

論文 CO<sub>2</sub>を作用させた模擬スラッジ水のCO<sub>2</sub>固定に関する基礎的研究清水 成\*<sup>1</sup>・上野 敦\*<sup>2</sup>・鎌田 知久\*<sup>3</sup>・Lett Wai Nwe \*<sup>4</sup>

**要旨**：2020年に宣言された「2050年カーボンニュートラル」達成に伴うCO<sub>2</sub>排出量削減のため、建設部門ではCO<sub>2</sub>を吸収固定させたコンクリート材料の開発を目指している。本研究では、生コンクリート工場から排出されるスラッジ水に着目し、模擬スラッジ水中のカルシウムイオン、水和生成物および未水和セメントにCO<sub>2</sub>を効果的に固定する方法に関する基礎的な検討を実施した。その結果、模擬スラッジ水でCO<sub>2</sub>を効果的に固定できるセメントの接水時間およびCO<sub>2</sub>バブリング水の供給時間が示され、CO<sub>2</sub>バブリング水の供給をした場合、接水時間に関わらず固形分質量の25%前後のCO<sub>2</sub>が固定できることを確認した。

**キーワード**：模擬スラッジ水、炭酸化、熱分析、X線回折、CO<sub>2</sub>バブリング水

## 1. はじめに

2016年パリ協定の気候変動問題に関する国際的な枠組みにより、産業革命後の気温上昇を2℃以内に抑えるなどの世界共通の長期目標が掲げられ、CO<sub>2</sub>の削減や環境問題などの取り組みは世界的に重要視されている。日本では、2020年の「2050年カーボンニュートラル」宣言<sup>1)</sup>により、発電・産業部門の構造転換が強く認識され、関連する技術やシステムの研究開発の促進やそれら技術の実装による効果の可視化が求められている。

建設部門では、建設機械の更なる効率化や施工方法の合理化によるエネルギー消費の抑制が社会実装につながる一方で、建設材料として不可欠な鉄鋼やセメントの製造段階における大量のエネルギー消費や石灰石の熱分解によるCO<sub>2</sub>排出においては検討の余地が残されているのが現状である。特に、セメントは焼成工程に大量の熱エネルギーが必要であることのほか、石灰石の脱炭酸を伴うことなどから、セメント1tあたりでは約725kg、標準的なコンクリート1m<sup>3</sup>あたりでは約300kg<sup>1)</sup>のCO<sub>2</sub>が排出されている。一方、コンクリートは、CO<sub>2</sub>を排出するのみだけではなく潜在的にCO<sub>2</sub>と反応して、これを固定する能力を有する<sup>2)</sup>。さらに、近年ではγ-C<sub>2</sub>Sの混和によりCO<sub>2</sub>固定量を増大させるコンクリート<sup>3)</sup>が開発されるなどコンクリートにCO<sub>2</sub>を固定させる技術の実用化が進められている。また、廃コンクリートから得られる再生骨材を強制的に炭酸化させることで品質改善およびCO<sub>2</sub>の排出量削減を可能とする技術が構築されるなど、廃棄物を対象とした検討<sup>4)</sup>も精力的に行われている。

廃棄物の再利用として生コンクリート工場で発生するスラッジ水に着目すると、セメント質量に対する固形分率を3%未満に調整することで練混ぜ水として再利用することが認められている<sup>5)</sup>。しかし、その普及率は決

して高いとは言えない。他方で、スラッジ水中にはカルシウムイオン、水和生成物および未水和セメントが豊富に含まれていることから、これらにCO<sub>2</sub>を固定させることで新たなコンクリート材料(結合材)として再利用できる可能性があり、セメントの使用量削減やCO<sub>2</sub>の固定によるCO<sub>2</sub>排出量削減を期待できる。

そこで本研究では、生コンクリート工場から排出されるスラッジ水に対してCO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>バブリング水(CO<sub>2</sub>を微細気泡で導入した水)の供給時間が炭酸カルシウムの生成量ならびにCO<sub>2</sub>固定量に及ぼす影響について基礎的に検討した。

## 2. 実験概要

## 2.1 試験方法

## (1) 模擬スラッジ水の作製

本研究では、生コンクリート工場から排出されるスラッジ水を試験的に模擬する形で試料を作製した。一般に、スラッジ水は細骨材の細粒分、未水和セメントや水和生成物などの固形分濃度にばらつきがある。本研究ではセメント懸濁液へのCO<sub>2</sub>固定を目的としているため、セメントと水のみで、セメント質量濃度5%の模擬スラッジ水を作製した。尚、水は上水道水(以下、水道水)を使用し、セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。

