

報告 スプレードライ法で作製した炭酸化スラッジ粉末の基礎的特性に関する検討

鈴木 好幸*1・谷田貝 敦*2・安部 弘康*3・石川 伸介*4

要旨: 本研究では、スラッジ水を模擬したセメントミルクを使用して、CO₂ 供給後に社会実装を想定した実大規模の工業用スプレードライヤによって製造した炭酸化スラッジ微粉末の基本的特性を把握するため、CO₂ 供給量を変化させたときの粉体特性や CO₂ 固定量、各鉱物組成の違いを検討した。その結果、製造した炭酸化スラッジ微粉末の特徴的な性質として、BET 比表面積が 55~80m²/g と非常に大きいことが確認された。また、CO₂ 固定量は、CO₂ 供給量が 1.1 と 1.8kg/kg-cem の試料では同程度で最大 373kg/t となったが、0.7kg/kg-cem の試料では最大 266 kg/t となり CO₂ 供給量による差が認められた。

キーワード: 模擬スラッジ水、スプレードライ法、CO₂、炭酸化、CCU 材料

1. はじめに

コンクリート分野におけるカーボンニュートラルとサーキュラーエコノミーの実現は、持続可能な社会を維持するために欠かせないものである。建設産業は、資源消費量と廃棄物発生量が多い産業であり、全産業廃棄物の約 2 割を占めるとの試算もあるが、一方でリサイクル率が非常に高いことが知られている¹⁾。建設廃棄物の中でも排出量が多いコンクリート塊のリサイクル率は 99% を超えるとされるが、そのほとんどが再生砕石としての道路基礎（路盤材）利用に偏っており、今後、日本において道路の延伸が多くは見込めない中で、道路でのがれき類の受入量が減少することで需給のバランスが維持できなくなることが指摘されている²⁾。また、コンクリート塊を路盤材として使用することは、コンクリートの資源循環の環から外れるため、サーキュラーエコノミーの実現のためには、再生骨材としてコンクリートの使用材料に利用するなど、水平リサイクルの推進が求められる。

他方で、レディーミクストコンクリート工場（以下、生コン工場）では、ミキサやトラックアジテータ車の洗浄水や、残コンクリート・戻りコンクリートから骨材を回収する際にスラッジ水が発生しており、直近のスラッジ発生量は 130 万 m³ になるとの試算もある³⁾。スラッジ水の再利用に向けた取り組みも進められているものの、現状はスラッジ水の多くが脱水したあとにスラッジケーキとして廃棄処分されていることを考慮すると、貴重な Ca 資源であるスラッジを CCU（Carbon dioxide Capture and Utilization）材料として活用することは CO₂ 削減と資源循環の観点から非常に有益である。

LE らの研究⁴⁾では、コンクリートスラッジの湿式炭

酸化により CO₂ 固定量の異なるスラッジを分析することでその反応メカニズムを検討し、混和材として適用できる可能性が示唆されている。

大川らの研究⁵⁾では、残コンクリート・戻りコンクリート起源とする乾燥スラッジ微粉末（Dehydrated Sludge Powder: DSP）を製造し、コンクリート用混和材ならびに再生セメントとしての展開が進められている。さらに DSP に CO₂ を固定化させることで、環境性能向上を目指した研究開発も進められている⁶⁾。

神代らの研究³⁾では、スラッジを脱水したスラッジケーキに着目し、粉碎と水分供給およびサイクロンで風砕処理を行うことで、自然炭酸化（Direct Air Capture: DAC）によって 100kg/t 以上の CO₂ を固定した CCU 粉体を製造できることを示し、コンクリートに細骨材置換して使用することで圧縮強度が増大することを報告している。

以上のように、スラッジを CO₂ 吸収源とし、CCU 材料としての活用を目指したさまざまな取り組みが進められている。筆者らも NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）におけるグリーンイノベーション基金事業の中で、資源循環と CO₂ 固定量の最大化を両立するコンクリートの開発に取り組んでおり、CO₂ を作用させたスラッジの再利用に向けた検討を進めている。

