

## コンクリートスラッジの直接炭酸塩化反応による 二酸化炭素固定

### Fixation of Carbon Dioxide via Direct Mineral Carbonation Using Concrete Sludge

野口 美由貴\*, 山崎 章弘\*  
Miyuki Noguchi and Akihiro Yamasaki

#### Abstract

Concrete sludge is a waste fresh concrete returned from construction sites. Due to its high alkalinity, the waste treatment of concrete sludge is costly and power consuming process; neutralization by using acids is necessary before disposal as solid waste. We have developed a new type of fixation process of carbon dioxide using concrete sludge. By a simple bubbling of carbon dioxide gas into model concrete sludge, a mixture of cement and water, resulted in the formation of calcium carbonate, where calcium concentration and pH decreased with time. The effects of operation conditions including cement/water ratio, bubbling time, CO<sub>2</sub> flow rate, CO<sub>2</sub> partial pressure on the CO<sub>2</sub> fixation performance were examined. The highest fixation ratio was 0.085 mmol/(min·g-cement), and the highest degree of CO<sub>2</sub> fixation was 91.5%.

#### I. コンクリートスラッジとは

コンクリートは建築材料として大量に、また広範囲な用途に用いられている。2021年の生コンクリートの出荷量は、約7600万m<sup>3</sup>であり、2000年代前半の18000万m<sup>3</sup>に比べると半減しているが、それでも莫大な量のコンクリートが消費されている<sup>1)</sup>。コンクリートは、セメント、細骨材（砂）、粗骨材（砂利）に水を加えたものであり、セメント中のカルシウム分、シリカ分が水和反応を起こすことで固化する。水和反応の生成物は、いわゆるカルシウム-シリカ-水和：C-S-H構造や水酸化カルシウムであり、骨材成分を接着することで構造物としての強度を得る。コンクリート固化物は圧縮強度に優れるが<sup>2)</sup>、引張強度が不足するため、鉄筋や鉄骨などと複合化する（鉄筋コンクリートや鉄骨コンクリート）ことで引張強度を強化する。

建設現場などでコンクリートを使用する際、現場では必要とされる量よりも多くの量の生コンクリートが供給される。これは、運ばれた生コンクリートの品質が基準を満たさない場合や、予想よりも多量のコンクリートが必要になった場合に備えるためである。現場で用いられなかった

---

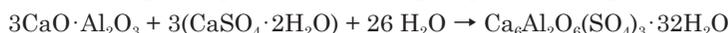
\* 成蹊大学理工学部 Faculty of Science and Technology, Seikei University

生コンクリートは、余剰コンクリートとして生コンクリート工場に戻され、産業廃棄物として廃棄される（戻りコン）。さらに、生コンクリートミキサー車などのコンクリートを扱う機械類の洗浄に用いた水（生コン洗浄水）も含めた生コンクリートの廃棄物は、コンクリートスラッジと呼ばれる<sup>2</sup>。コンクリートスラッジの主成分は水和反応の途中のセメントと、骨材成分であり、水和反応物である水酸化カルシウムの溶解によって強いアルカリ性（pH ～12）を示す。コンクリートスラッジの排出量は、生コンクリート出荷量の3.5%前後という報告があり<sup>2)</sup>、現在の出荷量から考えるとコンクリートスラッジの年間発生量は、300万トン程度と見積もられる。通常は、コンクリートスラッジや生コン洗浄水を自然乾燥、あるいは強制的に濃縮して天日乾燥するなどして含水率を下げ、汚泥として埋め立て廃棄処分されている。

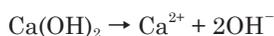
一方、コンクリートスラッジの主成分はセメントであり、カルシウム分が豊富である。水分を除いたカルシウムの割合は、CaOとして50%程度となっている<sup>3,5)</sup>。

## II. コンクリートスラッジ中のカルシウム分と炭酸塩化

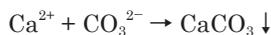
コンクリート中のセメント成分は、エーライト  $C_3S$  ( $Ca_3SiO_5$ , 55wt%)、ビーライト  $C_2S$  ( $Ca_2SiO_4$ , 20wt%)、および ( $C_3A$ ,  $3CaO \cdot Al_2O_3$ ) などからなり、それぞれは水と以下のような水和反応を起こす<sup>6,7)</sup>。



エーライト、ビーライトの水和反応では、いずれも水酸化カルシウムが水和生成物として生成する。水酸化カルシウムの水への溶解度は20°Cにおいて0.16 g/Lであり<sup>8)</sup>、カルシウムベースでは948 ppm-Ca、pHは11.63となり、アルカリ性を示す。



