

# 「カルシウムカーボネートコンクリート (CCC)」が創造する 資源循環の将来像

のぐち たかふみ  
 東京大学 大学院工学系研究科 建築学専攻 教授 野口 貴文

## 1. コンクリートの資源循環の現状

コンクリートは、集合住宅・学校などの建築物だけでなく、道路・橋・ダム・堤防などの土木構造物を含め、我々が安全に安心して日常生活・経済活動を営むための社会資本整備に必要不可欠な建設材料であることは疑う余地もない。日本では、高度経済成長期以降、大量のコンクリートが生産され、全国で多くのコンクリート構造物が建設されてきた。

図-1に示すように、2017年度における日本の総物質投入量は15.9億トンであるが、その12%に当たる約1.93億トン（約0.837億m<sup>3</sup>、コンクリートの気乾単位容積質量を2.3t/m<sup>3</sup>と仮定）の生コンクリート（コンクリート製品除く）が生産されており、他の建設材料である鋼材・木材と比較してもかなり多いことがわかる。ピーク

時の1990年度には、全産業に投入された物質23.55億トンの約20%に相当する約4.55億トン（約1.98億m<sup>3</sup>）もの生コンクリートが生産された。

近年は、東日本大震災の復興事業や東京オリンピック・パラリンピック関連施設の整備において、大量のコンクリートが生産・利用された。コンクリートが水に次いで使用量の多い物質であると言われる所以であり、これは世界共通の事実である。

現在、世界全体で排出されている二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）量の約7%がセメントの生産に起因するものであると言われている<sup>6)</sup>。日本では、ポルトランドセメント1トンを生産するのに約760kgのCO<sub>2</sub>が排出されており、その内訳は、原料である石灰石（CaCO<sub>3</sub>）・粘土などを1,450℃で焼成するためのエネルギーに由来するものが約280kg、石灰石の加熱分解（化学反応式：CaCO<sub>3</sub> → CaO + CO<sub>2</sub>）で発生するものが約480kgである<sup>7)</sup>。

今後、発展途上国における社会資本整備の拡大に伴って、世界全体でのセメントの生産量は図-2に示すようにさらに増大することが予想されており<sup>6)</sup>、コンクリート生産におけるCO<sub>2</sub>排出量の削減は、2050年カーボンニュートラル化を実現するための世界共通の必須課題となっている。

日本におけるコンクリートに関する資源循環（CO<sub>2</sub>を含む）の現状（取

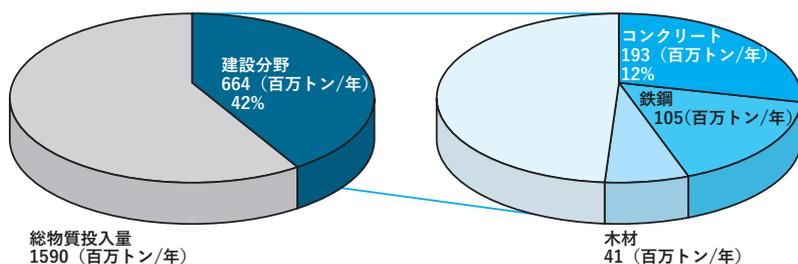


図-1 日本の物質投入量 (2017年) 文献1)~5)を基に作成

得可能な統計値の関係で2016年度の値)を図-3に示す。コンクリートの年間生産量は3.25億トンであり、人口1人当たり2.6トン(1.13m<sup>3</sup>)と、既に欧米先進諸国と同等レベルになっている。

したがって、セメント・コンクリート分野において革新的技術が開発され、それへの移行がなされない限り、コンクリートの資源循環構造は今後もこのまま継続すると考えられる。すなわち、セメントの生産に伴って毎年4,300万トンものCO<sub>2</sub>が排出され続けることとなり、そのカーボンニュートラル化は我が国の喫緊の課題といえる。

## 2. 研究開発の経緯

2018年6月、総合科学技術・イノベーション

会議(CSTI)において、日本発の破壊的イノベーションの創出を目指して、ムーンショット型研究(従来技術の延長ではなく、より大胆な発想に基づく挑戦的な研究)の必要性が提言された。

「人々の幸福(Human Well-being)」の実現を目指し、将来の社会課題を解決するために、人々の幸福で豊かな暮らしの基盤となる表-1の3つの領域から、現在、表-2に示す具体的な9つの目標が定められ、ムーンショット型研究開発事業が進められつつある<sup>12)</sup>。

