

論文 炭酸カリウム溶液によるコンクリート由来の再生材料への CO₂ 固定化に関する検討

鈴木 好幸*1・高木 亮一*2・神村 幸弥*3・斎藤 豪*4

要旨：本研究では、K₂CO₃ 溶液により液相を高アルカリに保持したまま CO₃²⁻を直接セメント系材料に供給する炭酸化手法について検討し、CO₂ 固定量や水和生成物の変化について評価した。その結果、スラッジ砂で最大 166kg/t、再生細骨材で 77kg/t の CO₂ 固定量が得られた。また、Ca(OH)₂ を含有しない再生細骨材においても炭酸塩の生成が確認されたことから、C-S-H との炭酸化反応が生じていることが示唆された。さらに、スラッジ砂における XRD, FTIR の結果から、K₂CO₃ 濃度が低い場合には非晶質炭酸カルシウムもしくは塩基性炭酸カルシウムが生成し、K₂CO₃ 濃度が高くなると、それらに加えて Buetschliite が生成することが確認された。

キーワード：炭酸カリウム、再生骨材、スラッジ、水中炭酸化、CO₂ 固定

1. はじめに

2050 年までにカーボンニュートラルを宣言している国や地域は 150 を超えており¹⁾、COP26 ではパリ協定のルールブックが完成するなど、脱炭素化に向けた動きが世界的に加速している。日本においても、2020 年 12 月に「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」²⁾ が公表され、2050 年カーボンニュートラルを実現する上で不可欠な重点分野ごとに実行計画が示された。

また全世界の CO₂ 排出量のうち、セメント産業に関連する排出が 7% を占めるとの報告³⁾ もあるように、セメント製造時に排出される CO₂ をいかに削減するかについての関心が高まっている。セメントは石灰石を脱炭酸させて原料としている以上、製造量に比例して CO₂ 排出量が増えることは必然ともいえるが、セメント・コンクリートは、健全な社会資本を構築する上で欠かせない材料であることは疑う余地がなく、その役割を保ちつつも CO₂ 排出の削減が求められることになる。

そこで、最近特に注目されているのが、セメント・コンクリートの中性化/炭酸化(本論では炭酸化と称する)反応による CO₂ 固定化技術であり、グリーン成長戦略²⁾ の実行計画においてもコンクリート製品・コンクリート構造物へ CO₂ を固定化し有効利用するカーボンリサイクル技術が重要分野の一つに掲げられている。各産業のカーボンニュートラルの実現には CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage, 炭素の回収・利用・貯留) の活用が不可欠であるが、様々な分野において分離・回収された CO₂ を余すことなく有効に利用することが求められる。その際に、膨大なストックがあり、生産量も多いコンクリート製品・コンクリート構造物や、セメント・コンクリート系廃棄物は、CO₂ との反応により「炭酸塩化」⁴⁾

できることから、CO₂ の有効な利用・貯留先として期待されている。

このような背景のもと、筆者らは、セメント工場、焼却施設、発電所などからの排気ガス中の CO₂ を直接利用することを想定し、20%以下の CO₂ 濃度のガスによって再生骨材やスラッジケーキに効果的に CO₂ を固定化させる検討を進めている^{5), 6)}。CO₂ 固定化にあたっては、セメント水和生成物のうち Ca(OH)₂ (以下、CH) と C-S-H との炭酸化反応を効率的かつ安定的に行える手法の確立が求められているが、炭酸化反応は Ca イオン (以下、Ca²⁺) と炭酸イオン (以下、CO₃²⁻) の反応場として水が必要であるため、試料の含水状態や相対湿度の影響をうける。既往研究^{5), 6)} においても、17%濃度の CO₂ ガス環境下では、水分供給がない場合、CH の反応が停滞する現象や、乾湿繰返しを行ったとしても C-S-H 中の Ca を全て反応に使えないことが確認されており、気中での炭酸化プロセスのボトルネックとなっていることが指摘されている⁷⁾。

また気中のみならず、水中での炭酸化に関する研究も行われているが、基本的なアプローチは、セメント系の粉末を浸漬した状態で CO₂ ガスをバブリングするか、上澄水などの Ca²⁺ が多く含まれる水中でバブリングすることで、高効率に CaCO₃ を生成させる方法であり、固体材料への適用についての研究は多くない。林ら⁸⁾ は、各種繊維を用いて透過・透気性を高めたコンクリートに CO₂ で製造したナノバブル水を透過する液状炭酸化養生による CO₂ の固定促進効果を評価したが、pH と炭酸の解離状態の関係から、pH の低い CO₂ ナノバブル水中では、CO₃²⁻濃度が低く、Ca²⁺ との CO₂ 固定化反応が効率的に進行しないことを報告している。