カルシウムイオンを含む溶液に二酸化炭素を吹き込むと、二酸化炭素は水中で炭酸イオン  $CO_3^{2-}$  となり、炭酸カルシウムの沈殿  $CaCO_3$  を生成する。



炭酸カルシウムは安定な化合物であり、また製紙やプラスチックのフィラー、医薬、あるいはセメント原料などの様々な用途を持つ材料である<sup>9)</sup>。廃棄物であるコンクリートスラッジ中のカルシウム分と、二酸化炭素を反応させる（炭酸化反応）ことで、 $CO_2$  を炭酸塩の形で固定できる。年間のコンクリートスラッジの発生量が300万トンであり、その50%がCaOとすると、 $CO_2$  の固定化ポテンシャルは、 $CaO = 56.0$  g/mol、 $CO_2 = 44.0$  g/mol、 $Ca = 40.0$  g/molなので、

$$300 \times \frac{40.0}{56.0} \times \frac{44.0}{40.0} = 235.7$$

より、236万トン/年、CaCO<sub>3</sub>の生成量は536万トン/年程度になる。CO<sub>2</sub>固定量は我が国の年間排出量10億トンに比べてごくわずかであるが、廃棄物であるコンクリートスラッジと同時に処理が可能であることから意味のあるプロセスであるといえる。なお、コンクリートスラッジの廃棄物処理費用は固化業者処理で2,800~7,600円/m<sup>3</sup>であり<sup>10)</sup>、スラッジ発生量が300万トンでスラッジの比重を2.13とすると、処理費用は100億円を超えることになるため、廃棄物処理のコスト削減にもつながる。

### III. CO<sub>2</sub>バブリングによるコンクリートスラッジの炭酸塩化

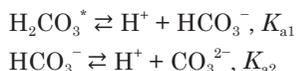
気相中のCO<sub>2</sub>の水への溶解度はヘンリーの法則にしたがい、気相中のCO<sub>2</sub>の分圧 $p_{\text{CO}_2}$ に比例し、比例定数は25°Cにおいて $K_H = 10^{-1.47} \text{ atm}^{-1}$ である<sup>11)</sup>。

$$[\text{CO}_2(\text{g})] = K_H p_{\text{CO}_2}$$

ここで、 $[\text{CO}_2(\text{g})]$ は水に溶解したCO<sub>2</sub>の濃度である。溶解したCO<sub>2</sub>は水と水和して炭酸H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>を形成する。



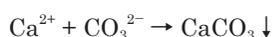
溶解したCO<sub>2</sub>と炭酸を合わせてH<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>\*と書く。これは二段階解離し、以下のような解離平衡に達する。



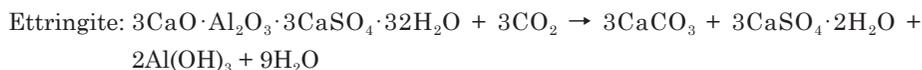
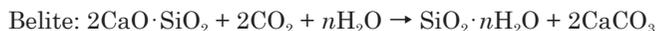
ここで、 $K_{a1}$ および $K_{a2}$ はそれぞれ、解離平衡定数である。

$$\begin{aligned} K_{a1} &= \frac{[\text{H}^+][\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3^*]} = 10^{-6.35}, 25^\circ\text{C} \\ K_{a2} &= \frac{[\text{H}^+][\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]} = 10^{-10.33}, 25^\circ\text{C} \end{aligned}$$

水溶液中にカルシウムイオンが存在し、カルシウムイオンの濃度 $[\text{Ca}^{2+}]$ と炭酸イオン濃度 $[\text{CO}_3^{2-}]$ の濃度の積が以下の溶解度積 $K_{\text{sp}} = 3.8 \times 10^{-9} (\text{mol/L})^2$  (25°C)よりも大きい場合には、炭酸カルシウムの沈殿が生じる。



なお、セメント水和物中には、AライトやBライト、あるいはこれらの水和反応による生成物であるカルシウムシリケート水和物(C-S-H)やAFm、エトリンガイトなどもCO<sub>2</sub>と反応する<sup>6,7)</sup>。



