

製紙スラッジ焼却灰の固化性能

愛媛大学大学院 学生会員 ○足立望美

愛媛大学 正会員 木下尚樹 愛媛大学 正会員 安原英明

1. はじめに

近年、産業廃棄物の新たな埋め立て処分場の確保が困難になってきており、最終処分場の残余容量も少ない。全国の産業廃棄物の総排出量は約 3.8 億トン、そのうち中間処理されるものは約 2.9 億トンである。中間処理された廃棄物は約 1.3 億トンまで減量化され、再生利用あるいは最終処分されているのが現状であり、産業廃棄物の再利用やリサイクルが課題となってきている。製紙業が盛んな地域では、汚泥排出量の多くを製紙スラッジが占めている。そこで、腐敗防止や減量化およびサーマルリサイクルに利用するため焼却され、製紙スラッジ焼却灰（Paper Sludge Ash：PS 灰）となる。製紙スラッジ焼却灰は幅広い分野での有効活用が検討されているが、大部分が埋め立て処分されている。本研究では、製紙スラッジ焼却灰の組成および固化特性に着目し、製紙スラッジ焼却灰の固化性能について述べる。また、製紙スラッジ焼却灰を用いて作製した供試体の強度特性を評価する。

2. 実験概要

本実験では、焼却される時にバグフィルターで吸着された細かい灰であり、排出時期が異なる 2 種類の製紙スラッジ焼却灰を使用する。配合は  $w/p=1.0$  と設定し、表 1 に示す。供試体の寸法は、幅 40 mm、高さ 40 mm、長さ 160 mm とし、手順や方法はセメントの強さ試験に準じて行う。養生期間は 7 日、28 日、91 日、養生条件は室温 20 °C で一定、湿潤状態とし、乾燥防止および供試体に含まれる水分のみの水和反応を確認するため、真空パックに入れて保管する。また、比較対象として、普通ポルトランドセメント（OPC）を使用、配合が  $w/c=1.0$  の供試体を作製する。製紙スラッジ焼却灰を用いて作製した供試体の強度特性を確認するため、圧縮試験を行う。さらに、製紙スラッジ焼却灰の構造観察および水和反応物、鉱物の同定をするため、X 線回折分析（XRD）を行う。また、走査型電子顕微鏡（SEM）を行った後に、エネルギー分散型 X 線分光法（EDX 分析）により供試体表面の元素を測定し、鉱物同定を行う。

3. 製紙スラッジ焼却灰の化学組成

製紙スラッジ焼却灰の化学組成を知るため、X 線蛍光分析（XRF）を行った結果を表 2 に示す。また、比較対象として普通ポルトランドセメント（OPC）を使用する。製紙スラッジ焼却灰の主成分は  $CaO$  および  $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$  であり、普通ポルトランドセメントの主要な原料は、 $CaCO_3$ （石灰石）と  $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$ （粘土）である。また、普通ポルトランドセメントの主原料に含まれる成分が製紙スラッジ焼却灰にもあり、同様に水和反応や固化が起こる可能性は十分に考えられる。しかし、製紙スラッジ焼却灰は普通ポルトランドセメントより  $Al_2O_3$  が多く、 $Fe_2O_3$  が少ない。また、製紙スラッジ焼却灰の焼却温度は約 800～900 °C であり、普通ポルトランドセメントの焼成温度は

表 1 基本的な配合（供試体 3 本分）

| w/p | 硅砂 6 号 [g] | 水 [g] | PS 灰 [g] |
|-----|------------|-------|----------|
| 1.0 | 1350       | 450   | 450      |

表 2 化学組成

| 化学組成                           | PS 灰 | OPC  |
|--------------------------------|------|------|
| CaO                            | 57.6 | 63.9 |
| SiO <sub>2</sub>               | 22.2 | 21.9 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 11.6 | 5.2  |
| MgO                            | 3.4  | 1.6  |
| SO <sub>3</sub>                | 2.0  | 2.0  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.9  | 3.0  |
| その他                            | 2.2  | 2.4  |

約 900～1400 °C と温度が異なることから、成分は類似していても同様な水和反応が起こるとは限らない。

#### 4. 製紙スラッジ焼却灰を用いた供試体の構造観察

製紙スラッジ焼却灰を用いた供試体 (PS モルタル) の SEM-EDX 分析結果を図 1 に示す。図 1 (a) の SEM 画像より、針状結晶や板状結晶がみられる。また、図 1 (b) の EDX 分析の結果より、板状結晶はモンモリロナイト (粘土鉱物) であることがわかる。

