

持続的循環型環境構築のための資源素材開発

研究代表者 山崎 淳司
(創造理工学部 環境資源工学科名 教授)

1. 研究課題

未利用の天然資源原料や廃棄物のカスケード利用は、最終廃棄物の減容・減量と新規利用可能な資源の開拓という点で、今後の持続的な循環型環境の構築の重要な要素技術となりえる。本研究では、既存の C-S-A-H 系ポルトランドセメントに代わる次世代の硬化体素材として、生産工程で二酸化炭素の発生が少ないジオポリマー（以下 GP）セメントを対象として、従来法より迅速かつ低コストに要求されるスペックを満たす試料作成法を構築する。GP 硬化体は、種々の産業副産物を有効利用でき、ポルトランドセメントに匹敵する力学的強度とそれに勝る対酸性を有するが、その最適配合は系統的に十分解明されているとは言い難い。さらに、未だ十分にわかっていない GP セメントの構造、イオン交換性等の特性とその発現機構を解明し、新規の実用的な構造材料素材および環境浄化素材の創製を目指す。

2. 主な研究成果

2.1 ジオポリマー硬化体の調製

本研究では、作製法に関して「一般法」および「シリカ成分溶解法（以下溶解法）」について検討を行った。両調製法は、フライアッシュ、NaOH および Ca 源（例えば水砕高炉スラグ（以下 BS））を原料とする点は同じであるが、一般法ではケイ酸 Na 水溶液を、溶解法では適当なシリカ源（例えばシリカヒューム（以下 SF））を配合する点異なる。両調製法について、アルカリ/Si 比、アルカリ/水比、粉体/水比の3因子および養生条件により、目的物性に応じた最適調製条件がほぼ決定できることを明らかにした。加温養生2日後の GP コンクリート各試験体に関して、圧縮、割裂引張および曲げ強度測定と、水銀ポロシメーターによる細孔径分布量を測定した。さらに、塩水浸漬試験は JSCE-G572-2003(浸漬によるコンクリート中の塩化物イオンの見かけの拡散係数試験方法(案))に準じて行った。全 Cl^- イオンは JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準じて、可溶性 Cl^- イオンは JIS A 1154 附属書 2 (参考)「硬化コンクリート中に含まれる温水抽出塩化物イオンの分析方法」に準じて算出した。また、各硬化体試料に塩化物イオン量が 2.4kg/m^3 となるよう NaCl を加えた GP コンクリート試験体を作製し、鉄筋腐食特性（異形鉄筋:SD345,D19）を検討した。

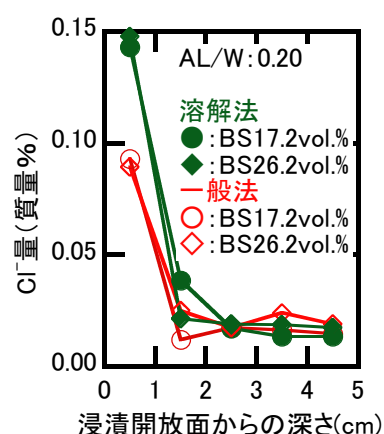


図1 GP コンクリート試験体の
塩水浸漬試験結果

表1 GP コンクリートにおける鉄筋の腐食特性試験結果

試番	1		2		3		5	
NaCl 添加	有	無	有	無	有	無	有	無
腐食減量(質量%)	0.38	-	-	-	-	-	-	-
自然電位 mV vs. Ag/AgCl	-328.6	-40.7	-259.4	-25.3	-249.0	-51.1	-146.8	-91.5

注: 試番は, 表1参照 Cl=2.4kg/m³ -:0.1%以下

結果として、GP コンクリート硬化体の塩水浸漬試験において、可溶性塩分の全塩分に占める割合は配合および作製法による相違は小さいが、「溶解法」は「一般法」と比較して、同配合では塩分浸透抵抗性が小さくなることがわかった。さらに、一般法に対してアルカリ／水比および BS 置換量が大きい配合にすると同等の特性が得られることを明らかにした。鉄筋腐食特性に関しては、配合による大きな差異は現在の所、得られていない。