いずれの場合も炭酸化の生成物としては炭酸カルシウムとなる。

#### IV. 模擬コンクリートスラッジの炭酸塩化実験

IIIに示したように、コンクリートスラッジにCO<sub>2</sub>ガスを吹き込む（バブリング）ことで、水中に溶解したCO<sub>2</sub>が、セメント水和物由来のカルシウムと反応して炭酸カルシウムが生成し、炭酸塩化によるCO<sub>2</sub>固定が可能になる。炭酸化反応は、常温、常圧の温和な条件で進行し、外部からのエネルギー供給も必要としない。そのため、コンクリートスラッジを用いた炭酸塩化は、エネルギー消費の点からも、またコストの面からもCO<sub>2</sub>固定法として有望なプロセスとなるものと考えられる。本稿では、CO<sub>2</sub>固定法としてのコンクリートスラッジの炭酸塩化反応について模擬コンクリートスラッジを作製して実験室レベルの装置を用いてその反応特性を調べた結果について述べることにする。プロセスを支配するパラメータとしては、固液の仕込み比（セメントと水の比）、CO<sub>2</sub>流速、バブリング時間、CO<sub>2</sub>分圧などであり、これらの設定条件がCO<sub>2</sub>固定能、つまり、CO<sub>2</sub>固定速度、固定率などに及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。さらに結果に基づいて、コンクリートスラッジを用いたCO<sub>2</sub>固定化法の実用可能性や課題についても検討を加えた。

##### 1 実験方法

図1は実験装置の概要図である。反応容器（e）はアクリル製の容器であり（高さ40 cm, 内径60 cm）、マグネチックスターラー（d）で内容物を攪拌、混合できるようになっている。市販のポルトランドセメント（太平洋セメント（株）製）にイオン交換水を混合したものをモデルコンクリートスラッジとし、セメントと水の混合比（固液比、S/L）は1:200から1:20（S/L = 0.005から0.05）の範囲で変化させたものを用いた。これは、実際のコンクリートスラッジが、通常の混合比のものだけでなくコンクリート洗浄水も含むため、水の割合が大きなものも想定したためである。

モデルコンクリートスラッジを反応容器に入れ、マグネチックスターラーによって300 rpmの速度で攪拌し、セメント分を事前水和させた。事前水和時間は60分とした。事前水和したのち、CO<sub>2</sub>を含むガスをボンベ（b）から内径5 mmのプラスチック管を通して反応容器内に導入した。CO<sub>2</sub>供給ガスのフローに、窒素ガスのフロー（a）を混合することで全圧は全ての条件で1 atmで固定した。供給ガス中のCO<sub>2</sub>分圧は、0.05 atm（モル分率5%）から1 atm（モル分率100%）まで変化させた。これは、様々なCO<sub>2</sub>の発生源を想定したものである。ガス流量は、マスフローコントローラ（c）を用いて100から500 mL/minの範囲で変化させた。バブリング時間は60分から480分の範囲で変化させた。反応容器を通った供給ガスはそのまま外部に排気した。すべての実験は常温で行った。同じ条件の実験を、再現性を確認できるまで少なくとも3回繰り返し行った。溶液のpHは適宜pHメータで測定した。また、あらかじめ決めた時間ごとに内容物をシリンジ付きフィルター（細孔径0.025 μm）でサンプリングし、カルシウム濃度を誘導プラズマ発光分析器（Thermo

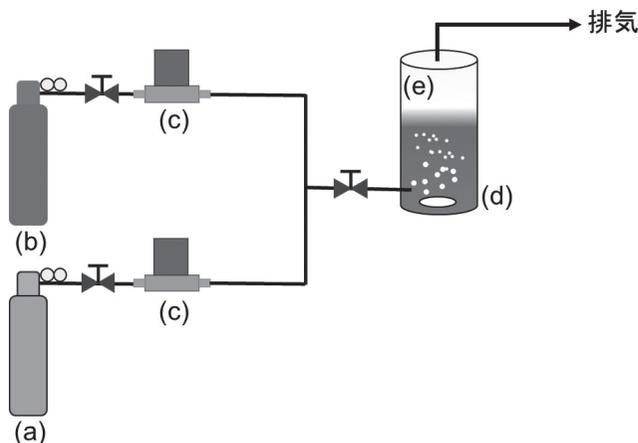


図1 反応装置の概要図

Fisher Scientific, ICPA-6000) で測定した。バブリング終了後、内容物を全量ろ過し、残渣を 100°C 恒温槽で 24 時間乾燥させた後、結晶構造を X 線回折装置 (Rigaku, Ultima IV) で分析した。残渣中の炭酸カルシウム純度は、熱天秤 (Shimadzu DTG-60H) によって測定した。すなわち、試料を常温から 1000°C まで昇温速度 10°C/min で加熱し、600 から 900°C までの重量減少が試料中の  $\text{CaCO}_3$  の分解によるものと仮定して  $\text{CaCO}_3$  の含有割合を決定した。上の結果から、 $\text{CO}_2$  固定化率、 $\text{CO}_2$  固定化速度、およびカルシウム転化率を以下の各式を用いて求めた。