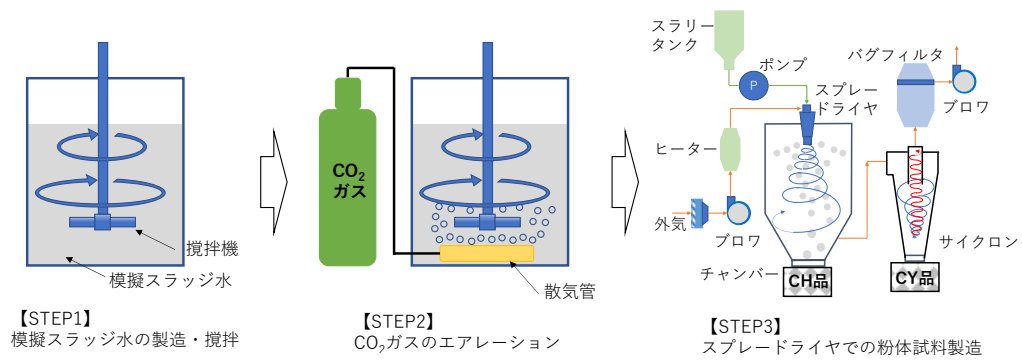
清水らの研究⁷⁾では、スラッジ水に CO₂ を効果的に固定させるための基礎的な検討として、セメントの接水時間および CO₂ バブリング水（CO₂ を微細気泡で導入した水）の供給時間を変化させ、CO₂ を作用させた模擬スラッジ水の CO₂ 固定に関する研究を行っている。その結果、所定量の CO₂ を供給することで、生成された粉末試料の質量に対して約 60% の CaCO₃ が得られることを報告し

*1 (株) 安藤・間 技術研究所脱炭素技術開発部 担当課長 工博 (正会員)

*2 (株) 安藤・間 技術研究所脱炭素技術開発部 担当課長 (正会員)

*3 (株) 安藤・間 技術研究所構造・材料研究部 主席研究員 (正会員)

*4 (株) 安藤・間 技術研究所構造・材料研究部 部長 (正会員)



図－1 CSP 製造工程

表－1 CSP 製造条件

記号	セメント量 (kg)	水量 (kg)	固形分 (%)	CO ₂ 供給までの水和時間 (hr)	CO ₂ 供給流量 (L/min)	CO ₂ 供給時間 (min)	CO ₂ 総供給量 (kg)	セメント当たりの CO ₂ 供給量 (kg/kg-cem)	CO ₂ 供給後固形分 (%)
No1 (0.7)	31	126	20	4	75	120	18	0.7	25.5
No2 (1.1)	25	100	20		150	120	35	1.1	27.5
No3 (1.8)	25	100	20		150	150	44	1.8	27.0

ている。さらに、CO₂ を供給した模擬スラッジ水をスプレードライ法で乾燥および粉体化させた炭酸化スラッジ粉末（Carbonated Sludge Powder、以下、CSP）に対して粉体特性と活性度指数を検討しており、CSP を普通ポルトランドセメントの25%置換したモルタルにおいて、15 打フローの比 0.91、材齢 28 日における活性度指数が 92 の性質を有することを確認しており、コンクリート用混和材として適用できる可能性が示唆されている⁸⁾。

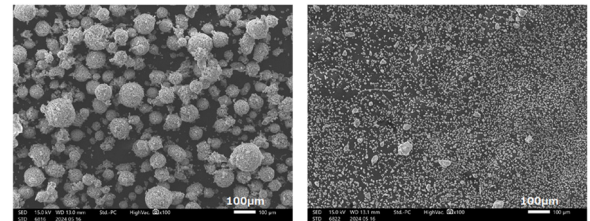
本稿では、スラッジ水から社会実装を想定した実大規模の工業用スプレードライヤによって製造した CSP の基本的特性を把握するため、CO₂ 供給量を変化させたときの粉体特性や CO₂ 固定量、各鉱物組成の違い等を検討した結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 CSP の製造

図－1 に CSP 製造工程を示す。初めに、スラッジ水を模擬したセメントミルク（以下、模擬スラッジ水）を製造した。生コン工場で発生するスラッジ水には、骨材の細粒分や、異なるセメントや混和材料に起因する未水和粒子や水和生成物などが含まれるが、本検討では、CSP の製造条件による粉末試料の粒度や CO₂ 固定量の違いなどの基礎的な特性を把握することを目的としているため、普通ポルトランドセメントと水による模擬スラッジ水を作製して CSP 原料とした。次に、模擬スラッジ水を所定の時間水和させた後に CO₂ ガスのエアレーションを実施した。CO₂ ガスは、CO₂ 濃度 99.5vol.%以上の液化炭酸ガスボンベから模擬スラッジ水中に設置した散気管（空気泡径 20 μm）を通して供給した。その後、スプレードライ法による粉体製造を行った。