2.2 ジオポリマー硬化体のイオン交換特性

GP 硬化体は、3次元アルミノシリケートの細孔質無機ポリマー構造を有することから、ゼオライトと類似の特異なイオン交換特性を有する。メタカオリンを主原料として一般法により調製した GP 硬化体の微細構造を図2、3に示す。

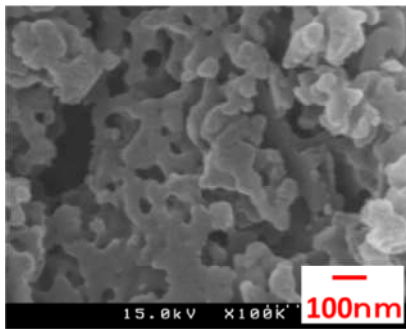


図2 ジオポリマー硬化体の SEM 像

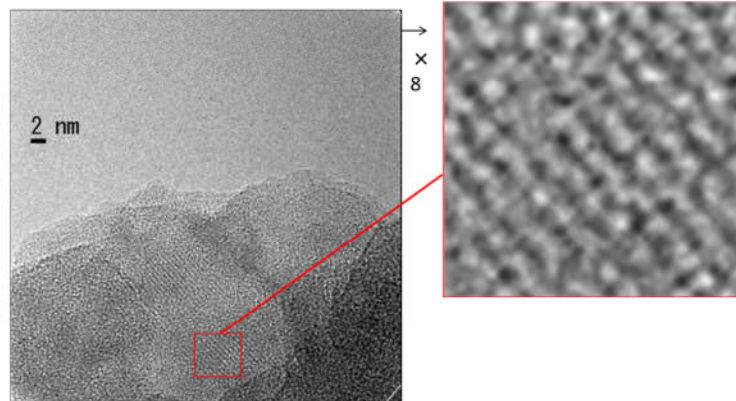


図3 ジオポリマー硬化体の HR-TEM 像

GP 硬化体を Si/Al 比 1.0～2.2 で調整したところ、比較的低 Si/Al 比では部分的にゼオライトの LTA 型構造が生成して 400 meq/100 g 以上の陽イオン交換容量を示すことがわかった。

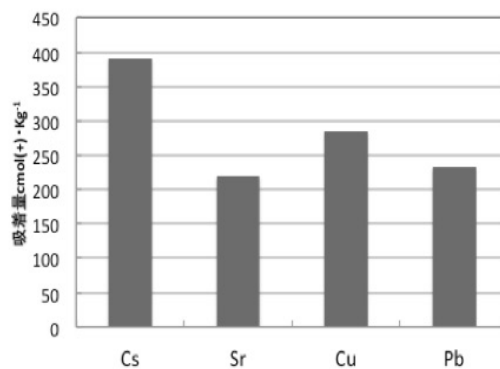
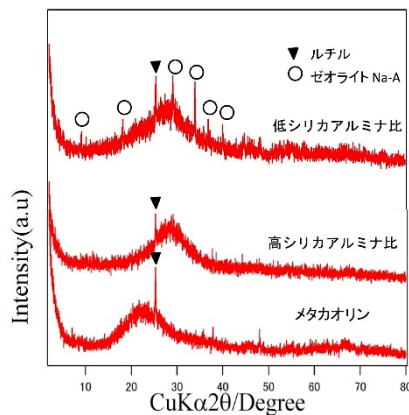