$$\text{CO}_2 \text{ 固定化率 } [\text{mol}\%] = \frac{\text{炭酸カルシウムに固定された } \text{CO}_2 \text{ } [\text{mol}]}{\text{CO}_2 \text{ 供給量 } [\text{mol}]} \times 100 [\%]$$

$$\text{CO}_2 \text{ 固定速度 } [\text{mmol} \cdot (\text{min} \cdot \text{g-cement})^{-1}] = \frac{\text{炭酸カルシウムとして固定された } \text{CO}_2 \text{ } [\text{mmol}]}{\text{セメント仕込み量 } [\text{g}] \times \text{バブリング時間 } [\text{min}]}$$

$$\text{カルシウム転化率 } [\text{mol}\%] = \frac{\text{炭酸カルシウムとして固定された } \text{Ca} \text{ } [\text{mol}]}{\text{セメント仕込み量中の } \text{Ca} \text{ } [\text{mol}]} \times 100 [\%]$$

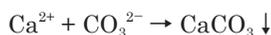
## 2 実験結果

### (1) $\text{CO}_2$ バブリングによるカルシウム濃度、pHの時間変化

図2に固液比が0.05 g/g (セメント質量/水質量) の模擬コンクリートスラッジに  $\text{CO}_2$  分圧 1.0 atm ( $\text{CO}_2$  モル分率 100%) を流速 300 mL/min で供給した場合のバブリング時間に対する液中カルシウム濃度、pH の変化を示す。事前水和 (混合後 60 min) 直後の pH は 11.9 であり、バブリング時間の経過と共に減少し、240 分間バブリング後で 6.4 になった後はほとんど変化せず、480 分バブリング後で 6.25 になった。一方、カルシウム濃度は、初期の 900 ppm からバブリング開始後急激に減少し、120 分バブリング後に 200 ppm まで低下したのちに上昇し、270 分後に 600 ppm 程度になった後、上昇が緩やかになり 480 分後には 670 ppm 程度になった。水酸化カルシウムの溶解度 (0.16 g/L、20°C)<sup>8)</sup> から計算した水酸化カルシウム飽和溶液の pH は 11.63 であり、これは事前水和直後の pH にほぼ等しい。また、水酸化カルシウムの飽和水溶液のカルシウム濃度は

1000 ppmであり、ほぼ事前水和後のコンクリートスラッジ中のカルシウム濃度に等しい。以上の結果から、セメント水和によって溶解したのは水酸化カルシウムであることがわかる。

バブリング初期におけるカルシウム濃度およびpHの低下は、溶存カルシウムイオンとCO<sub>2</sub>溶解によって生成した炭酸イオンCO<sub>3</sub><sup>2-</sup>の反応による炭酸カルシウムCaCO<sub>3</sub>の生成によるものと考えられる。



平衡にある気相中のCO<sub>2</sub>分圧 $p_{\text{CO}_2} = 1.0 \text{ atm}$ に対するカルシウムの飽和濃度を炭酸カルシウムの溶解度積 ( $K_{\text{SP}} = 2.8 \times 10^{-9} (\text{mol/L})^2$ , 25°C)<sup>8)</sup> から求めると、199 ppmになる。この値は、バブリング時間が60分から90分のカルシウム濃度がほぼ一定となった領域の濃度と一致する。一方、平衡計算から求めたpHは5.95であり、バブリング時間が60分から90分の領域で観測されたpH10.6から10.0よりも低く、バブリング時間240分以降に観測されたpHである6付近の値に近い。これらの結果から、比較的初期段階（バブリング時間60分から90分の間）に炭酸カルシウムが形成され、沈殿することでカルシウムイオンが低下するものの、時間の経過と共に溶解度が大きな非晶質な炭酸カルシウム ( $K_{\text{SP}} = \sim 10^{-6} (\text{mol/L})^2$ と考えられる<sup>12)</sup>) に変化し、カルシウム濃度が上昇したのと考えられた。

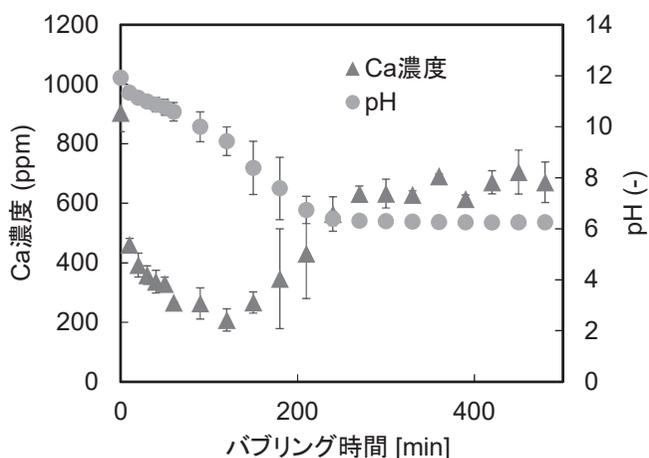


図2 カルシウム濃度、pHのバブリング時間に対する変化  
固液比：0.05 g/g (セメント質量/水質量)、CO<sub>2</sub>分圧：1.0 atm (モル分率100%)、  
流速：300 mL/min