これら9つの目標のうち、目標4は、図-4に示すように、地球環境再生のために、持続可能な資源循環の実現による地球温暖化問題の解決(Cool Earth)と環境汚染問題の解決(Clean Earth)を目指すものであり、Cool Earthは、温室効果ガスであるCO<sub>2</sub>を大量に排出し、石灰石

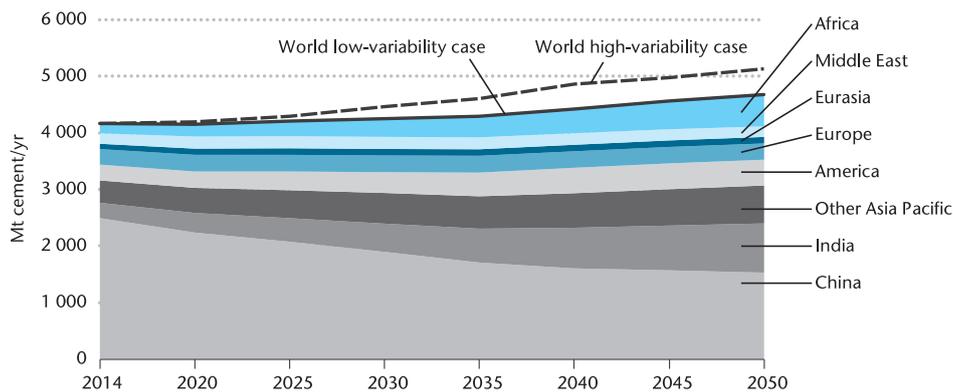


図-2 世界全体のセメント生産量の将来予測<sup>6)</sup>

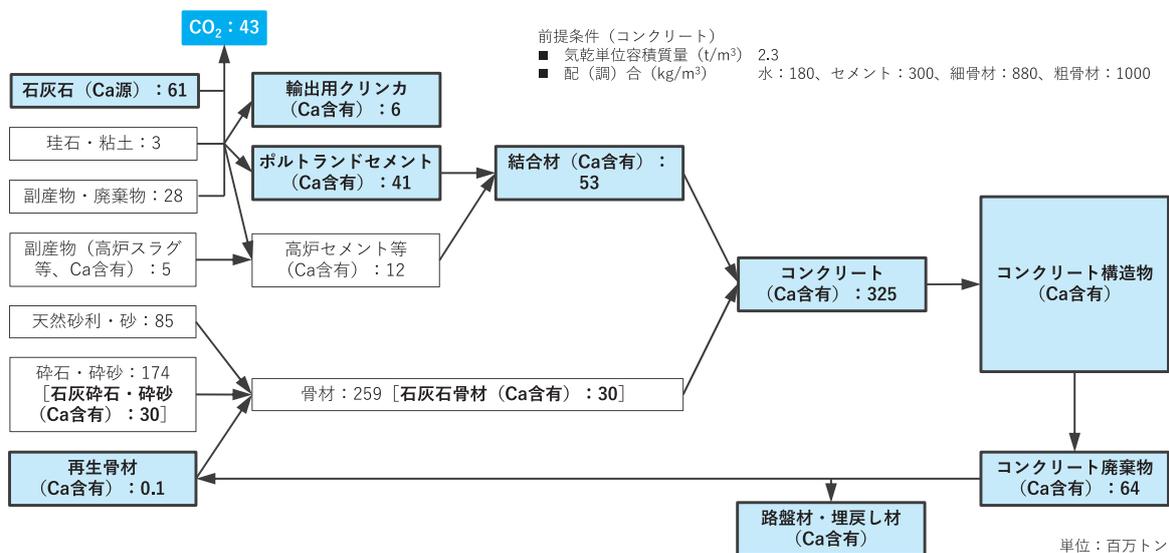


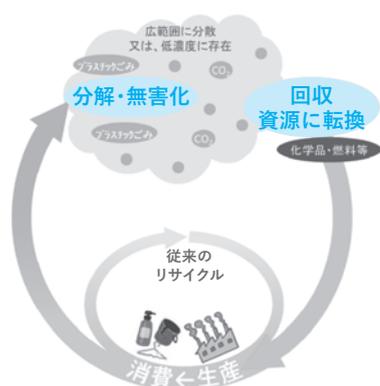
図-3 コンクリートに関する日本の資源循環の現状(2016年度) 文献7~11)を基に作成