図4 メタカオリンおよびジオポリマー
硬化体の X 線回折図

図5 ジオポリマー硬化体の各種陽イオンの
吸着容量

また、0.1 mol/L のセシウム、ストロンチウム、鉛、銅を含む水溶液をそれぞれ調製し、GP 硬化体粉末を固液比 1:500 の条件で加えた後、ジャーテスターにより 300 rpm で 3 時間攪拌を行った後固液分離し、純水洗浄後に回収乾燥した固相試料を EDS により組成分析して各元素の吸着量を測定した(図5)。次に、人工海水試薬(マリンアート SF-1)を純水に添加して調製した人工海水 100 %試験溶液に塩化ストロンチウムを添加し、固液比 1:100 の条件で各種陽イオン吸着剤(粒径 0.5-1.0mm)を加えて 24 時間振とう後、人工海水原液と試験後の溶液のストロンチウム濃度を ICP-AES により測定し、分配係数を求めた(図6)。これらの試験結果により、本 P 研で調製された GP 硬化体は、ストロンチウムに対して、海水中において優れた選択吸着性能を有することが示された。

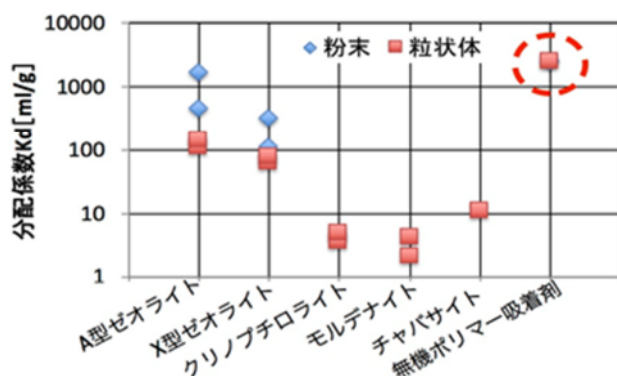


図6 各種吸着剤のストロンチウム吸着分配係数の比較 (海水 100%)

3. 共同研究者

福田 恭彬 (理工学研究所 招聘研究員)

安井 万奈 (創造理工学部 環境資源工学科 客員次席研究員)

4. 研究業績

4.1 学術論文

M. Nagao, Y.-G. So, H. Yoshida, K. Yamaura, T. Nagai, T. Hara, A. Yamazaki, K. Kimoto, Experimental observation of multiple-Q states for the magnetic skyrmion lattice and skyrmion excitations under a zero magnetic field, Physical review, B92, 140415 (pp 1-5) (2015)

T. Kuroda, S. Komine, M. Nagao, A. Yamazaki, Changes in the microporous structure of geopolymer by syneresis conditions, Clay Sci., 19, 1, 11-16 (2015)

M. Nagao, Y.-G. So, H. Yoshida, T. Nagai, K. Edagawa, K. Saito, T. Hara, A. Yamazaki, K. Kimoto, Real space observation of skyrmion polycrystallization and its domain boundary behavior in $\text{FeGe}_{1-x}\text{Si}_x$, Appl. Phys. Express, 8, 3, 033001 (2015)

大野睦浩, 横田季彦, 小林 裕, 山崎淳司, ナノサイズ・ハイドロタルサイト様物質による低濃度フッ素含有排水の処理, J. Soc. Inor. Mater., Jpn, 22, 47-51 (2015)

4.2 総説・著書

4.3 招待講演

4.4 受賞・表彰

4.5 学会および社会的活動

日本熱測定学会 編集委員

日本粘土学会 副会長

5 研究活動の課題と展望

未利用の天然鉱物原料や廃棄物のカスケード利用として、フライアッシュおよび低品位の天然鉱物原料から、高機能性ジオポリマー硬化体を既存のセメント製造に比較して二酸化炭素の発生が少ない調製法を構築し実用化したことで、本 P 研究の当初目標を達成したと考える。しかし、社会が環境調和型で持続的発展するために直近で要望されている高度カスケード利用技術や、対応すべき未利用の天然鉱物原料や廃棄物は多々賦存することから、蓄積した成果を元に新規の実用的な環境に低負荷型の環境浄化技術に新規の方向性を提案する計画である。