スプレードライ法とは、液体を熱風中に散布し、瞬時



写真－1 CH 品と CY 品の粉体形状

に乾燥させることで粉末製品を得る技術で、1800 年代以降から卵や牛乳などの食材の乾燥保存から始まった技術である⁹⁾。液体を微粒化し直接乾燥することによって、球状で流動性の良い粉末製品を得られるなど、さまざまな特徴が生まれることから食材に留まらず多くの産業の生産技術として高い評価を得て発展してきた技術である。

本検討では、CO₂ を供給した後の模擬スラッジ水をスプレードライヤに送り粉体試料を作製した。粉体試料は、乾燥炉であるチャンバーとサイクロンから回収することができ、チャンバーで回収された粉体試料（以下、CH 品）は球形に造粒された比較的粗い粒子が、サイクロンで回収された粉体試料（以下、CY 品）はチャンバーで取り切れなかった微粒子が回収される（写真－1）。なお、サイクロンでも回収できない超微粒子は、バグフィルタで捕集されるが、本検討では回収せずにロス分として扱った。

表－1 に CSP 製造条件を示す。模擬スラッジ水の固形分は 20wt.%とし、CO₂ 供給までの水和時間を 4 時間とし、模擬スラッジ水への CO₂ 供給量を 3 水準設定した。模擬スラッジ水の容量が異なるため、セメント 1kg あたりの CO₂ 供給量で整理すると、それぞれ 0.7, 1.1, 1.8 kg/kg-cem となる。表－1 には、CO₂ 供給後の模擬スラッジ水の固形分の測定値も示しているが、CO₂ 供給後では 25.5～27.5%に増加していることが分かる。

表-2 スプレードライヤ運転条件

入口温度 (°C)		出口温度 (°C)	送液量 (L/h)	ディスク回 転数 (rpm)
設定値	実測値	実測値		
250	238~250	126~164	10	15000

表-2 に、スプレードライヤの運転条件を示す。本検討で使用したスプレードライヤは、液体処理能力の指標となる水分蒸発量が 20kg/h であり、噴霧方式はアトマイザーディスク方式とした。アトマイザーディスク方式とは、スラリーをディスク内に充填し、ディスクを高速回転することでスラリーをチャンパー内に噴霧する方式であり、処理速度が高く、ディスクの回転速度に応じて粒度分布を $20\mu\text{m}$ ~ $80\mu\text{m}$ で制御可能である。今回はディスク回転数を 15000rpm に設定し、粒度分布は体積平均径で $20\mu\text{m}$ 程度の粉体が得られた。

2.3 粉末試料の評価

(1) 密度、比表面積測定

密度試験は、全自動ガス置換式密度計を用い、気体はヘリウムガスを用いた。比表面積試験は、JIS A 6201 に準じてブレン空気透過法によるブレン比表面積測定と窒素吸着法 (1 点法) による BET 比表面積の測定を行った。BET 比表面積の測定では、試料を 105°C で 8 時間程度乾燥させた。

(2) 走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察

粉末粒子の形状や表面状況を確認するため走査型電子顕微鏡 (SEM) による観察を行った。

(3) 示差熱重量分析 (TG-DTA)

試料中の CO_2 含有率の測定を目的として示差熱重量分析 (TG-DTA) を実施した。装置は、水平差動方式で、温度範囲は室温から 1000°C 、昇温速度は $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、炉内雰囲気は N_2 ガスで流量 $300\text{ml}/\text{min}$ の条件で測定を行った。 CO_2 含有率の定量では、 CaCO_3 の脱炭酸反応を捉えるための温度範囲 $550\sim 850^{\circ}\text{C}$ での質量減少率に加え、アラゴナイト、バテライトおよび非晶質炭酸カルシウムによる脱炭酸の影響も考慮するため $350\sim 850^{\circ}\text{C}$ での質量減少率も確認した。