表－1 ムーンショット目標の領域

1	社会	急進的イノベーションで少子高齢化時代を切り拓く。 [課題：少子高齢化、労働人口減少等]
2	環境	地球環境を回復させながら都市文明を発展させる。 [課題：地球温暖化、海洋プラスチック、資源の枯渇、環境保全と食料生産の両立等]
3	経済	サイエンスとテクノロジーでフロンティアを開拓する。 [課題：Society 5.0 実現のための計算需要増大、人類の活動領域拡大等]

表－2 具体的なムーンショット目標

1	2050年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現
2	2050年までに、超早期に疾患の予測・予防をすることができる社会を実現
3	2050年までに、AIとロボットの共進化により、自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現
4	2050年までに、地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現
5	2050年までに、未利用の生物機能等のフル活用により、地球規模でムリ・ムダのない持続的な食料供給産業を創出
6	2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性汎用量子コンピュータを実現
7	2040年までに、主要な疾患を予防・克服し100歳まで健康不安なく人生を楽しむための持続可能な医療・介護システムを実現
8	2050年までに、激甚化しつつある台風や豪雨を制御し極端風水害の脅威から解放された安全安心な社会を実現
9	2050年までに、こころの安らぎや活力を増大することで、精神的に豊かで躍動的な社会を実現



図－4 実現すべき持続可能な資源循環<sup>12)</sup>

資源・骨材資源を大量に消費してきたセメント・コンクリート分野が目指す方向性と深く関係している。

Cool Earthでは、2030年までに、温室効果ガスに係る循環技術を開発し、ライフサイクルアセ

スメント（LCA）の観点からも有効であることをパイロット規模で確認すること、そして、2050年までに、資源循環技術を用いた商業規模のプラントや製品を世界的に普及させることが求められている。すなわち、CO<sub>2</sub>を環境負荷物質ではなく資源として捉え、排ガスや大気中から回収したCO<sub>2</sub>を原料として燃料・化学品・建築資材などを生産し利用していくことで、CO<sub>2</sub>の資源循環を実現する必要がある。

一方、東京大学では、将来、高度経済成長期以降に建設された建造物の解体・更新に伴って、コンクリート廃棄物が増大するだけでなく、ポルトランドセメントの主要原料である石灰石資源が枯渇することに鑑み、1990年代より、完全リサイクルコンクリートの研究開発が進められてきた。

まず、1990年代前半には、セメント回収型完全リサイクルコンクリート（コンクリート廃棄物の全量を再生セメントの主要原料として利用できるコンクリート）のプロトタイプが開発され<sup>13)</sup>、1990年代終盤には、成分調整不要のセメント回収型完全リサイクルコンクリート（コンクリート廃棄物のみを原料として、再生セメントを生産できるコンクリート）が開発された<sup>14)</sup>。

その後、骨材回収型完全リサイクルコンクリート（コンクリート廃棄物をセメント硬化体と骨材とに完全に分離でき、それぞれを再生セメントの原料および再生骨材として利用できるコンクリート）の開発が進められ<sup>15)</sup>、2010年前後に、電磁波による完全リサイクル化を可能とする骨材回収型完全リサイクルコンクリートが開発された<sup>16)</sup>。

そのような状況下、2020年、先述のムーンショット型研究開発事業の目標4に対する研究開発公募が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）からなされ、DAC（Direct Air Capture、大気中からのCO<sub>2</sub>の直接回収）に関わる研究開発に混じって、筆者をPM（プロジェクトマネージャー）とする「C<sup>4</sup>S研究開発プロジェクト」（C<sup>4</sup>S：Calcium Carbonate Circulation System for Construction、建設分野の炭酸カルシウム循環システム）が唯一建設分野

に関わるものとして採択され、研究開発が開始された<sup>17)</sup>。

C<sup>4</sup>Sでは、コンクリート構造物中のカルシウム(Ca)をCO<sub>2</sub>吸収源とみなし、構造物の解体によって発生するコンクリート廃棄物中のCaと大気中のCO<sub>2</sub>(工場排ガス中の高濃度CO<sub>2</sub>でも可)とを結合させて、炭酸カルシウムコンクリート(CCC: Calcium Carbonate Concrete)として再生する技術を開発し、CCCを従来のセメント・コンクリートに替わる主要な建設材料として実用化することで、図-5に示すようなクローズドループの資源循環を実現することを目標としている。