図2の条件の場合、バブリング時間480分で、CO<sub>2</sub>固定化率は2.6 mol%であり、CO<sub>2</sub>固定速度は0.016 mmol/(min·g)である。また、セメント中のカルシウム転化率は67.5%であった。

図3は480分間バブリング後の内容物を濾過した残渣のXRDパターンである。比較のため、実験に使用したポルトランドセメントのXRDパターンも示した。セメント中に含まれていたエーライトのピークの強度がCO<sub>2</sub>バブリング処理によって減少し、炭酸カルシウムの一結晶形であるカルサイトのピーク強度が上昇したことがわかる。カルサイトは、炭酸カルシウムの結晶形の中で、常温、常圧で最も安定なものである。

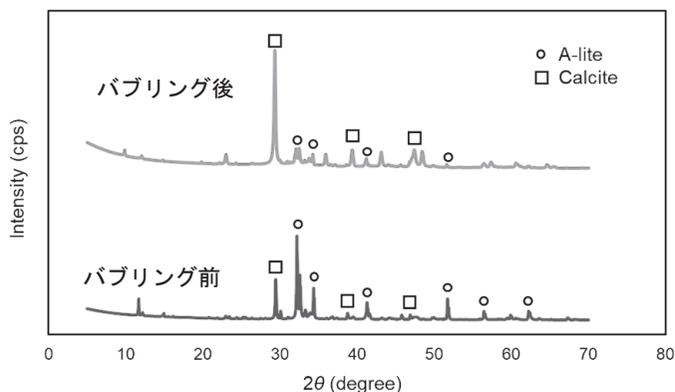


図3 バブリング前とバブリング後のXRDパターン

## (2) 固液比の影響

実際のコンクリートスラッジは、戻りコンから洗浄水まで固体と液体の割合は様々なものがある。そこで、モデルコンクリートスラッジの固液比の影響について調べた。図4はCO<sub>2</sub>固定化率とCO<sub>2</sub>固定速度に及ぼす固液比S/Lの影響を示したものである。S/L比以外の実験条件は共通であり、CO<sub>2</sub>バブリング速度は300 mL/minでCO<sub>2</sub>分圧は1.0 atm、バブリング時間は60分である。CO<sub>2</sub>固定化率はS/L比が0.025までは、S/L比に比例して上昇するが、それよりも大きな領域ではゆるやかになった。これは、CO<sub>2</sub>供給量が一定であるため、S/Lが大きくなるほど、固定に利用できるセメント中のカルシウムが増加するためであると考えられる。一方、CO<sub>2</sub>固定速度はS/L比が0.05まではほとんどS/L比によらないが、S/L比が0.05になるとやや低下した。実験を行った条件では、S/Lが0.05の時にCO<sub>2</sub>固定化率が最大で9.13mol%、CO<sub>2</sub>固定速度はS/Lが0.025の時に最大で、0.085 mmol/(min·g)であった。