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

*2 (株) 安藤・間 技術研究所脱炭素技術開発部主任研究員 修士 (工学) (正会員)

*3 新潟大学 大学院自然科学研究科環境科学専攻 修士

*4 新潟大学 工学部工学科准教授 博士 (工学) (正会員)

そこで本研究では、水中炭酸化によるセメント系再生材料へのCO₂固定効率の向上を目指して、CCUS関連技術における化学吸収法でも着目される炭酸カリウム（以下、K₂CO₃）溶液を使用し、液相を高アルカリに保持したままCO₃²⁻を直接材料に供給する手法について検討を行い、CO₂固定量や水和生成物の変化等について評価した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究で使用した再生材料は、スラッジ砂と再生細骨材の2種類である。スラッジ砂は、実際のレディーミクストコンクリート工場（以下、生コン工場）で発生するスラッジ水をフィルタープレスして回収されたスラッジケーキを採取し、極力大気に触れないようにビニール袋内で1か月程度保管した後、10mm程度までジョークラッシャーで粗粉砕し、1.2~5.0mmに粒度調整して製造した。使用したスラッジケーキの基礎性状を表-1に、粉砕・粒度調整状況を写真-1に示す。

再生細骨材は、解体ガラ由来の再生砂（RC10）を5mm以下に粒度調整した再生骨材L相当品を使用した。再生

表-1 スラッジケーキの基礎性状

プレス後の含水率(%)	45.1
CaO含有率(%)	66.5
スラッジケーキ中に含まれる主な原材料	普通ポルトランドセメント、石灰系膨張材、山砂、石灰岩砕石粉、珪岩砕石粉



a. スラッジケーキ



b. スラッジ砂

1.2~5.0mm : F.M.4.9

写真-1 スラッジケーキの状態

表-2 再生細骨材の物性値

表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	絶乾密度 (g/cm ³)	微粒分量 (%)	粗粒率 (F.M.)	付着ペースト量 (%)
2.23	12.5	1.99	3.4	3.20	33.8

細骨材の物性値を表-2に示す。今回使用した再生細骨材は、不特定に回収されてRC10として流通している製品を用いたため、原コンクリートの特定はできないが、骨材試験の結果から、JIS A 5023におけるコンクリート用再生骨材Lの吸水率の上限値（13.0%）に近い品質であり、塩酸溶解により測定した付着ペースト量は33.8%であった。付着ペースト量の結果には、石灰石骨材の溶解による影響も含まれる可能性があるが、今回使用した材料は原コンクリートの特定ができていないため、その影響度については不明である。なお、保管状況と期間はRC10として製造されてからポリプロピレン製コンテナバッグの中で約6か月間屋内保管されたものを使用した。

2.2 K₂CO₃溶液によるCO₂固定養生

K₂CO₃溶液は、一般工業用（K₂CO₃ : 99.0%以上、密度2.29g/cm³）のK₂CO₃を使用して、蒸留水に所定量溶解させて製造した。K₂CO₃溶液によるCO₂固定養生として、スラッジ砂と再生細骨材を表-3に示す条件で浸漬することでCO₂固定量を検討した。K₂CO₃濃度に関しては、K₂CO₃濃度とCO₂固定量の関係を把握するため、低濃度から飽和濃度（53mass%、20℃）まで適宜設定した。浸漬時の固液比（質量）が1:4になるように試料数量200gに対して、K₂CO₃溶液を800gとした。

スラッジ砂は、粉砕・粒度調整した試料を1.6kg程度採取し、試料分取器により1/8に縮分した後、すぐにアセトンに6時間浸漬し、真空乾燥にて乾燥させてK₂CO₃溶液に浸漬した。再生細骨材は、屋内で保管された試料を同じく1.6kg程度採取し、1/8に縮分後に気乾状態のまま浸漬した。表-4に各再生材料のK₂CO₃溶液への浸漬と測定までの試料調製手順を示す。K₂CO₃溶液浸漬後の試料は、粉砕時に大気中のCO₂との反応の影響を極力排除するため、遠心分離にて固相回収後すぐにアセトンに浸漬し、真空デシケータで乾燥させた後に粉砕を行った。