## (2) 接水時間の設定

CO<sub>2</sub>バブリング水供給前の模擬スラッジ水中のセメントの接水(水和)時間がCO<sub>2</sub>固定量に与える影響を確認するため、接水時間を変化させた。一般に、セメントの水和反応は水和発熱速度と密な関係がある<sup>6)</sup>とされている。そのため、普通ポルトランドセメントの初期発熱変化<sup>6)</sup>を参考に、接水時間を水和生成物組成が異なると考

\*1 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 (学生会員)

\*2 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 准教授 博士 (工学) (正会員)

\*3 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 助教 博士 (工学) (正会員)

\*4 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 特任研究員 博士 (工学)

えられる2, 4, 6および24hrに設定した。

### (3) 炭酸化

炭酸化に使用した装置の概要を図-1に、炭酸化の条件を表-1に示す。本研究では、炭酸化に有効と報告されているCO<sub>2</sub>をバブリング水として供給する手法を用いて、各接水時間において作製した模擬スラッジ水の炭酸化を試みた。CO<sub>2</sub>バブリング水の供給時間は各接水時間に共通で、0min(供給無し)および60minとした。また、CO<sub>2</sub>バブリング水の供給時間による影響を確認するため、接水時間24hrの試料を用いて0, 10, 20, 30, 40, 50および60minのCO<sub>2</sub>バブリング水の供給を実施した。CO<sub>2</sub>バブリング水の供給中は液相中のカルシウムイオン、水和生成物および未水和セメントの炭酸化に伴いCO<sub>2</sub>が消費されると考えられるため、ポンプを用いて模擬スラッジ水を循環させ、常時CO<sub>2</sub>を100μm以下の気泡となるようにCO<sub>2</sub>バブリング水発生装置(二相流旋回方式)を用いて供給した。また、pHメータおよび炭酸ガス濃度計を用いて模擬スラッジ水のpHとCO<sub>2</sub>濃度の経時変化を測定した。

### (4) 粉末試料の採取

所定の条件でCO<sub>2</sub>バブリング水を供給した模擬スラッジ水は、供給停止後すぐに吸引濾過器を使用し、JIS P 3801に規定される4種濾紙を用いて固形分のみを取り出し、3日以上真空乾燥させた。乾燥後、試料をメノウ乳鉢で滑らかな粉末状にし、示差熱重量分析およびX線回折分析に供した。

## 2.2 分析方法

### (1) 示差熱重量分析 (TG-DTA)

CO<sub>2</sub>の供給に伴う水酸化カルシウム(以下、CH)および炭酸カルシウム(以下、CC)含有量の変化ならびに固定されたCO<sub>2</sub>量を評価することを目的として示差熱重量分析を実施した。天秤方式は水平差動型示差熱天秤で、測定方式は水平差動型トリプルコイル方式である。測定条件は表-2に示すとおりである。またCHおよび炭酸カルシウム(以下、CC)の含有量は式(1)および(2)を用いてそれぞれ算出した。CHからの脱水による質量減少率は、DTA曲線における400~500℃付近で発生する吸熱および発熱反応開始点をt<sub>1</sub>, t<sub>2</sub>とし、図-2に示すとおりTG曲線上間の質量差から求めた。また、CCの脱炭酸に伴う質量減少率(CO<sub>2</sub>含有量)は温度範囲を600~850℃として、TG曲線の質量差から求めた。CHのDTA曲線が緩やかで明確な吸熱および発熱反応点を読み取れない場合はDTG曲線から読み取ることで求めた。

$$CH = m_{CH} \times \frac{Ca(OH)_2}{H_2O} \quad (1)$$

$$CC = m_{CC} \times \frac{CaCO_3}{CO_2} \quad (2)$$

▲ : バブリング水発生装置  
(二相流旋回方式)