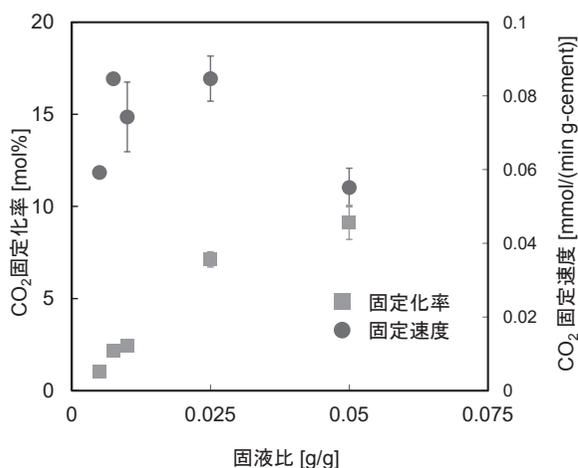


図4 固液比S/LとCO<sub>2</sub>固定化率、固定速度の関係

## (3) バブリング時間の影響

図5はCO<sub>2</sub>固定化性能に及ぼすバブリング時間の影響を示したものである。すべての実験で

S/L比は0.05 g/gで固定し、CO<sub>2</sub>流速は300 mL/min、分圧は1.0 atmとした。CO<sub>2</sub>固定化率、CO<sub>2</sub>固定速度共にバブリング時間の増加と共に低下する傾向が見られた。これは、S/L比、すなわちセメント中のカルシウム仕込み量が一定であるため、バブリング時間が長いほどCO<sub>2</sub>固定に用いられるカルシウム量が低下するためであると考えられる。実験を行った条件では、60分間バブリングがCO<sub>2</sub>固定化率、CO<sub>2</sub>固定速度共に最大であり、それぞれ、9.55 mol%と0.055 mmol/(min·g)であった。

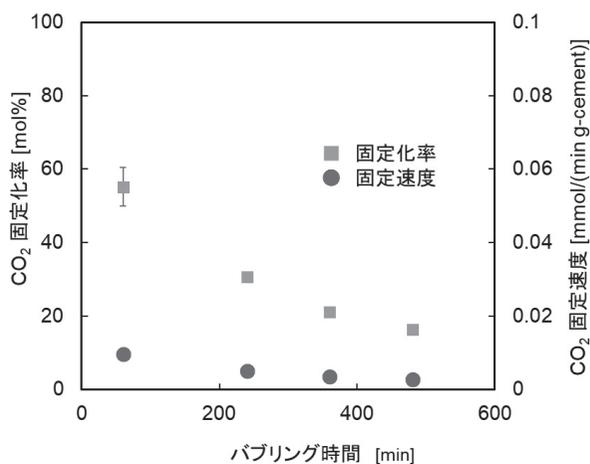


図5 バブリング時間とCO<sub>2</sub>固定化率、固定速度の関係

#### (4) CO<sub>2</sub>流速の影響

図6はCO<sub>2</sub>固定化率と固定速度におよぼすCO<sub>2</sub>流速の影響を示したものである。すべての実験でS/L比は0.05 g/g、バブリング時間は60分、CO<sub>2</sub>分圧は1 atmである。

CO<sub>2</sub>固定化率はCO<sub>2</sub>流速が大きいほど低下した。これは、CO<sub>2</sub>流速が大きいほど反応器内でカルシウムと反応せずに通過する割合が大きくなるためであると考えられる。一方、CO<sub>2</sub>固定速度はCO<sub>2</sub>流速が大きいほど大きくなった。これは、流速が大きいほど物質移動が促進され、その結

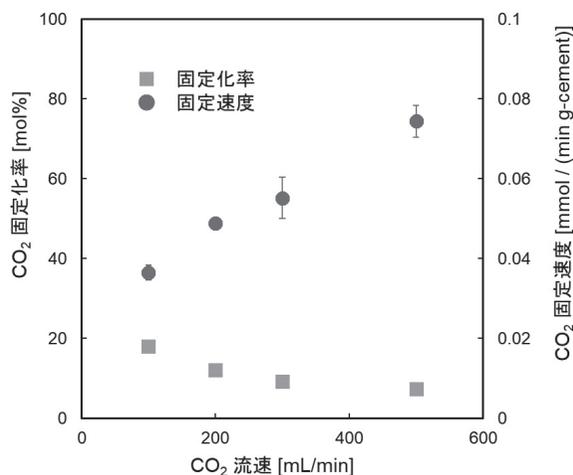


図6 CO<sub>2</sub>バブリング速度とCO<sub>2</sub>固定化率、固定速度の関係

果反応速度が大きくなるためであると考えられる。実験を行った条件では、流速が100 mL/minでCO<sub>2</sub>固定化率が、流速が500 mL/minで固定速度が最大であり、それぞれ18.0 mol%と0.074 mmol/(min·g)であった。

### (5) CO<sub>2</sub>分圧の影響

図7および図8はCO<sub>2</sub>固定化率及び固定速度に対するCO<sub>2</sub>分圧の影響を示したものである。すべての場合で、S/L比は0.05 g/g、バブリング時間は60分とし、CO<sub>2</sub>流速は図7の場合が100 mL/min、図8の場合が500 mL/minである。CO<sub>2</sub>流速が100 mL/minの場合、CO<sub>2</sub>分圧が高いほどCO<sub>2</sub>固定速度は大きくなったのに対し、CO<sub>2</sub>固定化率はCO<sub>2</sub>分圧と共に急激に減少した。CO<sub>2</sub>固定化率はCO<sub>2</sub>分圧が0.05 atmの場合が最大で91 mol%、CO<sub>2</sub>固定速度はCO<sub>2</sub>分圧が1.0 atmの場合が最大で0.036 mmol/(min·g)となった。一方、流速が500 mL/minの場合も、CO<sub>2</sub>分圧が高いほどCO<sub>2</sub>固定速度が高くなったが、その効果は100 mL/minの場合よりもより顕著であった。これは、流速が大きいかほどCO<sub>2</sub>の水相への物質移動が大きくなり、分圧が高いほど