表-4 K₂CO₃溶液への浸漬と試料調製手順

1. 炭酸カリウム溶液浸漬	所定の浸漬時間
2. 遠心分離にて固相回収	3000RPMで10分
3. アセトン浸漬	6時間以内
4. 真空デシケータにて乾燥	24時間以上
5. ディスクミル・ボールミルにて粉砕	150μm以下程度
6. 真空デシケータ内で分析まで保管	

表-3 再生材料の炭酸カリウム溶液への浸漬条件

再生材料種類	炭酸カリウム濃度 (mass%)	浸漬時間 (時間)	溶液温度 (℃)	浸漬時の試料の状態	備考
スラッジ砂	2.9, 15, 27, 53	24, 72	20	絶乾 (真空乾燥)	濃度の影響
再生細骨材	2.9, 23, 30, 40, 53	24, 72	20	気乾	濃度の影響
	23	3, 9, 15, 24	20	気乾	浸漬時間の影響

2.3 測定項目および測定方法

(1) CO₂ 固定量

CO₂ 固定量は、湿式分析および示差熱-熱重量同時分析（以下、TG-DTA）により CO₂ 含有率を測定し、K₂CO₃ 溶液浸漬前後の CO₂ 含有率を式(1)により差し引くことで算定した。なお、CO₂ 含有率、CH 含有率および CaCO₃ 含有率は、真空乾燥による乾燥状態の試料に対する含有率となる。

$$CO_{2fix} = \left\{ CO_2' \times \left(\frac{100 - CO_2}{100 - CO_2} \right) - CO_2 \right\} \times 10 \quad (1)$$

ここに、CO_{2fix} : CO₂ 固定量 [kg/t], CO₂' : CO₂ 含有率（炭酸化後）[%], CO₂ : CO₂ 含有率（炭酸化前）[%]

湿式分析では、試料を塩酸で分解し、生成した CO₂ 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 CO₂ 含有率を測定した⁵⁾。

示差熱重量分析（以下、TG-DTA）は、水平作動方式の装置を使用し、試料質量約 50mg、温度範囲室温～1000°C、昇温速度 10°C/min、炉内雰囲気 N₂ 300ml/min. の条件で実施した。CaCO₃ の脱炭酸による質量変化率すなわち CO₂ 含有率は、TG 曲線の 550～900°C の間の質量変化率とした⁵⁾。

(2) 粉末 X 線回折 (XRD)

試料中の水和物を同定するため粉末 X 線回折 (XRD) による分析を行った。卓上型 XRD 装置を使用し、ターゲット Cu-Kα、管電圧 40kV、管電流 15mA として、走査範囲 5～70°、ステップ幅 0.02°、走査速度 2°/min の条件で測定を行った。

(3) フーリエ変換赤外分光法 (FTIR)

反応過程における水和物の構造変化を赤外線吸収スペクトルから明らかにするため、FTIR 測定を行った。測定は KBr 錠剤法によって行い、測定条件は、試料と KBr 錠剤の質量比 1 : 200、中赤外線領域 400～4000cm⁻¹、積算回数 16 回、分解能 4.0cm⁻¹ とした。また、近接し重なり合っているバンドを分離するため得られたスペクトルの 2 次微分を行った^{9), 10)}。

3. 測定結果および考察

3.1 CO₂ 固定量

図-1 に K₂CO₃ 溶液浸漬によるスラッジ砂の K₂CO₃ 濃度と CO₂ 固定量の関係を示す。図には湿式分析と TG-DTA の結果から算定した CO₂ 固定量をそれぞれ示している。湿式分析から求めた CO₂ 固定量は、K₂CO₃ 濃度 15% まで顕著な増加がみられ、その後は横ばいか微増傾向となり、K₂CO₃ 濃度 53% では 24 時間浸漬で 120kg/t、72 時間浸漬で 166kg/t の CO₂ 固定量となった。一方、TG-DTA から算定した CO₂ 固定量は、K₂CO₃ 濃度 15% までは湿式分析と同様の傾向を示したが、K₂CO₃ 濃度 27% から高濃