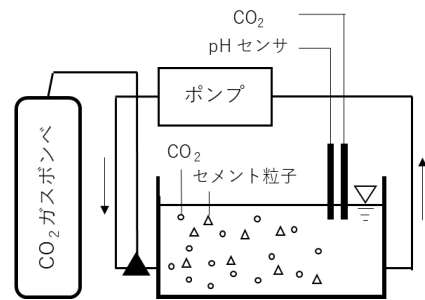


図-1 炭酸化装置のイメージ図

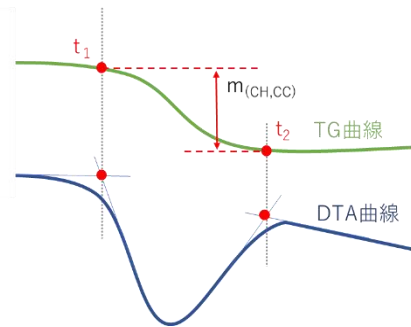


図-2 CHの質量減少率の測定概要

表-1 CO<sub>2</sub>バブリング水を用いた炭酸化条件

模擬スラッジ水の使用量	10(L)
CO <sub>2</sub> 供給量	1.0(L/min)
接水時間	2, 4, 6, 24(hr)
CO <sub>2</sub> バブリング水供給時間	0, 60(min) (24hrのみ10, 20, 30, 40, 50(min)を追加実施)

表-2 示差熱重量分析の測定条件

サンプル量	20±1(mg)
窒素流量	80(mL/min)
測定温度範囲	室温~1000(°C)
昇温速度	20(°C/min)
サンプリング時間	30(sec)
使用パン	Ptパン(φ5mm×h5mm)

ここに、CH:水酸化カルシウム含有量(%), CC:炭酸カルシウム含有量(%), m<sub>CH</sub>:400~500℃における水酸化カルシウムの脱水に伴う質量減少率(%), m<sub>CC</sub>:600~850℃における炭酸カルシウムの脱炭酸に伴う質量減少率(%), Ca(OH)<sub>2</sub>:74.09(g/mol), H<sub>2</sub>O:18.02(g/mol), CaCO<sub>3</sub>:100.09(g/mol), CO<sub>2</sub>:44.01(g/mol)とする。

### (2) X線回折分析 (XRD)

分析は走査速度を2°/min, 走査範囲は2°~90°とし、特性X線には銅管球(CuKa=0.15418nm)を使用した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 炭酸化過程における pH および CO<sub>2</sub> 濃度の変化

炭酸化過程での模擬スラッジ水の pH の経時変化を図-3 に示す。なお、同図には比較用に模擬スラッジ水の作製に使用した水道水の結果もあわせて示す。はじめの5分間でセンサの値が安定するのを確認し、その後 CO<sub>2</sub> バブリング水の供給を開始した。水温は、供給開始時点で 16~19℃であった。水道水の結果では CO<sub>2</sub> バブリング水の供給開始直後から pH は急激に低下し始め、供給から約5分後には 6.2 前後の値で安定した。その後、CO<sub>2</sub> バブリング水の供給を実施し続けたが pH に大きな変化が見られなかったため、pH6.2 程度を下限値とした。模擬スラッジ水を用いた場合でも、水道水と同様に CO<sub>2</sub> バブリング水の供給開始からすぐに pH が低下し始めたが、その低下速度は接水時間によって異なる傾向がみられた。また、16~19℃の水温域では CO<sub>2</sub> ガスの溶解度は同程度<sup>8)</sup>であり、その影響は小さいと考えられるため、CH の含有量が pH の低下開始点および速度に影響したのではないかと考えられる。また、模擬スラッジ水を用いた場合であっても水道水と同様に pH の下限が 6.2 程度となったため、十分な CO<sub>2</sub> 供給ができていると考えられる。接水 24hr の試料において CO<sub>2</sub> バブリング水の供給が 40min までの pH が他と比較して高く、これは初期の pH が他よりも高いことが影響していると考えられる。初期の pH が他よりも高かった要因としては、接水 24hr では後述するように CH の含有量が他の接水時間と比較すると多かったためであると考えられる。その後は接水 2hr を除き、同程度の pH の変化挙動を示した。

