料、触媒材料、マクロ構造材料より特異な高機能物性を有する無機系の素材・材料を創製し、さらにこれらの素材・物質を対象サイトに合わせて選択・組合せることにより、低コストで現実的な土壌・水環境の浄化・改善技術を提案する。さらに、２次的に産生する廃材のカスケード利用や再生・循環利用法の開発により、極力環境に低負荷で省エネルギーの資源循環システムを構築することにより、地球環境および生活環境に調和した持続的な社会発展へ要素技術の確立に資することを目標とする。

２．主な研究成果

ポリスチレンフォーム板吹付け用のジオポリマーモルタルの調製

ジオポリマーセメントは、既存のポルトランドセメントと比較して、原料調製時の石灰焼成による炭酸ガス発生が無く、耐久性、耐熱性、耐酸性等の物性に優れており、次世代の建築・建設用原材料として注目されている。本研究では、短期設営建築物や超軽量建築・建設材料に用いられる、ポリスチレンフォーム被覆積層用セメント吹付け材としてのジオポリマーセメントモルタル材を作成し、その配合による諸物性の変化を検討した。試験試料は、JIS１種フライアッシュ（FA)、高炉スラグ（BFS)、6 号珪砂、シリカフューム（SF)、流動化剤（SP1)、収縮低減剤（SP2)、KOH の配合を変えて混合・混錬したスラリーを調製した。このスラリーをリシン・モルタル用スプレーガンにてほぼ垂直に立て掛けた発泡ポリスチレンフォーム板に 0.5 MPa 加圧で吹付けたのち、乾燥炉中で、60 ℃、24 時間の乾燥養生して、試験試料を作製した。本研究では、比較検討と配合の最適化のために、表１に示した原料比：アルカリ／水比(A/W 比)、シリカ／アルカリ比（Si/A 比)、水／粉体比（W/P 比）を基本配合として、6 号珪砂、SP1、SP2 以外の原料の質量比を 1.2～2.0 倍とした配合のモルタルスラリーを作製し、同条件で加熱養生した試料を各試験に供した。

表 1 基本のジオポリマー吹付け材の配合

A/W	Si/A	W/P	FA	BFS	6 号珪砂	SF	SP1	SP2	KOH	水
モル比		体積比	kg/m³							
0.150	0.216	1.38	206.4	250.3	1440.0	25.38	0.967	11.03	111.5	238.2

作製したモルタル吹付け発泡ポリスチレンフォーム試料では、モルタルスラリー粘度が高い配合（水／粉体比≦1.1 倍）では噴射口から噴出せず、逆に低い粘度の配合（水／粉体比≧1.4 倍）では被覆層の厚みが出ずにダレてしまった。また、水／粉体比が 1.2 倍、1.3 倍の配合のモルタルスラリーの吹き付けでは、厚みのある平坦な被覆層を形成することができた。（図 1

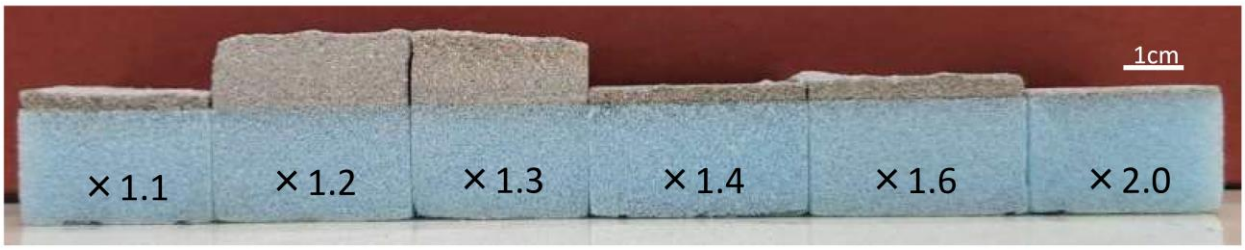
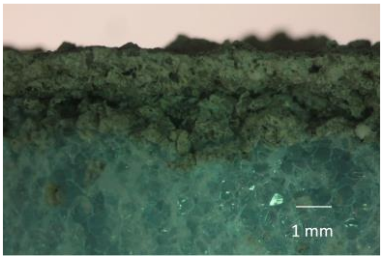


図 1　モルタルを吹付けた発泡ポリスチレンフォームの外観
（試料 ×1.1, ×1.2, ×1.3, ×1.4, ×1.6, ×2.0）

また、加熱養生後の試料の断面では、ジオポリマーモルタルが基板の発泡ポリスチレンフォーム表面の凹凸に浸入して密な界面を形成し、十分な接着強度を得ていることがわかった。（図 2）　さらに、今回作成した全てのジオポリマーモルタル試料の XRD 図で、CuKα 2θ=29°付近をトップとするブロードピークが見られ、BFS 由来の C-S(A)-H 相が形成されていることが推察された。