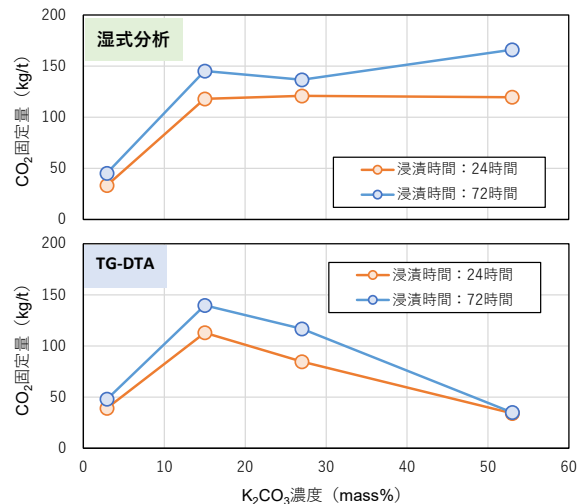


図-1 K₂CO₃ 溶液浸漬によるスラッジ砂の K₂CO₃ 濃度と CO₂ 固定量の関係

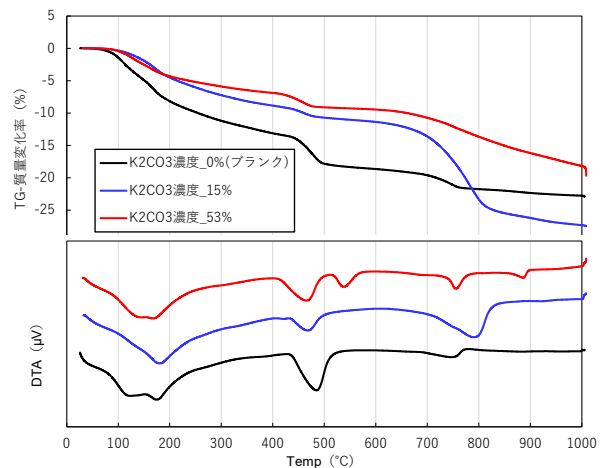


図-2 K₂CO₃ 溶液浸漬によるスラッジ砂の K₂CO₃ 濃度と TG-DTA 曲線の変化

度側では固定量が減少する傾向がみられた。

図-2 にブランク試料と K₂CO₃ 濃度 15%、53% の TG-DTA 曲線を示す。K₂CO₃ 溶液浸漬前のブランク試料と K₂CO₃ 濃度 15% 浸漬後の結果を比較すると、450°C 付近の CH 由来と思われる質量減少率が K₂CO₃ 濃度 15% 浸漬後の試料では低下し、600～850°C 付近の CaCO₃ 由来と思われる質量減少率が増加していることが分かる。つまり、K₂CO₃ 溶液浸漬後に CH が CaCO₃ に変化している可能性が示唆される。一方、K₂CO₃ 濃度 53% では、450、550、750、900°C 付近に 4 つの吸発熱ピークが確認され、質量減少率も 600°C 以降緩やかに減少し続けている。K₂CO₃ 自体の TG-DTA 曲線は、900°C でシャープな吸熱ピークが現れて、そこから緩やかに質量減少する傾向がみられる^{例え 11)}。従って、高濃度の K₂CO₃ 浸漬における CO₂ 固定量の湿式分析と TG-DTA の差は、CaCO₃ として固定されていない CO₂、たとえば K₂CO₃ (あるいは CO₃²⁻) や複塩 CaCO₃・K₂CO₃ などで存在する CO₂ 量を示していると考えられる。

また図-3に、 K_2CO_3 溶液浸漬（24時間）による再生細骨材の K_2CO_3 濃度と CO_2 固定量の関係を示す。 K_2CO_3 濃度が高くなるほど CO_2 固定量が直線的に増加する傾向が確認され、 K_2CO_3 濃度 53%では最大で 77kg/t の CO_2 固定量となった。湿式分析と TG-DTA の結果は、湿式分析が低濃度域で若干大きめの値を示す傾向はあるものの、いずれも同程度の結果となっており、スラッジ砂の結果でみられたような高濃度域での顕著な差異は認められなかった。

加えて図-4に、 K_2CO_3 濃度 23%における浸漬時間と CO_2 固定量の関係を示す。浸漬時間が長くなるほど CO_2 固定量が増加する傾向にあるが、24時間から72時間での増加は緩やかになっている。湿式分析と TG-DTA の結果は、TG-DTA の結果が若干大きい値を示しているが、傾向は類似している。