模擬スラッジ水中の CO<sub>2</sub> 濃度の経時変化を図-4 に示す。本研究で使用した CO<sub>2</sub> 濃度計は 2020mg/L が最大の測定可能値であったため、その値以降はグラフを横ばいにするこで示した。CO<sub>2</sub> 濃度が増加し始めてから、直線的な増加傾向を示すまでに要する時間は、接水時間により異なるが、直線的な増加を示す範囲での CO<sub>2</sub> 濃度の増加速度（図中では、直線域の傾き）は、接水時間によらずほぼ同等となっている。CO<sub>2</sub> 濃度が直線的な増加傾向を示す範囲は、試験溶液中で溶存 CO<sub>2</sub>、炭酸イオン、炭酸水素イオンが消費されていない、もしくは供給速度が消費速度を大幅に上回っていることを意味しており、カルシウムイオンや CH などの炭酸化も停滞状態にあることを示していると考えられる。すなわち、模擬スラッジ水中では、CO<sub>2</sub> 濃度が直線的な増加傾向を示す以前の CO<sub>2</sub> バブリング水の供給時間中に主に炭酸化が進んでいると考えられる。

#### 3.2 示差熱重量分析結果

CO<sub>2</sub> 固定前の示差熱重量分析の結果を図-5 に、CH、CC および CO<sub>2</sub> 含有量を表-3 に示す。図-5 の約 100℃

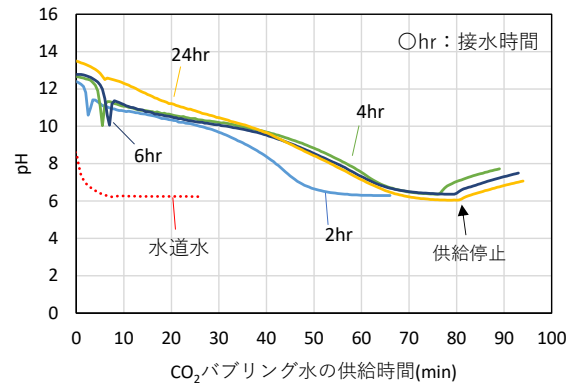


図-3 pH の経時変化

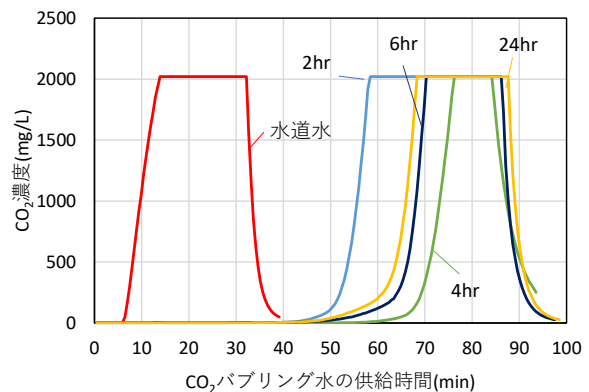


図-4 CO<sub>2</sub> 濃度の経時変化

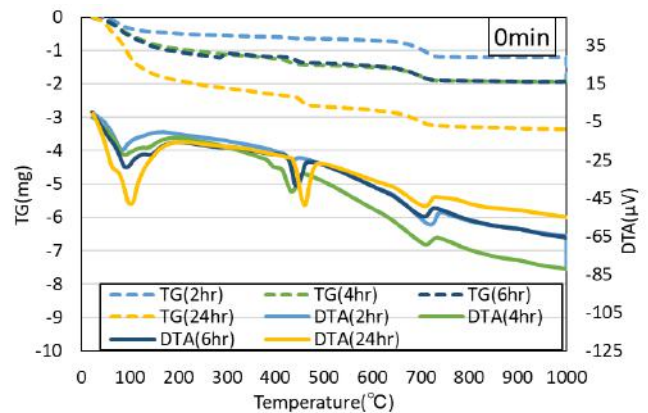


図-5 CO<sub>2</sub> バブリング水供給前の TG および DTA 曲線

表-3 CO<sub>2</sub> バブリング水供給前の CH、CC、CO<sub>2</sub> 含有量

接水時間	CH(%)	CC(%)	CO <sub>2</sub> (%)
2hr	1.07	5.45	2.33
4hr	4.26	4.74	2.09
6hr	4.51	4.97	2.19
24hr	7.47	10.52	4.63

および 400~500℃付近に位置する TG および DTA 曲線のピークは結合している水の蒸発に起因<sup>9)</sup>するものであり、400~500℃および 600~800℃付近はそれぞれ CH および CC の熱分解に起因<sup>10)</sup>するピークであるため、接水時間に関わらずピーク位置は同程度の温度個所に位置してい