図 2、図 3 は XRD 結果を示す。図 2 より、材齢 7 日の PS モルタルでは石膏 ( $\text{CaSO}_4$ )、二酸化ケイ素 ( $\text{SiO}_2$ )、炭酸カルシウム ( $\text{CaCO}_3$ ) が確認できた。また図 3 より材齢 91 日の PS モルタルでは、材齢 7 日の PS モルタルで確認できた生成物以外にエトリンガイトが確認できた。針状結晶はエトリンガイトと考えられる。図 1-3 で確認できた生成物は PS モルタルを作製した過程でできたと考えられ、エトリンガイトおよびモンモリロナイトは PS モルタルの強度発現に関係していると考えられる。

#### 5. 製紙スラッジ焼却灰を用いた供試体の強度特性

製紙スラッジ焼却灰を用いた供試体の強度特性を評価するため、圧縮試験を行った。また、一軸圧縮強さと材齢の関係を図 4 に示す。供試体の数は一条件につき 3 個である。PS2 の供試体の材齢 7 日の一軸圧縮強さは、1.8 MPa、材齢 28 日では 5.9 MPa、材齢 91 日では 16.6 MPa、である。また、PS3 の供試体の材齢 7 日の一軸圧縮強さは、3.2 MPa、材齢 28 日では 13.9 MPa、材齢 91 日では 17.9 MPa、である。比較対象としている  $w/c=1.0$  の供試体の材齢 7 日では、10.2 MPa、材齢 28 日では 17.6 MPa、材齢 91 日では 20.0 MPa である。現段階では、OPC を用いた供試体より強度は少し低い、同等な強度が得られた。

#### 6. おわりに

製紙スラッジ焼却灰に含まれる粘土鉱物および水和反応による生成物が PS モルタルの固化および強度発現に寄与していると考えられる。製紙スラッジ焼却灰の排出時期別で経時変化および構造観察や材料の強度や溶出特性を把握することを今後の課題とする。

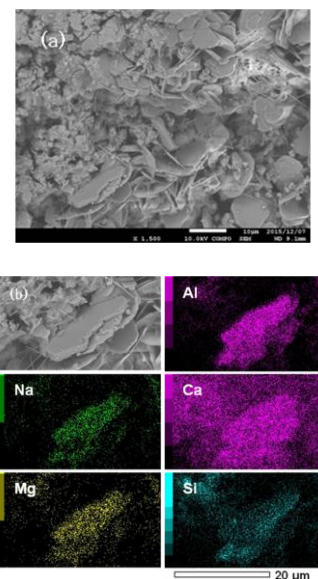


図 1 SEM-EDX の結果 (材齢 91 日)  
(a):SEM 画像, (b):EDX 分析の結果

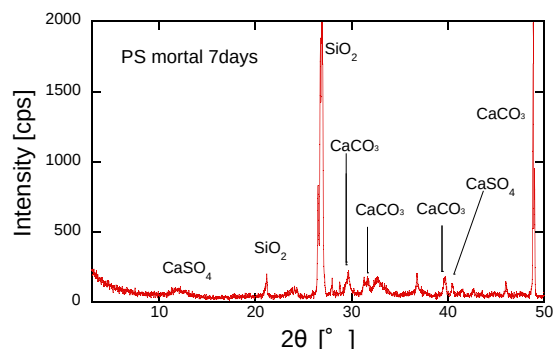


図 2 X 線回折分析の結果 (材齢 7 日)

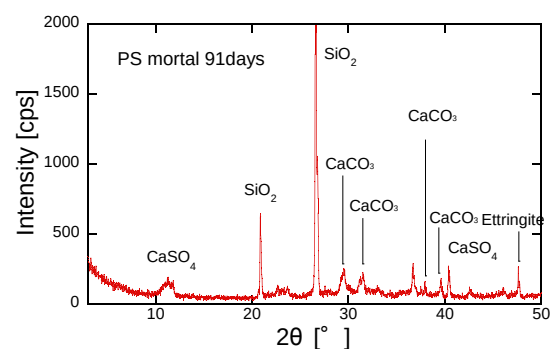


図 3 X 線回折分析の結果 (材齢 91 日)

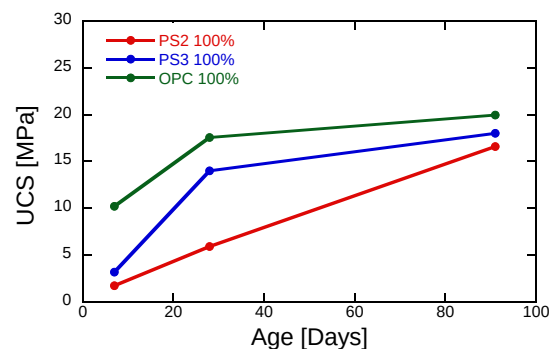


図 4 一軸圧縮強さと材齢の関係