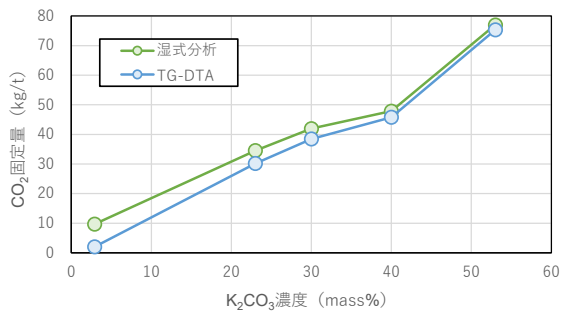


図-3 K_2CO_3 溶液浸漬（24時間）による再生細骨材の K_2CO_3 濃度と CO_2 固定量の関係

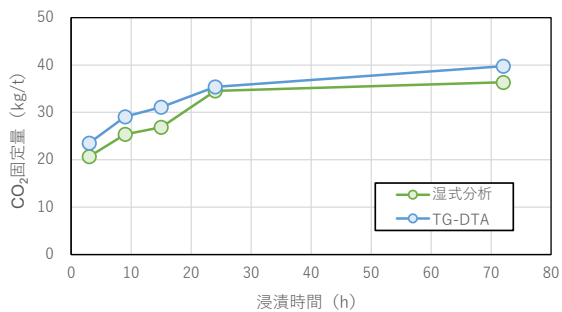


図-4 再生細骨材の K_2CO_3 溶液浸漬時間と CO_2 固定量の関係

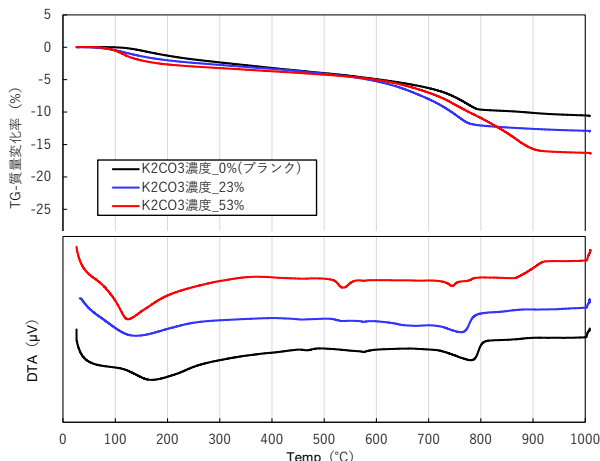


図-5 再生細骨材の K_2CO_3 濃度と TG-DTA 曲線の変化

最後に再生細骨材の K_2CO_3 濃度と TG-DTA 曲線の変化を図-5に示す。今回使用した再生細骨材は、 K_2CO_3 溶液浸漬前のブランク試料においても、 $450^{\circ}C$ 付近の CH がほとんど確認できないことから、原コンクリートの供用期間もしくは再生細骨材の製造時および保管中にある程度の炭酸化が進行した状態の試料であることが推察できる。 K_2CO_3 濃度 23%への浸漬後にも DTA 曲線はほとんど変わらないが、 $550\sim 900^{\circ}C$ の質量減少率が增加していることから、CH以外の Ca、おそらくは C-S-H との炭酸化反応により $CaCO_3$ が生成されているものと推察される。 K_2CO_3 濃度 53%では、 $540^{\circ}C$ 付近に吸発熱ピークが確認されるが、質量減少率は $550\sim 900^{\circ}C$ の範囲で大きく減少している。吸発熱ピークが明瞭ではないことから $CaCO_3$ の脱炭酸のみの減少であるとは言い切れないが、 $900^{\circ}C$ 以内に質量減少がほぼ収束していることから K_2CO_3 そのものの脱炭酸ではなく、何かしらの炭酸塩由来の CO_2 含有率である可能性が高い。

以上の結果から、再生細骨材について CH がほとんど存在しないにもかかわらず、 K_2CO_3 溶液への浸漬により CO_2 固定量の増加が認められ、特にスラッジ砂においては、高濃度の K_2CO_3 溶液への浸漬によって、通常の炭酸化反応とは異なる反応が起きていることが示唆された。それらの反応を考察するために、次節よりスラッジ砂を対象に XRD による水和生成物の同定と、FT-IR による水和物の構造変化を検討した。