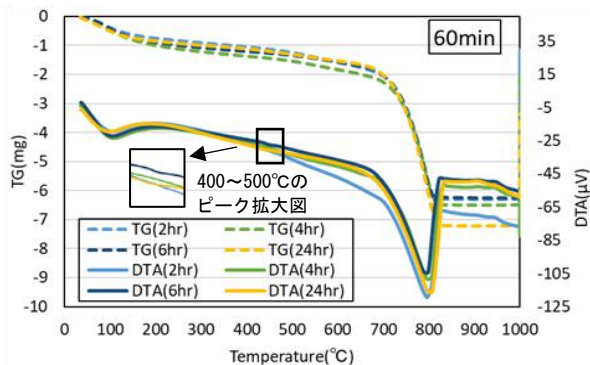


図-6 CO<sub>2</sub>バブリング水供給後のTGおよびDTA曲線

表-4 CO<sub>2</sub>バブリング水供給後のCH, CC, CO<sub>2</sub>含有量

接水時間	CH(%)	CC(%)	CO <sub>2</sub> (%)
2hr	4.36	52.88	23.25
4hr	3.88	53.10	23.35
6hr	3.00	53.98	23.73
24hr	4.10	62.75	27.59

ることが確認できる。表-3はこの結果から算出された各成分の含有量であり、接水時間の増加に伴いCH量が増加していることがわかる。CO<sub>2</sub>含有量は全接水時間において5%以下であり、炭酸化を実施していない条件では同程度の数値を示す結果となった。接水24hrの試料でCO<sub>2</sub>バブリング水供給前のCC量およびCO<sub>2</sub>量が高いのは、接水中に攪拌している影響で空気中のCO<sub>2</sub>と反応したものと推察される。

CO<sub>2</sub>バブリング水供給後の示差熱重量分析の結果を図-6に、CH, CCおよびCO<sub>2</sub>含有量を表-4に示す。CO<sub>2</sub>バブリング水供給前と同様に400~500°Cおよび600~800°C付近に現れるピークはそれぞれCHおよびCCの熱分解に起因<sup>11)</sup>するものであるが、400~500°CにおけるDTAの吸熱ピークはCO<sub>2</sub>バブリング水の供給前と比較すると顕著に小さくなっている。そして、600~800°C付近のTG-DTAによって算出されるCCの量が大幅に増加していることが確認できる。これは、CO<sub>2</sub>バブリング水の供給によりカルシウムイオン、水和生成物および未水和セメントが炭酸化したためであると考えられる。

表-4から、接水時間の増加に伴いCC量は約60%まで緩やかに増加しており、CO<sub>2</sub>固定量は模擬スラッジ水中から採取した固形分の質量の約25%固定できていることがわかる。ただし、接水時間の増加に伴うCC量およびCO<sub>2</sub>固定量の増加傾向が緩やかであることから、接水時間がCC量およびCO<sub>2</sub>固定量に及ぼす影響は顕著ではないと考えられる。このことから、炭酸化の主体はCHではなく、未水和セメントからのカルシウムイオンであることが推察される。図-7にCO<sub>2</sub>バブリング水の供給