(4) 湿式分析

CO_2 含有率の測定では、TG-DTA の結果と合わせて、湿式分析による測定も実施した。湿式分析は、文献¹⁰⁾を参考に試料を塩酸で分解し、生成した CO_2 を水酸化ナトリウム・塩化バリウム溶液に吸収させ、塩酸標準溶液を用いた滴定により CO_2 含有率を測定した。

(5) X 線回折分析 (XRD) / リートベルト解析

粉末試料の鉱物組成の同定と定量のため、X 線回折分析 (XRD) / リートベルト解析を実施した。XRD の測定条件は、ターゲットを Cu、電圧/電流を $45\text{kV}/40\text{mA}$ とし、走査範囲を $5\sim 65^{\circ}$ 、ステップ幅を $0.03^{\circ}/\text{STEP}$ とした。

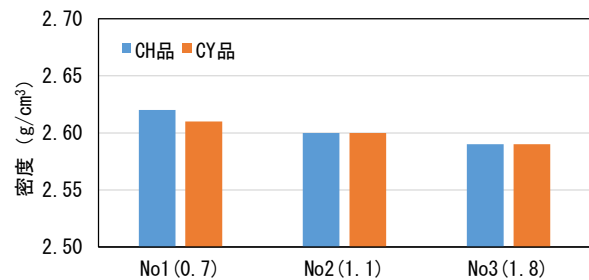


図-2 密度

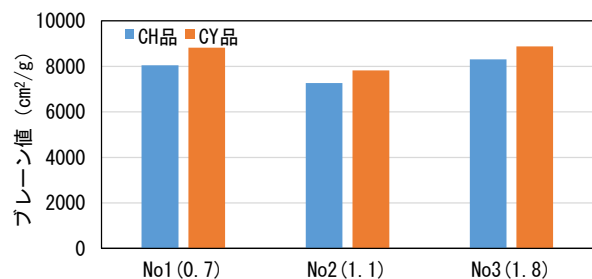


図-3 比表面積 (ブレン値)

測定対象の試料に内部標準として $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ を内割りで 10mass% 添加し、均一になるようミキサーミルで混合したものを測定試料とした。リートベルト解析は、星野らの手法¹¹⁾に準拠した。各試料で同定された鉱物を定量対象鉱物として定量分析を行った。各鉱物量は式(1)により、非晶質量は式(2)により算出した。

$$H'x = Hx \times \frac{10}{A} \times \frac{100}{(100-R)} \quad (1)$$

$$\text{非晶質} = 100 \times (A - R) / (A \times \frac{(100-R)}{100}) \quad (2)$$

ここに、 $H'x$: 試料の鉱物量 (mass%), Hx : リートベルト解析で定量した値, A : リートベルト解析で定量した $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ の値 (mass%), R : $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 混合量 (mass%)

3. 結果および考察

3.1 密度、比表面積

図-2 に密度の試験結果を示す。密度は CO_2 供給量が多くなるほど若干小さくなる傾向が認められるが、 $2.59\sim 2.62\text{g}/\text{cm}^3$ と顕著な差はないことが分かる。また、CH 品と CY 品の差もほとんどない。

図-3 にブレン比表面積の測定結果を示す。ブレン値は $7200\sim 8900\text{cm}^2/\text{g}$ で CO_2 供給量による明確な影響は認められなかった。CH 品と CY 品では、5~10%ほど CY 品が大きくなっている。

図-4 に BET 比表面積の測定結果を示す。BET 比表面積は、No2(1.1)が $55\text{m}^2/\text{g}$ で、No3(1.8)の CH 品が $80\text{m}^2/\text{g}$ であった。 CO_2 供給量と BET 比表面積の関係は今回の試験の範囲では明確ではなかったが、いずれも非常に大きな値となっている。福山らの研究¹²⁾では、微粉末材料のブレン値と BET 比表面積が整理されており、ブレン

値 $9310\text{cm}^2/\text{g}$ の石灰石微粉末で BET 比表面積 $2.30\text{m}^2/\text{g}$ 、ブレン値 $7750\text{ cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末で BET 比表面積 $1.63\text{m}^2/\text{g}$ およびブレン値 $11100\text{ cm}^2/\text{g}$ の砕石粉で BET 比表面積 $9.42\text{m}^2/\text{g}$ と報告されており、CSP の BET 比表面積が極めて大きいことが分かる。また、同研究¹²⁾では BET 比表面積が大きくなると高性能 AE 減水剤の吸着量が多くなることが報告されており、分散性を確保するためには高性能 AE 減水剤の添加量を増やすなどの対策が必要になることが示唆されている。