3.2 XRD 分析結果

図-6にスラッジ砂の K_2CO_3 濃度 15, 27, 53%溶液への3日浸漬後試料の XRD パターンを示す。XRD 結果よ

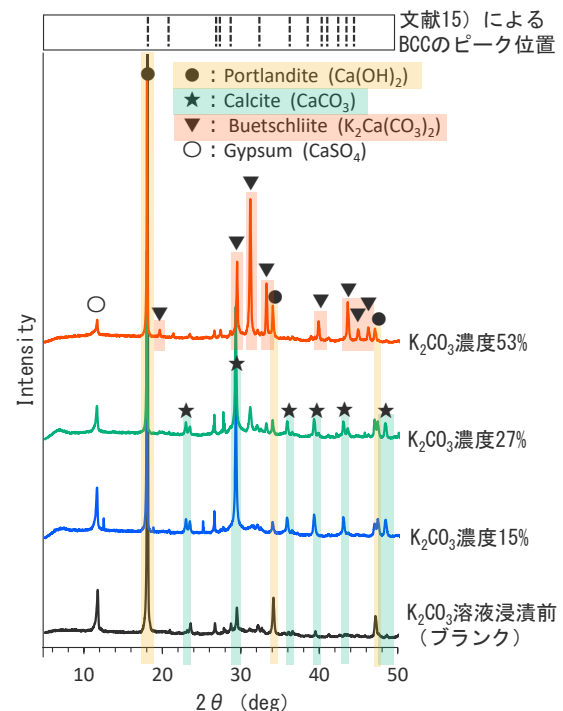


図-6 XRD 分析結果 (K_2CO_3 溶液 3日浸漬後)

り、 K_2CO_3 濃度 15%、27%と K_2CO_3 濃度 53%では浸漬後に生成する炭酸塩が異なっていることが確認でき、15、27%では Calcite($CaCO_3$)のピークが出現し、53%では Buetschliite($K_2Ca(CO_3)_2$)のピークが出現した。Buetschliiteのピークは Calcite のピークとも重複しており同定されていないが K_2CO_3 濃度 27%でも出現している可能性が高い。ここで出現した Buetschliite が 2 種類の塩から構成される複塩とすれば、TG-DTAの結果で確認された $600^\circ C$ 以降に緩やかに質量減少し続ける反応は、この Buetschliite に起因する脱炭酸反応と推察される。

また XRD で同定された炭酸塩は Calcite と Buetschliite のみであったが、 $CaCO_3$ 生成過程の中間段階としてゲル状凝集体である非晶質炭酸カルシウム (Amorphous Calcium Carbonate, 以下, ACC) が生成することが知られている(例えば^{12),13})。小嶋らの研究¹⁴)によると Na_2CO_3 系反応において pH が 12.7 以上 ($20^\circ C$) の領域では ACC 中の CO_3^{2-} の一部が OHに置換した非晶質塩基性炭酸カルシウム (Amorphous Basic Calcium Carbonate, 以下 ABCC) が生成されることが報告されている。ABCCは、ACCと塩基性炭酸カルシウム (Basic Calcium Carbonate, 以下, BCC) の中間物質であり、本稿では総じて BCC と称する。今回使用した K_2CO_3 溶液の pH は、 K_2CO_3 濃度 15%、27%で 12 前後、 K_2CO_3 濃度 53%で 13.5 以上であり、 K_2CO_3 溶液への浸漬により、スラッジ砂中の細孔溶液の pH が高くなることで、BCC が生成されている可能性が考えられる。図-6 には、文献¹⁵) の BCC の XRD 回折ピークを参考に示すが、Buetschliite のピークと類似していること、および同定できていない細かいピーク位置と一致していることが確認できることから、BCC が生成している可能性が高いことが推察される。

また、 $2\theta=18^\circ$ に CH に起因する回折ピークが確認されるが、田中らの研究¹⁶)によると、XRD による BCC の回折ピークは、CH と近い $2\theta=18^\circ$ 付近に出現することや、BCC が温度等の条件により容易に転化して、 $CaCO_3$ と CH に分相することが報告されている。したがって、 $2\theta=18^\circ$ 付近の回折ピークは、元々スラッジ砂中に存在する CH によるものか、BCC や BCC が転化して分相した CH であるかについては XRD からは判断できない。