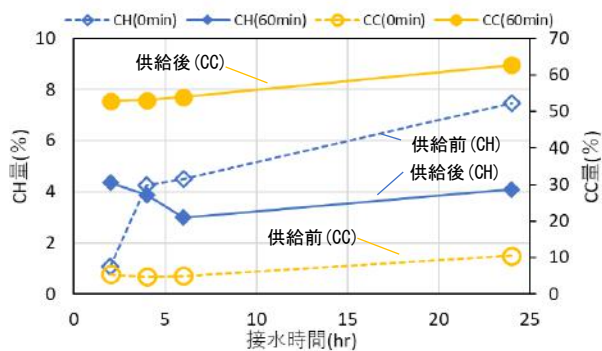


図-7 CO<sub>2</sub>バブリング水の供給前後のCHおよびCC量

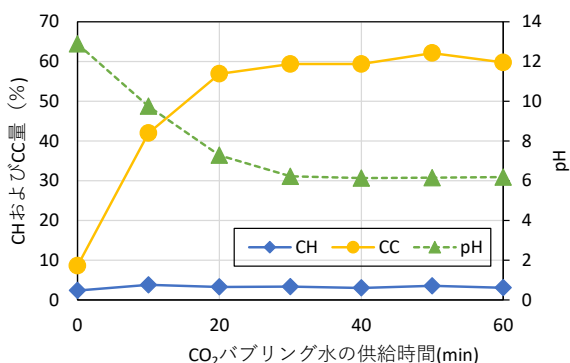


図-8 CO<sub>2</sub>バブリング水の供給時間の違いによるpH, CHおよびCC量の変化

前後のCHおよびCC量を示す。CO<sub>2</sub>バブリング水の供給前後でCHおよびCC量を比較すると、CO<sub>2</sub>バブリング水の供給後にCH量が減少し、CC量が増加していることがわかる。これは、CHが炭酸化してCCに変化したためである<sup>12)</sup>と考えられる。なお、減少したCH量と増加したCC量が明らかに一致しないが、これはCO<sub>2</sub>バブリング水の供給により液相中のカルシウムイオンや未水和セメント、C-S-Hに対してもCO<sub>2</sub>が固定されてCCに変化したためと考えられる。

図-8に接水時間24hrにおいてCO<sub>2</sub>バブリング水の供給時間を0~60minの10minごとに変化させた場合のCHおよびCC量を示す。最もCCの増加速度が大きかった時間はCO<sub>2</sub>バブリング水の供給時間が0~20min間であり、その後は増加速度が緩やかになる傾向が確認された。CC量の増加が明確に低下したのは、pHが下限に達して安定した点と一致している。これは3.1で述べたとおりの現象によるものと考えられる。CO<sub>2</sub>流量は異なるが、同様に実施された類似の研究報告<sup>13)</sup>でもCO<sub>2</sub>バブリング水の供給時間の経過に伴いCC量の増加速度は緩やかになっている。この結果、接水時間24hrにおいてはCO<sub>2</sub>バブリング水の供給時間はpHが下限で安定するまでの時間でよいものと考えられる。また、CH量はCO<sub>2</sub>バブリング水の供給時間の経過につれ若干の低下傾向を示したが、CCの変化量と比べると大きな変化は確認できな

かった。

以上より、CO<sub>2</sub> バブリング水の供給を終了するタイミングは pH の常時モニタリングにより判断できる可能性が示唆された。

### 3.3 X線回折分析結果

XRD 試験で、リートベルト解析により鉱物の定量を行う場合があるが、示差熱重量分析結果から算出される CH 量はリートベルト法により算出される CH 量と整合する報告<sup>14)</sup>がある。そのため、本研究では、示差熱重量分析を実施していることから、示差熱重量分析による定量値を採用し本実験では鉱物組成の検討を実施した。

CO<sub>2</sub> バブリング水供給前の X 線回折分析結果を図-9 に示す。図-9 から、主な結晶相は CH および CC であることがわかる。CO<sub>2</sub> 固定前となる CO<sub>2</sub> バブリング水供給前では接水時間の違いで鉱物組成に大きな変化は見られず、18° 付近、35° および 52° 付近に CH のピークが存在し、29°、38° および 48° 付近に CC のピークが存在することが確認できた。

CO<sub>2</sub> バブリング水供給後の X 線回折分析結果を図-10 に示す。図-10 から、主な結晶組成は CO<sub>2</sub> バブリング水供給前と同様に CH および CC であることがわかるが、それぞれのピーク強度に変化が確認できた。CO<sub>2</sub> バブリング水供給前において、18° 付近、35° および 52° 付近に確認できた CH のピークは 35° 付近のピークを除き、CO<sub>2</sub> バブリング水供給後ではピークが観察されない結果となった。これは、炭酸化による CH 量の低下が、回折強度の低下を引き起こしたことでピークの発現に影響した結果であると考えられる。また、CC のピークは CO<sub>2</sub> バブリング水供給前と比較してさらに複数個所での存在が確認でき、示差熱重量分析結果(図-7)において確認された炭酸化に伴う CC 量の増加と整合する結果となった。また、CO<sub>2</sub> バブリング水の供給前後でのピークに変化は見られたが、図-10 内においては接水時間の違いによるピークおよび組成には大きな変化は見られなかった。

CO<sub>2</sub> バブリング水の供給時間を変化させた場合の X 線回折分析結果を図-11 に示す。CO<sub>2</sub> バブリング水の供給時間が 0min を除き、おおよそ同じピークが発現する傾向であるが 29° 付近の CC のピークは接水時間が増加するにつれ強度が増す傾向が確認でき、20min 以降は同程度のピーク強度を示す結果となった。さらに、35° 付近の CH のピークにおいては CO<sub>2</sub> バブリング水の供給時間が増加するに伴い、ピーク強度が若干ではあるが減少している傾向が確認できた。