スラッジ水由来の CCU 粉体や軽質炭酸カルシウム系の粉体は、既往研究^(例えば 3) 6) 13)においても BET 比表面積が大きくなる傾向にあることが知られており、CCU 粉体をコンクリートに使用する場合、分散性やスランプ保持性の確保が重要になることが想定される。

3.2 SEM 観察

写真-2 に各 CSP の SEM 画像を示す。いずれも粉体粒子表面に CaCO_3 の結晶が付着している状態が観察される。 CaCO_3 の形態は、カルサイトの典型的な形状である菱面体の結晶である。粒子に付着している結晶の程度には差があり、No1 (0.7) では滑らかな表層部が多くみ

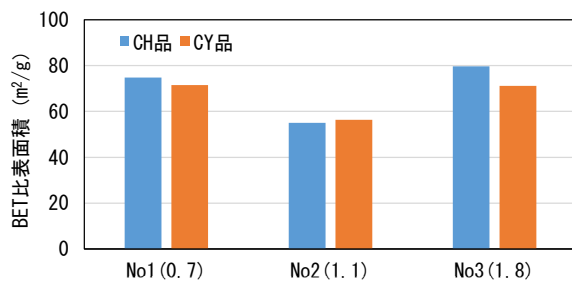
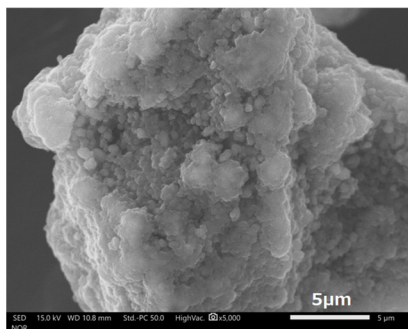
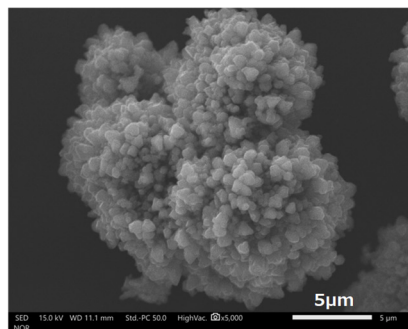


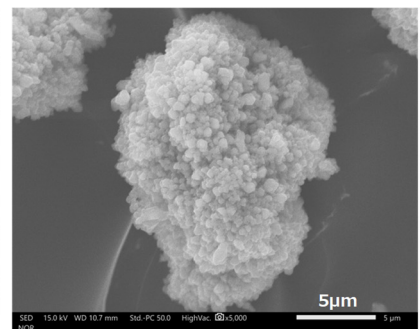
図-4 BET 比表面積



No1 (0.7)

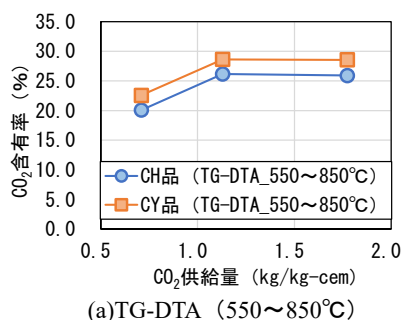


No2 (1.1)

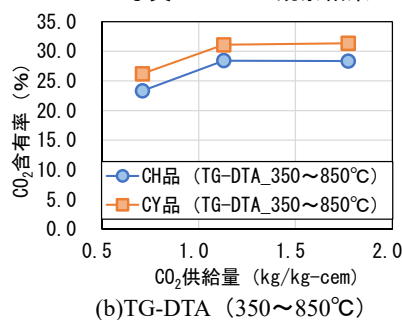


No3 (1.8)

