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　山﨑　淳司
（創造理工学部 環境資源工学科　教授）

１．研究課題

低品位の珪石、石灰石など未利用の天然資源原料や、石炭灰などの廃棄物のカスケード利用は、最終廃棄物の減量と新規利用可能資源の開拓という点で、今後の持続的な地球環境調和型社会の構築に重要な要素技術となりえると考える。本研究は、生産に膨大な熱エネルギーと炭酸ガス放出を伴う現在の C-S-A-H 系セメントに代わる次世代の建築・建設用原材料として、基本的に加熱を要せず、工程で二酸化炭素の発生が少ないジオポリマー系セメントについて、従来法より迅速かつ低コストに、JIS および協会で規定されるスペックを満たす硬化体の作製方法の確立にすでに成功している。これらのことから、本グループは上述の問題を解決し、新規の実用的な環境浄化（用の素材を用いた）技術の確立、ならびに環境に低負荷型の新しい環境浄化技術に新規の方向性を提案することを研究課題としている。

２．主な研究成果

今年度は、建材・建設用原材料として一般的に用いられる石炭火力発電所から排出される石炭灰のうち、石英、ムライトなどの結晶質が少ないスラグを主原料として、①マイクロ波照射養生によるジオポリマーペースト硬化体の迅速養生、②シリコン添加による水素発泡による新規の機能性を有する軽量ジオポリマー硬化体の作製について検討を行った。ジオポリマーペーストの調製は、200 mesh 以下の粒度に粉砕した石炭灰スラグ粉体、１号水ガラス、水酸化ナトリウム水溶液を主原料として湿式加熱養生によって行うが、その配合条件は、アルカリ／シリカ比、アルカリ／水比および粉体／水比の３因子を基本に設定した。これに発泡剤として、半導体工場から排出される CMP 残差粉末（商品名 P-Sip。Si>99.9 %、粒径<φ0.1 μm）を用いた。また発泡制御には、整泡剤として東邦化学工業（株）製の界面活性剤を２種混合し、出発原料固相に対して 0.001～0.3 wt%添加した。

CMP 残差粉末（P-Sip）の添加量の増加に応じて、生成硬化体の堆積膨張率が増大し、対応してかさ密度が減少することがわかった（図１）。

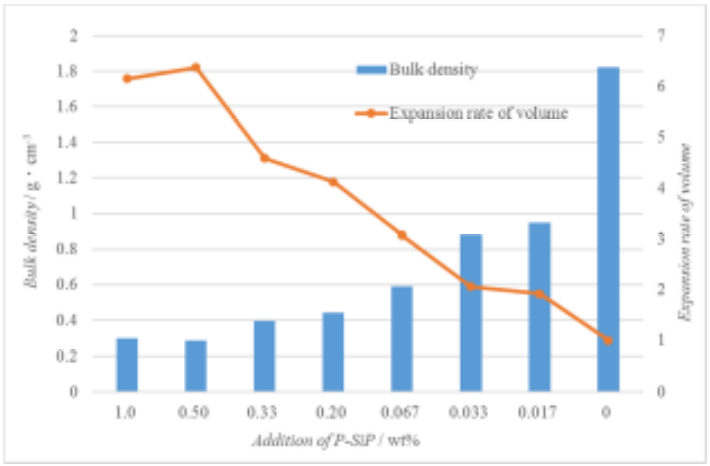

図１　CMP 残差粉末（P-Sip）添加量に対するかさ密度と膨張率の変化

また、発泡ジオポリマーは、アルカリ／水比に依存するスラリーの粘性が高いほど、水素ガスの発生により形成される気泡の薄膜化が抑制されるためその安定性が向上し、かさ密度が減少し、体積膨張率が上昇することがわかった。

さらに、整泡剤を添加して発泡させることにより、ジオポリマーペースト硬化体中の生成気泡の性状が比較的細かい独立気泡構造を示すように制御できることがわかった（写真１）。