3.3 FTIR 分析結果

図-7 に、スラッジ砂の K_2CO_3 濃度 15、27、53%溶液への浸漬後試料の FTIR スペクトルを示す。 $CaCO_3$ のピークは、既往の研究¹⁷)により、C-O 結合の伸縮振動 (ν_3)、 CO_3^{2-} の変角振動 (ν_2)、O-C-O 結合の変角振動 (ν_4)、C-O 結合の対称伸縮振動 (ν_1) の 4 つが報告されている。図-7 には、 $\nu_1 \sim \nu_4$ に対応するスペクトルの範囲を示しているが、 ν_2 、 ν_3 のピークが K_2CO_3 浸漬によって大きくなっていることが確認できる。 ν_3 の領域のピークに着目

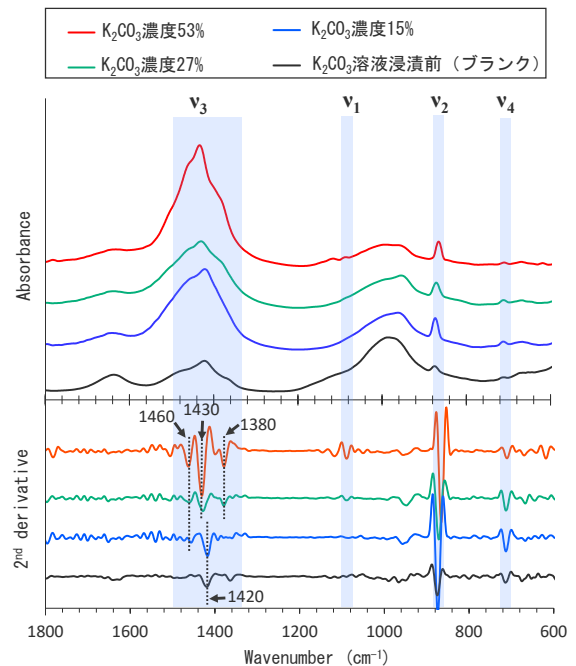


図-7 FTIR 分析結果 (K_2CO_3 溶液 3 日浸漬後)

すると、Calcite に帰属¹⁸)する 1420 cm^{-1} 付近のピークが、15、27、53%浸漬後では 1460 cm^{-1} 付近に分離、もしくはシフトして出現していることが確認できる。この 1460 cm^{-1} 付近のピークは、既往文献によると ACC¹⁹)、BCC²⁰)、Vaterite²¹) に帰属するピークであることが報告されているが、XRD で Vaterite が出現していなかったことから、ACC もしくは BCC の帰属である可能性が高い。ACC と BCC の分離、定量は今後の課題としたい。Buetschliite のピークは、既往文献からは明らかではないが、 K_2CO_3 濃度 27%、53%において 1420 cm^{-1} のピークが 1430 cm^{-1} にシフトし、 1380 cm^{-1} にピークが出現していることから同ピークが Buetschliite に帰属する可能性が高い。

以上の結果から、 K_2CO_3 溶液による炭酸化養生は、従来の炭酸化反応と異なる新たな炭酸化プロセスが得られることが示唆され、従来の炭酸化による CO_2 固定のボトルネック解消に有効な方法となり得る可能性がある。一方で、3.1 節で示したように、スラッジ砂では高濃度の K_2CO_3 溶液への浸漬により湿式分析と TG-DTA の CO_2 固定量に顕著な差がみられたのに対し、再生細骨材ではその傾向は確認されなかったことから、スラッジ砂と再生細骨材で異なる反応が起きていることが示唆された。その要因については現段階で明らかではないが、細孔溶液中の pH や材料中の C-S-H の Ca/Si 比が反応に影響している可能性が考えられるため、C-S-H の反応や物性変化等について引き続き研究を進める。

4. まとめ

以下に本研究で示された知見について記す。

- 1) スラッジ砂、再生細骨材へ K_2CO_3 溶液浸漬による炭

酸化養生を実施した結果、スラッジ砂で最大 166kg/t、再生細骨材で 77kg/t の CO₂ 固定量が湿式分析結果から得られた。

- 2) K₂CO₃ 濃度により生成される炭酸塩が異なり、さらにスラッジ砂と再生細骨材でもその傾向に違いがみられることが確認された。
- 3) CH を含有しない再生細骨材においても炭酸塩由来の高い CO₂ 固定量が確認されたことから、C-S-H との炭酸化反応が生じている可能性が高いことが示唆された。
- 4) スラッジ砂における XRD, FTIR の結果から、K₂CO₃ 濃度が低い場合には ACC もしくは BCC が生成し、K₂CO₃ 濃度が高くなるとさらに Buetschliite が生成することが確認された。