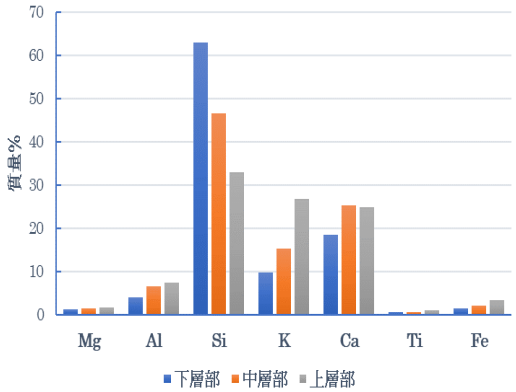


図 3　1.2 倍で作製したジオポリマーモルタルの化学組成

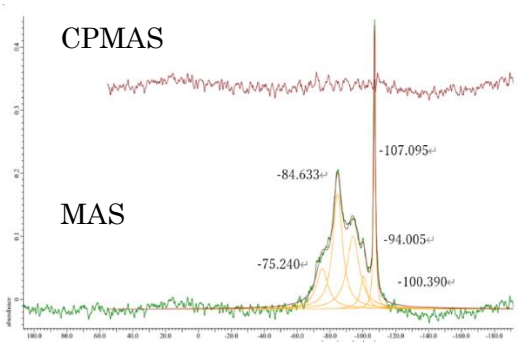


図 4　1.2 倍で作製したジオポリマーモルタルの²⁹Si MAS NMR スペクトル図

吹付け層の上層（表面近く）、中層部、下層部（基板との界面近く）の XRF 分析による化学

組成の比較を図 3 に示す。下層部は上層部に比較して、Si が多く、Ca が少ない結果が得られた。これは養生過程において、吹付け被覆層中で細骨材の珪砂が沈降し、珪砂の割合が多くなったことが考えられる。また、中層部から上層部において Ca の量が変化していないことから、BSF 由来で生成した C-S(A)-H 相は、中層部に比較的集中していることが示唆された。

1.2 倍配合のジオポリマー吹付け材の^{29}Si MAS-NMR スペクトルは、-75 ppm 付近、-85 ppm 付近、-95 ppm 付近、-100 ppm 付近、-107 ppm 付近の 5 つのケミカルシフトピークに分離することが出来た。(図 4) このうち、-107 ppm 付近のピークは、珪砂由来と考えられる。-75 あるいは-84 ppm を示すピークは C-S(A)-H 由来の Q_1～Q_2 構造等によるものと推察されるが、Q_4 構造に特徴的な ^{29}Si-CP-MAS-NMR でピークを示さないこと等から、基本的にアルミナケイ酸塩ポリマー構造中の格子欠陥の存在が示唆された。

参考文献

1) 上原元樹、南浩輔、平田紘子、山崎淳司(2015) ジオポリマー硬化体の配合・作製法と諸性質、コンクリート工学年次論文37, 1, 1987-1992,

2) 上原元樹、佐藤隆恒、小坂征雄、山口正廣(2019) 左官用ジオポリマーモルタルの室温養生による調製と諸特性、コンクリート工学年次論文集, 1, 1937-1942

３． 共同研究者

安井 万奈（理工学総合研究所 招聘研究員）
林　政彦（理工学総合研究所 招聘研究員）
劉　兆涛（理工学総合研究所 嘱託研究員）

４． 研究業績

4.1 総説・著書

4.2 招待講演

4.3 受賞・表彰

4.4 学会および社会的活動

資源・素材学会　代議員
無機マテリアル学会　理事
日本繊維状物質研究協会　理事
日本ゼオライト学会　編集委員

５． 研究活動の課題と展望

国内に大量に賦存しながらほとんど未利用の資源鉱物および大量処分されている非金属質の無機廃棄物の資源循環利用システムの構築は、今後の地球規模の環境保全修復を考えていくうえで重要な課題である。これらを主原料として、建築・建設用原材料であるセメント系素材物質について、低エネルギー、カーボン・ニュートラルで環境負荷の少ない製造プロセスの創製は、地球環境に親和的な持続的発展社会のインフラ構築のみならず、これからの元素戦

略を踏まえた素材材料創出のためにもますます重要性が高まっていると推測できる。この課題を先行して解決するために、国内に止まらず近隣諸国に賦存する原料資源鉱物および資源物質となる廃棄物の探索をさらに進めていく。そして、資源循環システムの構築研究を基盤として、より高度で現実的な環境浄化・制御システムと SDGs 実現に貢献するマクロからミクロまでの高機能性素材物質の創製研究を実施する予定である。