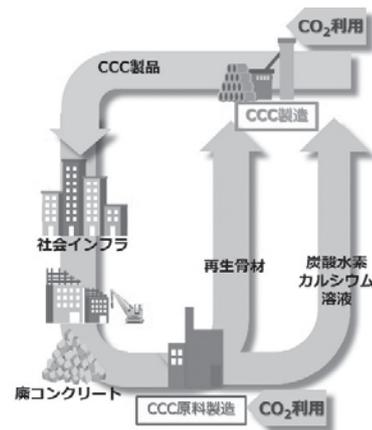


図-5 C<sup>4</sup>Sにおける資源循環

### 3. CCCの製造原理とCO<sub>2</sub>削減効果

CCCの製造手法の概要を図-6に示す。まず、コンクリート廃棄物を破砕して再生骨材と微粉末(主成分:セメント硬化体)とに分別し、どちらも完全に炭酸化(化学反応式:CaO+CO<sub>2</sub>→CaCO<sub>3</sub>)させる。次に、炭酸化させた微粉末を水中に投入した後に、水中にCO<sub>2</sub>を吹き込んで炭酸水素カルシウム(Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>)水溶液とする(化学反応式:CaCO<sub>3</sub>+H<sub>2</sub>O+CO<sub>2</sub>→Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>)。

そして、容器に詰めた再生骨材粒子間に炭酸水素カルシウム水溶液を通水し、水分蒸発、温度変化、pH変化など、炭酸カルシウムの溶解度を低下させる操作を施すことで、再生骨材粒子間に炭酸カルシウムの微細な結晶を析出させる<sup>18)</sup>。これにより、再生骨材がつなぎ合わされて写真-1に示すような硬化体となる。

これまでに得られている圧縮強度は、直径10mmの円柱体で15MPa、直径50mmの円柱体で4MPaであり、2022年末までには建築基準法で求められる12MPaを直径100mmの円柱体で実現すべく、現在、製造プロセスの改善が試みられている。

一方、従来のコンクリートをCCCに置換することによるCO<sub>2</sub>削減量に関しては、図-7に示すように、CCCを1m<sup>3</sup>製造すると、コンクリート廃棄

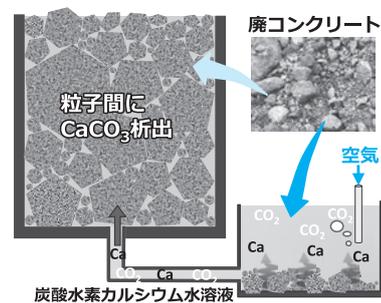


図-6 CCCの製造手法の概要

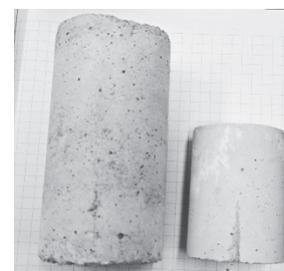


写真-1 CCC硬化体(左:直径50mm)

物中のCaの炭酸化反応によって124kgのCO<sub>2</sub>が固定され、CCCの原料(コンクリート廃棄物)およびCCC製品の製造・運搬に伴うCO<sub>2</sub>排出量を加算しても、トータルで▲73kg/m<sup>3</sup>のカーボンマイナスになる。すなわち、従来のコンクリートをCCCに置換することで、▲331kg/m<sup>3</sup>のCO<sub>2</sub>削減効果が見込める。また、CCC構造物を解体してCCCをリサイクルする場合にも、排出されるCO<sub>2</sub>量は51kg/m<sup>3</sup>と非常に少量であると想定される。