### 4. まとめ

本研究では模擬スラッジ水中のカルシウムイオン、水

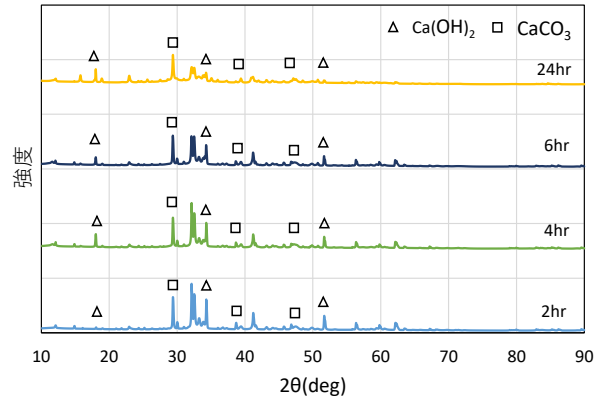


図-9 CO<sub>2</sub> バブリング水供給前の鉱物組成

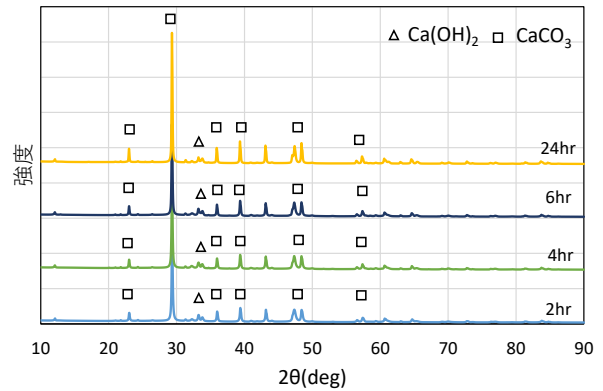


図-10 CO<sub>2</sub> バブリング水供給後の鉱物組成

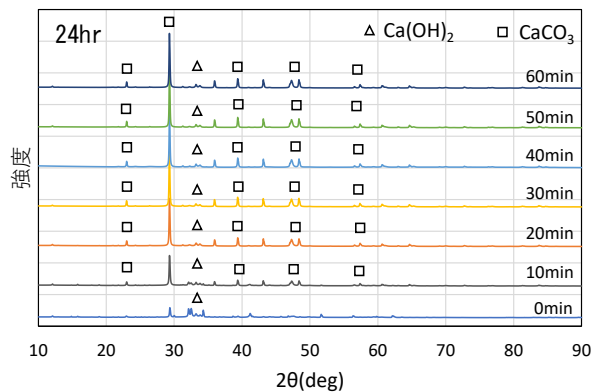


図-11 CO<sub>2</sub> バブリング水供給時間による鉱物組成変化

和生成物および未水和セメントに CO<sub>2</sub> を効率的に固定するための模擬スラッジ水中のセメントの接水時間および CO<sub>2</sub> バブリング水の供給時間の検討を行うとともに、採取した模擬スラッジ水中の固形分に対する CO<sub>2</sub> 固定量の把握を目的に実験を行った。

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 模擬スラッジ水に CO<sub>2</sub> バブリング水を供給した場合、接水時間に関わらず pH6.2 程度を下限に安定することを確認した。また、CO<sub>2</sub> 濃度が直線的な増加傾向を示す以前の CO<sub>2</sub> バブリング水の供給時間中に主に炭酸化が進んでいると考えられる。
- (2) CO<sub>2</sub> 固定前の試料に示差熱重量分析を実施した結果、

接水時間の増加に伴い CH 量は増加するが、CC 量は約 2~4%と大きな変化を生じないことが確認できた。

- (3) CO<sub>2</sub>固定後の試料に示差熱重量分析を実施した結果、固定前と比較すると接水時間に関わらず CC 量は約 60%まで大きく増加し、CO<sub>2</sub>固定量は固形分質量の 25%前後でほぼ一定であった。
- (4) CO<sub>2</sub>バブリング水の供給時間を変化させた結果、CC 量の増加は pH の低下と関係し、CC 量の増加が非常に緩やかとなる時間と pH が下限で安定する時間が一致することが確認できた。この結果、CO<sub>2</sub>バブリング水の供給を終了するタイミングは pH の常時モニタリングにより判断できる可能性が示唆された。
- (5) X 線回折分析結果より、接水時間の違いが CO<sub>2</sub>固定前後における鉱物組成に及ぼす影響は少ないことが確認された。また、CO<sub>2</sub>固定前後の鉱物組成を比較した場合、CO<sub>2</sub>固定後は CC のピークが多く観察され、示差熱重量分析結果と整合する結果であった。
- (6) CO<sub>2</sub>バブリング水の供給時間を変化させた場合の X 線回折分析結果では、CO<sub>2</sub>バブリング水の供給時間が 20min 以降は同程度のピーク強度を示したが、35°付近の CH のピークにおいては CO<sub>2</sub>バブリング水の供給時間が増加するに伴い、ピーク強度が若干ではあるが減少している傾向が確認された。