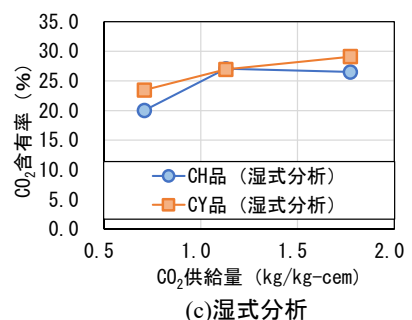
写真-2 SEM 観察結果



(a)TG-DTA (550~850°C)



(b)TG-DTA (350~850°C)



(c)湿式分析

図-5 CO₂含有率

られるのに対し、No2 (1.1) と No3 (1.8) では、粒子全体を CaCO_3 が覆いつくしているような状態である。CSP の BET 比表面積が大きい要因として、未水和セメント鉱物や C-S-H などの水和物の表層に CaCO_3 粒子が付着する凹凸が多い表面状態を形成していることが影響しているものと推察される。

3.3 CO₂含有率

図-5 に TG-DTA および湿式分析の測定により得られた CO₂ 含有率の測定結果を示す。TG-DTA による CO₂ 含有率は、550~850°C の質量減少率から算出した結果に加え、図-6 に示す質量減少率、吸発熱曲線から分かるように、350~600°C 付近にも質量減少が見られたことから 350~850°C の質量減少率から算出した結果も示している。なお、450°C 付近に明瞭な吸熱ピークが見られなかったことと、後述する XRD の結果からいずれの試料も $\text{Ca}(\text{OH})_2$ はほとんど含まれておらず、350~850°C の質量減少に大きな影響は及ぼさないと判断した。TG-DTA (550~850°C) と TG-DTA (350~850°C) の結果を比較すると、350~850°C の温度範囲の結果が 550~850°C の結果に比べて 2~4% 程度高くなっている。湿式分析の結果は、試料により差はあるものの 550~850°C の温度範囲の TG-DTA の結果に近い値になっている。350~600°C 付近の質量減少率が非晶質炭酸カルシウムの脱炭酸に由来するものと仮定した場合、350~850°C の温度範囲の TG-DTA の結果と、酸分解により非晶質炭酸カルシウム由来の CO₂ も含めて全ての CO₂ を測定する湿式分析の結果が近くなることも想定されるが、TG-DTA の低温域の質量減少には脱水の

表-3 CO₂含有率, CaCO₃, CO₂固定量および炭酸化度

記号	セメント1kg当たりのCO ₂ 供給量 (kg)	採取位置	CO ₂ 含有率 (%)	CaCO ₃ 量 (%)	CO ₂ 固定量 (kg/t)	炭酸化度 (%)
No1 (0.7)	0.7	チャンバー (CH 品)	20.1	45.6	226	45.0
No2 (1.1)	1.1		26.2	59.5	327	65.2
No3 (1.8)	1.8		25.9	58.9	323	64.2
No1 (0.7)	0.7	サイクロン (CY 品)	22.6	51.3	266	52.9
No2 (1.1)	1.1		28.6	65.1	373	74.3
No3 (1.8)	1.8		28.6	64.9	372	74.0

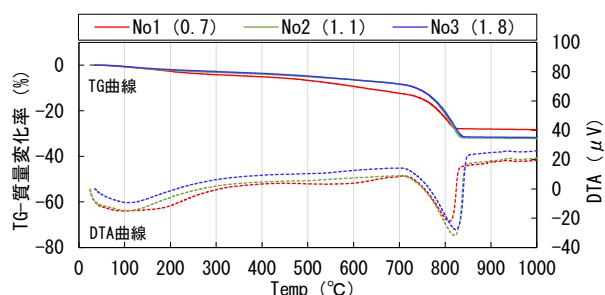


図-6 質量減少率, 吸発熱曲線 (CH 品)

影響も含まれることから差が生じたものと推察される。文献¹⁰⁾においても、600～850℃の温度範囲の TG-DTA と湿式分析の CO₂含有率の結果が近い値になることが報告されており、本結果でも同様の傾向が認められた。TG-DTA の結果では、温度域によって CaCO₃ からの脱炭酸の影響のみを捉えることが困難な場合があるため、CO₂含有率を評価する際には複数の測定手法を組み合わせせて評価することも有効であると考えられる。