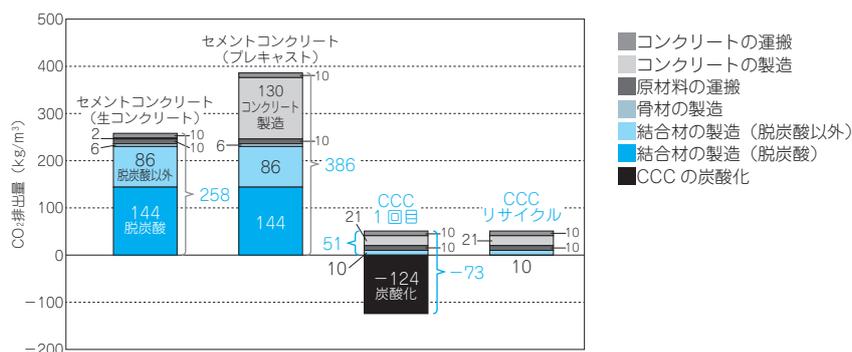


図-7 CCCによるCO<sub>2</sub>削減・固定量

#### 4. 技術的・制度的課題

従来のコンクリートと同じように工事現場で型枠を組んでCCCを施工する方法も検討に値するが、前述の製造原理から容易に想像できるように、CCCは、工場製品として製造された後に工事現場に運搬され、組み立てられて構造物となる可能性が高い。CCCの実用化に向けては、今後、従来のコンクリートと同等レベルの圧縮強度（たとえば30MPa）を有し、構造部材として機能する寸法（たとえば直径60cmの円柱）を有するCCC部材を短時間（たとえば1日）で製造できる手法の確立が必要となる。

構造形式については、従来の鉄筋コンクリート構造よりも、プレストレスト構造やコンクリート充填鋼管（CFT）構造などの方が、柱・梁接合部の接合方法を考慮すると、適しているかもしれない。または、CCCに適した全く新しい構造形式が必要となるかもしれない。また、CCCはアルカリ性ではないため、鋼材の腐食が懸念されることから、補強材やプレストレスト構造で用いる緊張材には、繊維強化プラスチック（FRP）製のロッドが必要となるであろう。

また、CCCは、従来のコンクリートとは全く異なる構造材料であることから、CCCを広く国内外で普及させるには、CCCの製造方法、およびCCC構造物の設計方法・施工方法・維持管理方法に対する指針・標準仕様書などの制定が必要となる。

さらに、CCCを建築物の主要構造部に適用す

る場合には、建築基準法に対して、解釈（CCCはコンクリートか否か）を含めた適法化の検討が必須となる。たとえば、建築物の主要構造部に用いられる構造材料としてCCCを普及させるために必要となる様々な法規格・規準類の制定・改正プロセスは以下のようにになると想定される。

- ① 建築基準法第20条に基づく大臣認定取得
- ② 日本建築学会設計規準・工事標準仕様書制定
- ③ 建設省告示1446号(技術的基準)別表第二(品質基準及びその測定方法等)改正
- ④ 建築基準法第37条2号に基づく大臣認定取得
- ⑤ 日本産業規格(JIS)制定
- ⑥ 建設省告示1446号(技術的基準)別表第一(法第37条第一号の日本産業規格又は日本農林規格)改正
- ⑦ 建築基準法第37条1号への適合

#### 5. 今後の展望と新たな資源循環像

将来、CCCが従来のセメント・コンクリートに完全に置き換わっていくとすると、コンクリートに関する資源循環は図-8のようになると予想される。すなわち、構造物の解体に伴って毎年発生するコンクリート廃棄物がCO<sub>2</sub>の吸収源となり、その全量を原料として用いてCCCを生産することにより、国内で毎年2,040万トンのCO<sub>2</sub>が吸収・固定されることとなる。そして、現在までにセメント生産時の石灰石の脱炭酸によって大気に放出されたCO<sub>2</sub>の全量（日本全体で約20億トン、世界全体で約550億トン<sup>19)</sup>）が回収され、CCCとし