## 謝辞

本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の業務委託 (グリーンイノベーション基金事業/CO<sub>2</sub>を用いたコンクリート等製造技術開発/CO<sub>2</sub>排出削減・固定量最大化コンクリートの開発/CARBON POOL コンクリートの開発と舗装および構造物への実装) の一環として実施した。特に、東京大学の野口貴文教授、(株)安藤・間の坂本守氏、鈴木好幸氏に貴重なご助言を頂いた。また、東京都立大学の太野健太郎准教授に貴重なアドバイスを頂いた。ここに感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 神田太郎, 曾根真理, 岸田弘之: コンクリートの共用および再資源化による二酸化炭素の固定化に関する全国調査, コンクリート工学, Vol.49, No.8, pp.9-16, 2011
- 2) 一般財団法人電力中央研究所:「グリーンイノベーション基金事業/CO<sub>2</sub>を用いたコンクリート等製造技術開発/CO<sub>2</sub>排出削減・固定量最大化コンクリートの品質管理・固定量評価手法に関する技術開発/CARBON POOL コンクリートの LCCO<sub>2</sub>・LCA・

LCC 総合評価設計システムの構築」に係る委託業務実施計画, 国立研究開発法人 HP, [https://www.nedo.go.jp/koubo/EV3\\_100241.html](https://www.nedo.go.jp/koubo/EV3_100241.html), 2022, (最終閲覧日 2023/01/05)

- 3) 取達剛, 横関康祐, 盛岡実, 山本賢司:  $\gamma$ -2CaO・SiO<sub>2</sub>を混入して強制炭酸化したセメント系材料による環境負荷の低減, Cement Science and Concrete Technology, No.63, pp.161-167, 2009
- 4) 松田信広, 伊代田岳史: 炭酸化による低品質再生骨材の改質技術の提案と改質再生骨材がコンクリートに与える影響, コンクリート工学論文集, Vol.30, pp.65-76, 2019
- 5) 岩永豊司: スラッジ水の有効利用と環境への配慮, コンクリート工学, Vol.48, No.9, pp.87-90, 2010
- 6) 峯岸敬一: セメントの水和と熱, コンクリート工学, Vol.22, No.3, pp.5-12, 1984
- 7) 金翰滉, 野口貴文, 北垣亮馬: 炭酸ナノバブル水を用いた低品質再生骨材の再資源化に関する基礎的研究, 日本建築学会関東支部研究報告集 (82), pp.101-104, 2012
- 8) (社)化学工学会, 丸善株式会社: 化学工学便覧, 改訂 6 版, pp.81, 1999
- 9) H.F.W. Taylor, Cement Chemistry, 2nd ed, T. Telford, London, 1997.
- 10) Xiaoliang Fang, Baojian Zhan, Chi Sun Poon: Enhancing the accelerated carbonation of recycled concrete aggregates by using reclaimed wastewater from concrete batching plants, Construction and Building Materials 239(2020), 117810
- 11) Dianchao Wang, Takafumi Noguchi, Takahito Nozaki, Yasuhide Higo: Investigation of the carbonation performance of cement-based materials under high temperatures, Construction and Building Materials 272(2021), 121634
- 12) 伊代田岳史, 中村絢也, 後藤誠史: セメント硬体の炭酸化機構の検討 - 実環境と促進環境の相違について -, Cement Science and Concrete Technology, Vol.72, pp.225-232, 2018
- 13) Peiliang Shen, Yangyang Zhang, Yi Jiang, Baojian Zhan, Jianxin Lu, Shipeng Zhang, Dongxing Xuan, Chi Sun Poon: Phase assemblance evolution during wet carbonation of recycled concrete fines, Cement and Concrete Research, Volume 154, April 2022, 106733
- 14) 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, pp.41-46, 2006