なお、本論で示した CO₂ 固定量は、炭酸化養生前後の材料中に含まれる CO₂ から算定した値であるが、本来の意味での CO₂ 固定は、取り込まれた CO₂ が長期的に安定していることが求められる。その点についても今後の課題としたい。

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 (JPNP21023) の一環として行ったものです。関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁: 令和 3 年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書 2022), pp.24-25, 2022
- 2) 内閣官房ほか: 2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略, 2021
- 3) International Energy Agency: Energy Technology Perspectives 2020, International Energy Agency, p.216, 2020
- 4) 野口貴文: 建築分野における中性化/炭酸化の新たな視点, コンクリート工学, Vol.61, pp.748-753, 2023
- 5) 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, pp.34-39, 2023
- 6) 谷田貝敦, 鈴木好幸, 石川伸介, 渡邊真史: スラッジケキの組成変化と CO₂ 固定量に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, pp.1264-1269, 2023
- 7) 斎藤豪: C-S-H の炭酸化の観点から見た新たな炭酸化プロセスの提案に向けた展望, コンクリート工学, Vol.61, No.9, pp.780-781, 2023
- 8) 林俊斉, 高木亮一, 湊太郎, 坂本守: アルミ繊維等

を用いて透水・透気性を高めたコンクリートによる CO₂ 固定に関する基礎検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, pp.1060-1065, 2023

- 9) Y. Yan et al.: Effect of alkali hydroxide on calcium silicate hydrate (C-S-H), Cem. Concr. Res., Vol. 151, No. 106636 (2022)
- 10) S. Barzgar et al.: The effect of equilibration time on Al uptake in C-S-H, Cem. Concr. Res., Vol. 144 (2021)
- 11) Mina Sabzevar et al.: Physical and mechanical properties of porous copper nanocomposite produced by powder metallurgy, Advanced Powder Technology, Vol. 27, pp. 105-111 (2016)
- 12) Steiner S et al.: Effect of relative humidity on the carbonation rate of portlandite, calcium silicate hydrates and ettringite, CCR, Vol.135, 2020
- 13) A. V. Radha et al.: Transformation and crystallization energetics of synthetic and biogenic amorphous calcium carbonate, Cem. Concr. Res., Vol. 107, No.38, 2010
- 14) 小嶋芳行, 川野辺晃生, 安江任, 荒井康夫: 非晶質炭酸カルシウムの合成と結晶化, Journal of the Ceramic Society of Japan, Vol.101, pp.1145-1152, 1993
- 15) M. RIPKEN et al.: Structural and physicochemical characterization of basic calcium carbonate (BCC), Ca₃(CO₃)₂(OH)₂·H₂O, European Journal of Mineralogy, Vol.30(1), 2018
- 16) 田中宏一, 熊坂徹夫, 加藤宏明, 山下一夫: 塩基性炭酸カルシウムと水中 (~30°C) での安定化, Gypsum & Lime, No. 220, pp.130-134, 1989
- 17) R. Ylmén and U. Jäglid: Carbonation of Portland Cement Studied by Diffuse Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy, Int. J. Concr. Struct. Mater., Vol. 7, No. 2, pp. 119-125, 2013
- 18) Guo-Bin Cai et al.: 1,3-Diamino-2-Hydroxypropane-N,N,N',N'-Tetraacetic Acid Stabilized Amorphous Calcium Carbonate: Nucleation, Transformation and Crystal Growth., CrystEngComm, Vol.12 (1), pp.234-241, 2009
- 19) Rodriguez-Blanco et al.: The Kinetics and Mechanisms of Amorphous Calcium Carbonate (ACC) Crystallization to Calcite, Viavaterite, Nanoscale, Vol.3 (1), pp.265-271, 2011
- 20) 松下功ほか: 塩基性炭酸カルシウムの熱分解機構, 日本セラミックス協会学術論文誌, Vol.101(1176), pp.895-899, 1993
- 21) Chakrabarty, D and Mahapatra, S: Aragonite Crystals with Unconventional Morphologies, Journal of Materials Chemistry, Vol. 9 (11), pp. 2953-2957, 1999