表-3に TG-DTA による 550～850℃の温度範囲から求めた CO 含有率と、そこから換算した CaCO₃量と CO₂固定量および炭酸化度を示す。CO₂固定量は、セメント中の CO₂含有率を TG-DTA (550～850℃) で測定し下記の式(3)により算出した。

$$CO_{2k} = \left(CO_{2b} \times \frac{(100 - CO_{2c})}{(100 - CO_{2b})} - CO_{2c} \right) / 100 \times 1000 \quad (3)$$

ここに、CO_{2k}:炭酸化前の乾燥試料 1t あたりの CO₂固定量 (kg/t), CO_{2b}:炭酸化後の CO₂含有率 (%), CO_{2c}:炭酸化前の CO₂含有率=2 (%)

各試料の CO₂固定量は、No1 (0.7) で CH 品 226kg/t, CY 品 266kg/t となり、No2 (1.1) で CH 品 327kg/t, CY 品 373kg/t であった。No3 (1.8) は No2 (1.1) とほぼ同程度の値となり、CO₂供給量が少ない No1 (0.7) のみ低い結果となった。

本検討で使用したセメントの CaO 量は 64%であることから、CaO が全て CaCO₃ に反応した場合の CO₂固定量の最大値は 502.9kg となる。炭酸化度は、CO₂固定量の最大値に対する各試料の CO₂固定量から算出しており、No2 (1.1) で CH 品 65.2%, CY 品 74.3%と最大となった。No3 (1.8) は No2 (1.1) と同程度であり、No1 (0.7)

表-4 各鉱物の定量結果

記号	採取位置	鉱物組成 (%)			
		C ₃ A	C ₄ AF	カルサイト	非晶質
No1 (0.7)	チャンバー (CH 品)	3.7	4.9	41.7	49.7
No2 (1.1)		3.6	4.5	54.4	37.5
No3 (1.8)		4.2	4.5	55.7	35.5
No1 (0.7)	サイクロン (CY 品)	3.0	3.7	44.3	49.0
No2 (1.1)		2.4	3.5	61.2	32.9
No3 (1.8)		3.0	3.6	59.5	34.0

では CH 品 45.0%, CY 品 53.9%であった。

3.4 鉱物組成の同定と定量

XRD リートベルト解析による定量結果を表-4に示す。いずれの試料にも、セメント鉱物であるアルミネート相 (C₃A) とフェライト相 (C₄AF) およびカルサイトが同定された。LE らの報告⁴⁾では、CO₂固定におけるセメント水和物の変化を考察しており、Ca(OH)₂の消失が最も早く、次いでモノサルフェート、最後にモノカーボネートとヘミカーボネートと高 Ca/Si 型 C-S-H が消失することが示されている。本結果においても、いずれの試料も C-S-H を除く水和物が消失して CaCO₃ が生成しているものと推察される。XRD 測定では、非晶質物質はピークが得られないことから、XRD/リートベルト解析における非晶質量には、C-S-H の他に炭酸化後に生成されるシリカゲルも含まれているものと考えられる。そのため、シリカゲル含有量を確認するため、文献¹⁴⁾を参考に各試料に酸・アルカリ処理を実施して得られた溶液について誘導結合プラズマ発光分析 (ICP-AES) を用いて Si 濃度を測定し、SiO₂量に換算しシリカゲル含有量を算出した。

算出結果を表-5に示す。No2 (1.1), No3 (1.8) と比較して No1 (0.7) のシリカゲル含有量は明らかに少なく、CO₂供給量が少ないことで、C-S-H の炭酸化の程度に違いがあったものと推察される。なお、ここで示したシリカゲル含有量は水分量を考慮できていないため、非晶質量からシリカゲル含有量を差し引いても正確な C-S-H 量を把握することは困難であるが、No1 (0.7) の非晶質量が多いこととシリカゲル含有量が少ないことから、No2 (1.1), No3 (1.8) に比べて、C-S-H 量が多いものと推察できる。また、CO₂供給量が異なる No2 (1.1) と No3 (1.8)

表－5 シリカゲル含有量

記号	採取位置	シリカゲル含有量 (%)
No1 (0.7)	チャンパー (CH 品)	2.81
No2 (1.1)		8.30
No3 (1.8)		8.74
No1 (0.7)	サイクロン (CY 品)	2.38
No2 (1.1)		6.21
No3 (1.8)		7.20