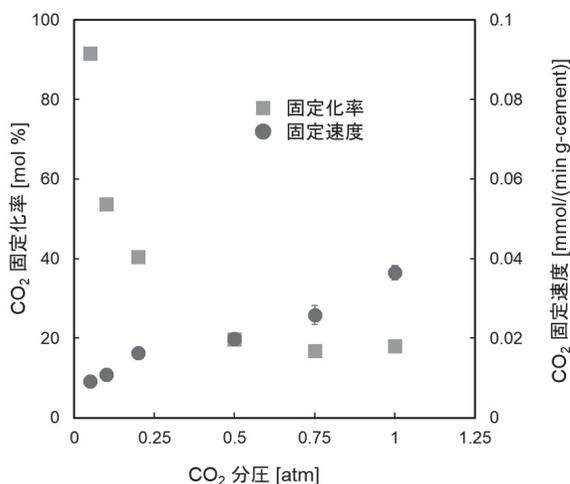


図7 CO<sub>2</sub>分圧とCO<sub>2</sub>固定化率、固定速度の関係。CO<sub>2</sub>流速100 mL/min

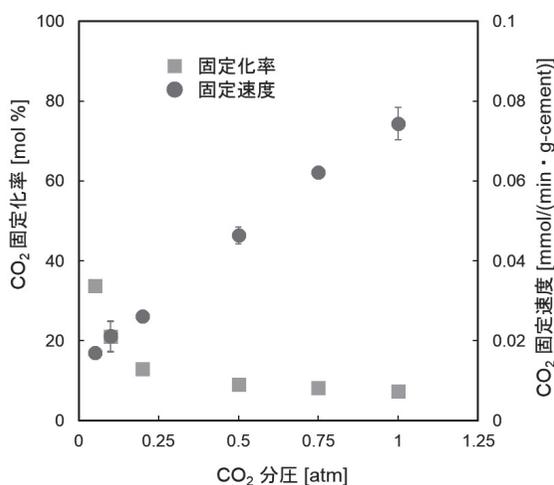


図8 CO<sub>2</sub>分圧とCO<sub>2</sub>固定化率、固定速度の関係。CO<sub>2</sub>流速500 mL/min

その効果が大きくなるためであると考えられる。いずれのCO<sub>2</sub>分圧でもCO<sub>2</sub>流速が大きいほどCO<sub>2</sub>固定化率が低いのは、反応によって固定できる以上の速度でCO<sub>2</sub>が供給されるためであると考えられる。

### 3 実験結果のまとめ

以上の実験結果を表1にまとめた。固液比S/Lが一定の場合CO<sub>2</sub>固定化率は、CO<sub>2</sub>バブリング時間、CO<sub>2</sub>流速、CO<sub>2</sub>分圧が大きいほど低くなった。これは、仕込みカルシウム量が一定の場合に、CO<sub>2</sub>の供給量が大きいほど固定されるCO<sub>2</sub>の割合が小さくなるためである。ただし他の条件が同一でS/L比が大きくなるとCO<sub>2</sub>固定化率は上昇した。一方、CO<sub>2</sub>固定速度は、CO<sub>2</sub>流速やCO<sub>2</sub>分圧が高いほど高くなったが、S/L比にはほとんど依存しなかった。これは、固定速度がCO<sub>2</sub>の物質移動、つまり溶解速度によって決まり、溶解速度はCO<sub>2</sub>流速やCO<sub>2</sub>分圧が高いほど大きくなるためであると考えられる。

表2に示すように実験で得られた範囲内で最大のCO<sub>2</sub>固定化率は91.5%であり、これは、CO<sub>2</sub>分圧が0.05 atm、S/L比が0.05、CO<sub>2</sub>流速が100 mL/min、バブリング時間60 minの場合であった。この場合、CO<sub>2</sub>固定速度は0.0092 mmol/(min·g)であり、この場合セメント中のカルシウムが炭酸カルシウム変化した割合(転化率)は4.76%であった。一方、最大のCO<sub>2</sub>固定速度は0.085 mmol/(min·g)であり、CO<sub>2</sub>分圧が1.0 atm、S/L比が0.0075あるいは0.025、CO<sub>2</sub>流速が300 mL/min、バブリング時間が60分の場合であった。この場合のCO<sub>2</sub>固定化率は2.2および7.2% (それぞれS/L比が0.0075 および0.025)であった。また、カルシウム転化率は、43.8%あるいは43.9% (それぞれS/L比が0.0075 および0.025)となった。