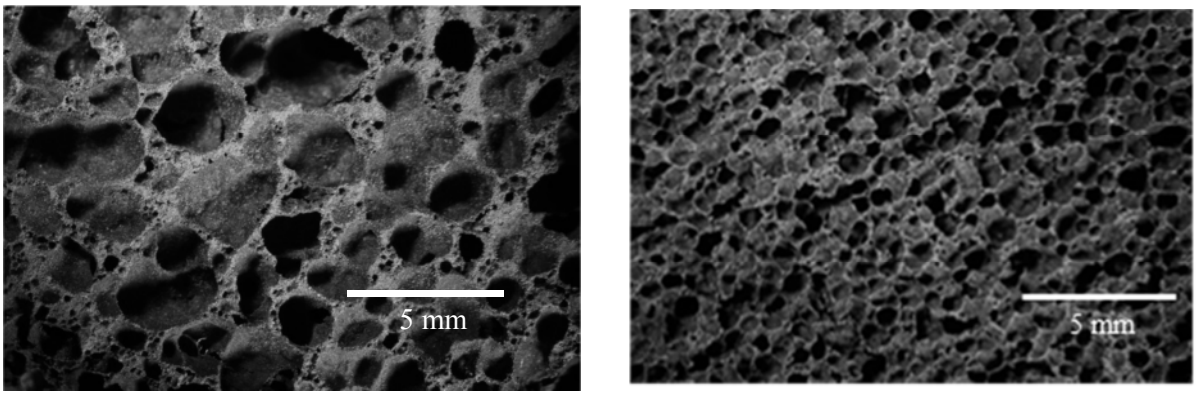

写真１　P-SiP 添加量 0.005 wt%のジオポリマーペースト硬化体の実体顕微鏡写真
（左 ： 整泡剤なし、右 ： 整泡剤あり）

ジオポリマー発泡硬化体は、CMP 残差粉末（P-Sip）添加量が増加すると、水素ガス発生量の増加に伴い起泡性が促進し、かさ密度も段階的に減少するが、添加量 0.5 wt%を超えると、起泡性が向上してもサンプル自身の加重によって破泡する現象が発生し、かさ密度の最小限界となることが示唆された。また、整泡剤の添加によって気泡性状を制御してもかさ密度は大きく変化しないことが示された（図２）。

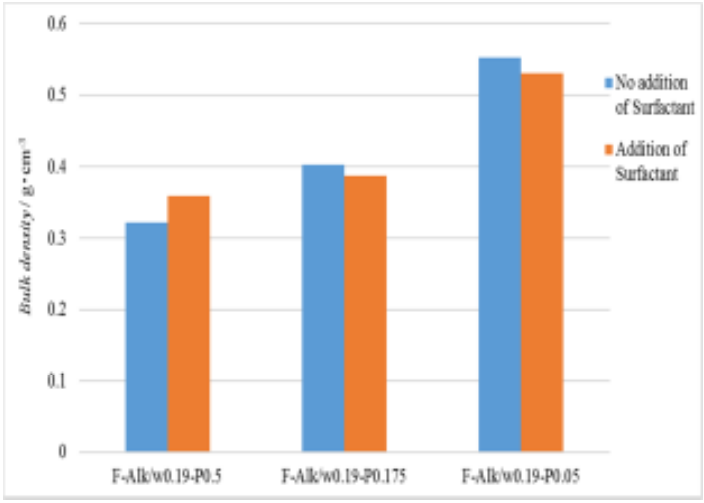

図２　P-SiP 添加量（0.5, 0.175, 0.05 wt%）のときの整泡剤添加の有無によるかさ密度の変化

得られたジオポリマー発泡硬化体について板状試験片を成形作製し、圧縮強度および熱伝導率を測定した。ジオポリマー発泡硬化体は、成形体のかさ密度の低下にともない熱伝導率の顕著な低下が認められた。空気は優れた断熱性を示すことから、硬化体内の気孔率が熱伝導率と大きな相関性があることが示唆された（図３）。また、CMP 残差粉末（P-Sip）添加量が増加して、かさ密度が減少するほど、圧縮強度が減少した。しかし、整泡剤を添加して気泡構造を微細・分散化することで、圧縮強度が向上することが示された（図４）。