において、CO₂ 固定量だけでなく、各鉱物の定量結果も同様であることから、本検討の範囲においては、No2(1.1)のCO₂ 供給量で十分なCO₂ 固定化ができており、それ以上CO₂ 供給量を増やしても水和物変化が生じず、CO₂ 固定化が進まないことが明らかとなった。つまり、供給したCO₂ は反応で消費されずに、大気にそのまま放出されていた可能性が高い。今後、社会実装を目指したCSPの製造を検討する際には、最適なCO₂ 供給量を設定し、適切に管理しながらCO₂ 固定処理を行うことが重要である。

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) CO₂ を供給した模擬スラッジ水からスプレードライ法で製造したCSP粉体の特徴的な性質として、BET比表面積が55～80m²/gと非常に大きいことが確認された。
- (2) BET比表面積が大きくなる要因として、SEM観察結果より、粉体粒子の周りを囲むようにCaCO₃が付着していることが影響しているものと推察された。
- (3) CO₂ 固定量は、CO₂ 供給量が1.1と1.8kg/kg-cemの試料では同程度で最大373kg/tとなったが、0.7kg/kg-cemの試料では最大266 kg/tでありCO₂ 供給量による差異が認められた。
- (4) XRD/リートベルトの結果から、いずれの試料もC-S-Hを除く水和物が消失してCaCO₃が生成しているものと推察され、CO₂ 供給量によってシリカゲル含有量に違いがあったことから、C-S-Hの炭酸化の程度が異なっているものと推察された。

謝辞

本成果は、NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の委託業務（JPNP21023）の結果得られたものです。ご協力頂いた関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 国土交通省：建設副産物実態調査，2024
- 2) みずほリサーチ&テクノロジーズ：がれき類のリサ

イクルに関する取り組み強化の必要性ー将来の建設廃棄物の資源循環の姿ー，参照：<https://www.mizuho-rt.co.jp/business/consulting/articles/2023-k0007/index.html>（閲覧日：2024年12月26日）

- 3) 神代泰道，田中寛人，井上裕太：スラッジ起源のCCU粉体を用いた低炭素型のコンクリートに関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 46，No.1，pp.1369-1374，2024
- 4) LE THITHIENLY，桐野裕介，兵頭彦次：コンクリートスラッジの湿式炭酸化とその反応メカニズムに関する研究，太平洋セメント研究報告，第183号，Vol.74，pp.18-23，2022
- 5) 大川憲，百瀬晴基，関田徹志，笠井哲郎：複数工場の戻りコンクリートから製造した乾燥スラッジ微粉末の諸特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.1565-1570，2019
- 6) 杉本裕紀，大川憲，巴史郎，関田徹志：乾燥スラッジ微粉末の炭酸化が鉱物組成に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，pp.127-132，2024
- 7) 清水成，上野敦，鎌田知久，LETT WAINwe：CO₂ を作用させた模擬スラッジ水のCO₂ 固定に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 45，No.1，pp.1690-1695，2023
- 8) 清水成，LETT WAINwe，上野敦，鎌田知久：CO₂ を作用させた模擬スラッジ水由来粉体の基礎的特性，コンクリート工学年次論文集，Vol. 46，No.1，pp. 1495-1500，2024
- 9) 小金井稔元：粉末製品の性状の要求変化に伴う噴霧乾燥技3の発展，技術革新と社会変革，第1巻，第1号，pp.1-6，2008
- 10) 吉野玲，安部弘康，鈴木好幸，野口貴文：再生骨材への効果的なCO₂ 固定方法に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 45，No.1，pp.34-39，2023
- 11) 星野清一，平尾宙，山田一夫：X線回折 / リートベルト法によるセメントペーストの水和反応解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，2006
- 12) 福山知広，麓隆行，石野梨紗，山田優：碎石粉の高流動コンクリート用混和材としての利用に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 25，No.1，pp.977-982，2003
- 13) 山宮浩信，阿合延明，向俊成，取違剛：二酸化炭素を吸着させた軽質炭酸カルシウムを用いたコンクリートの諸性状，コンクリート工学年次論文集，Vol. 46，No.1，pp.1525-1530，2024
- 14) 社団法人日本コンクリート工学協会：炭酸化を受けたコンクリート構造物の判定マニュアル，炭酸化研究委員会，pp.33-35，1993.3