表1 実験結果のまとめ

操作条件	試験範囲	CO <sub>2</sub> 固定化率 との相関	CO <sub>2</sub> 固定速度 との相関
S/L 比	0.005-0.05	正	影響なし
CO <sub>2</sub> バブリング時間	60-480 min	負	負
CO <sub>2</sub> 流速	100-500 mL/min	負	正
CO <sub>2</sub> 分圧	0.05-1.0 atm	負	正

表2 最大の固定化率、固定速度の条件

操作条件	試験範囲	最大固定化率 (%)	最大固定速度 mmol/(min·g)
S/L 比	0.005-0.05	9.1%@0.05	<b>0.085@0.025, 0.0075</b>
バブリング時間(min)	60-480	9.6%@60 min	0.055@60 min
CO <sub>2</sub> 流速 (mL/min)	100-500	18.0%@100 mL/min	0.074@500 mL/min
CO <sub>2</sub> 分圧 (atm)			
100 mL/min	0.05-1.0	<b>91.5%@0.05 atm</b>	0.036@1 atm
500 mL/min	0.05-1.0	33.8%@0.05 atm	0.074@1 atm

## V. 結論と今後の展望

様々な条件下でのモデルコンクリートスラッジに対するCO<sub>2</sub>バブリングによる炭酸塩化固定実験を行った。CO<sub>2</sub>固定化率はCO<sub>2</sub>バブリング時間、CO<sub>2</sub>流速、CO<sub>2</sub>分圧が高いほど低くなったのに対し、CO<sub>2</sub>固定速度はCO<sub>2</sub>流速、CO<sub>2</sub>分圧が高いほど高くなった。実験を行った範囲内での最大CO<sub>2</sub>固定化率は91.5% (CO<sub>2</sub>固定速度 0.0092 mmol/(min·g-cement)) であり、最大のCO<sub>2</sub>固定速度は0.085 mmol/(min·g) (CO<sub>2</sub>固定化率2.2あるいは7.2%) であった。生成物は炭酸カルシウム (カルサイト) であった。

### 利益相反について

本論文に関して、開示すべき利益相反関連事項はない。

### 引用文献

- (1) <https://www.zennama.or.jp/3-toukei/gaiyou/index.html>, 2020年9月30日アクセス
- (2) 佐々木猛 2021年「コンクリートスラッジを利用した二酸化炭素の鉱物化と環境浄化材の製造」化学工学 85巻3号:192-196.
- (3) A. Iizuka, A. Yamasaki, M. Honma, Y. Hayakawa, Y. Yanagisawa. 2012. "Aqueous Mineral Carbonation Process via Concrete Sludge." *Kagaku Kougaku Ronbunshu*, 38:129-134.
- (4) A. Iizuka, A. Yamasaki, M. Honma, Y. Hayakawa, Y. Yanagisawa. 2012. "Bench-Scale Operation of a Concrete Sludge Recycling Plant." *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51:6099-6104.
- (5) A. Iizuka, M. Honma, Y. Hayakawa, Y. Yanagisawa, A. Yamasaki. 2017. "Pilot-Scale Operation of a Concrete Sludge Recycling Plant and Simultaneous Production of Calcium Carbonate." *Chemical Engineering Communications*, 204:79-85.
- (6) T. Chen, X. Gao, L. Qin. 2019. "Mathematical modeling of accelerated carbonation curing of Portland cement paste at early age." *Cement Concrete Research*, 120:187-197.
- (7) B.J. Zhan, D.X. Xuan, C.S. Poon, C.J. Shi. 2019. "Mechanism for rapid hardening of cement pastes under coupled CO<sub>2</sub>-water curing regime." *Cement and Concrete Composites*, 97:78-88.
- (8) J.G. Speight. 2005. *Lange's Handbook of Chemistry, 16th ed.*, McGraw-Hill, New York.
- (9) [https://www.newlime.jp/?page\\_id=1134](https://www.newlime.jp/?page_id=1134), 2022年9月30日 アクセス
- (10) 畑中重光、鈴木一雄 1996年「資源の有効利用とコンクリート」コンクリート工学 34巻8号:49-58.
- (11) R.A. Hites. 2012. *Elements of Environmental Chemistry, 2nd ed.* Wiley.
- (12) L. Brečević, A. E. Nielsen. 1989. "Solubility of amorphous calcium carbonate." *Journal of Crystal Growth*, 98:504-510.