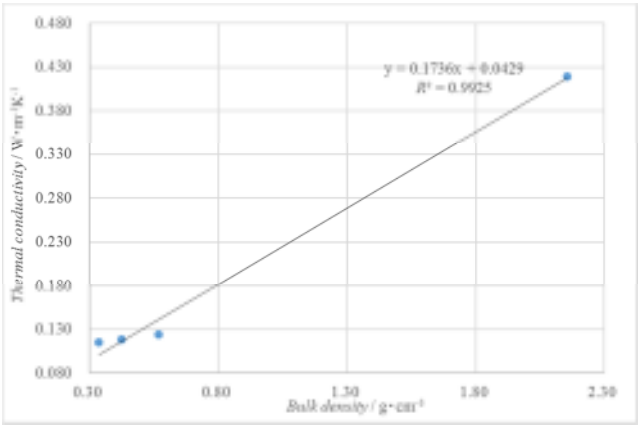

図３　ジオポリマー発泡硬化体のかさ密度と熱伝導率の関係

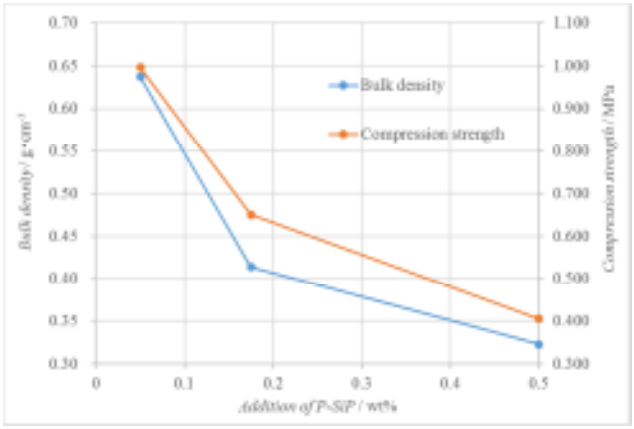

図４　P-SiP 添加量とジオポリマー発泡硬化体のかさ密度および圧縮強度との関係

本年度の研究で、独立気泡構造を有するジオポリマーペースト発泡硬化体の迅速作製に成功し、ジオポリマーセメントが元来有する耐化学性に加えて、高断熱性、高耐熱性、不燃性、高強度など、既存の建材・建設用原材料が有する課題をクリアした無機セメント質材料としての応用が期待できることが示された。

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）
本文　（MS 明朝体、11 ポイント）

４．　研究業績

4.1 学術論文

Y. Sugiura, K. Onuma, A. Yamazaki, Enhancement of HPO_4–OH layered structure in octacalcium phosphate and its morphological evolution by acetic acid" Journal of the Ceramic Society of Japan, 124, 11 (2016)

4.2 総説・著書

4.3 招待講演

4.4 受賞・表彰

日本粘土学会　学会賞

4.5 学会および社会的活動

日本ゼオライト学会　編集委員
日本粘土学会　副会長
無機マテリアル学会　理事

５．研究活動の課題と展望

未利用の資源物質や廃棄物のカスケード利用として、既存のセメント系素材に比較して高機能性を有するジオポリマーペースト発泡硬化体の作製法を構築したことで、今年度の本黒ジェクト研究課題の当初目標は達成したと考える。しかし、社会実装する上で、要望される原料供給コスト・安定性、さらに複合的な要望性能を実現するには、さらなる検討が必要と考える。これまで蓄積した成果を元に、当該分野のメーカー等との共同研究の実施、公的事業による実証試験を提案して、新規の実用的な素材・材料開発技術の構築と社会実装を志向する予定である。