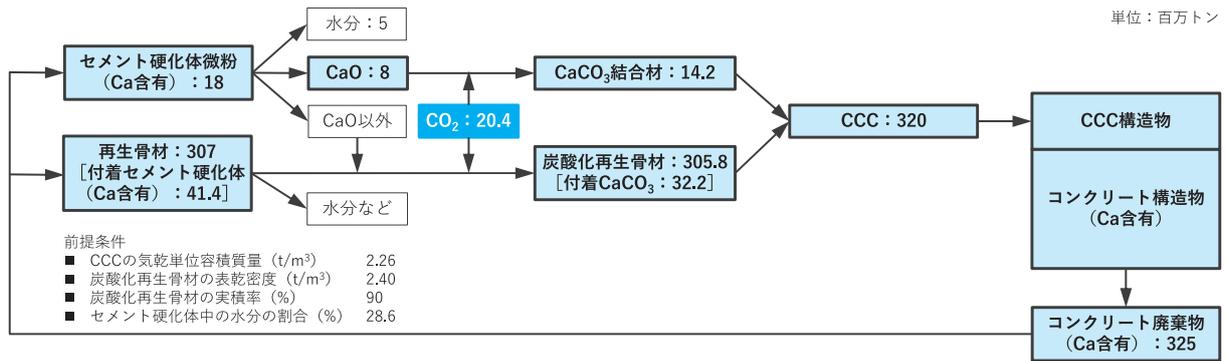


図-8 全コンクリート構造物がCCC構造物に置換されていく場合の日本の資源循環

て固定される。その後、CCCは省エネルギーで何回でも繰り返し再生利用される。すなわち、CCCは人新世以降にセメント・コンクリートが引き起こした環境影響の時計の針を巻き戻し、コンクリートはそれ以降カーボンニュートラルな建設材料へと転換する。

「数億年前の太古にCO<sub>2</sub>が固定されてヒマラヤ山脈やアルプス山脈が盛り上がり、生物が生きていけるCool Earthになった。『C<sup>4</sup>S研究開発プロジェクト』は、これを現代文明社会で再現して再び地球を救おうという壮大なプロジェクトである。」という大きな期待が寄せられており、それに何としても応えなければならない。

【参考文献】

- 1) 環境省：令和2年版 環境・循環型社会・生物多様性白書，2020
- 2) 一般社団法人産業環境管理協会：リサイクルデータブック 2019，2019
- 3) 全国生コンクリート工業組合連合会：出荷実績の推移，<https://www.zennama.or.jp/3-toukei/nenji/pdf/suii.pdf> (参照 2022年1月31日)
- 4) 一般社団法人日本鉄鋼連盟：生産統計 / 時系列，<https://www.jisfor.jp/data/jikeiretsu/seisan.html> (参照 2022年1月31日)
- 5) 林野庁：平成30年度 森林・林業白書，2019
- 6) International Energy Agency and Cement Sustainability Initiative：Technology Roadmap Low-Carbon Transition in the Cement Industry，2018
- 7) 一般社団法人セメント協会：セメントの LCI データの概要，2021
- 8) 石灰石鉱業協会 調査部：石灰石の生産・出荷推移，2021

- 9) 経済産業省 製造産業局 素材産業課：平成29年度 総合骨材需給表（試算），2020
- 10) 一般社団法人セメント協会：2016年会計年度 都道府県別種類別販売高，[https://www.jcassoc.or.jp/cement/3pdf/jh3\\_1600\\_d.pdf](https://www.jcassoc.or.jp/cement/3pdf/jh3_1600_d.pdf) (参照 2022年1月31日)
- 11) 一般社団法人セメント協会：生産高（会計年），[https://www.jcassoc.or.jp/cement/3pdf/jh2\\_1100.pdf](https://www.jcassoc.or.jp/cement/3pdf/jh2_1100.pdf) (参照 2022年1月31日)
- 12) 内閣府：ムーンショット目標4，<https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/sub4.html> (参照 2022年1月31日)
- 13) 友澤史紀，野口貴文，横田紀男，本田優，高橋茂：完全リサイクルコンクリート（エココンクリート）の研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，Vol.A，pp.341-342，1994
- 14) 田村雅紀，友澤史紀，野口貴文，五十畑達夫：成分調整不要型完全リサイクルコンクリート開発への一考察，セメント・コンクリート論文集，No.52，pp.1024-1029，1998
- 15) 田村雅紀，友澤史紀，野口貴文，呉相均：骨材回収型完全リサイクルコンクリートの基礎物性と再生骨材の品質，セメント・コンクリート論文集，No.53，pp.906-911，1999
- 16) 辻埜真人，野口貴文，北垣亮馬，長井宏憲：マイクロ波加熱を利用した骨材回収型完全リサイクルコンクリートに関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.660，pp.223-229，2011
- 17) NEDO：ムーンショット型研究開発事業，[https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP\\_100161.html](https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100161.html) (参照 2022年1月31日)
- 18) Ippei Maruyama et al.：A New Concept of Calcium Carbonate Concrete using Demolished Concrete and CO<sub>2</sub>，Journal of Advanced Concrete Technology，Vol.19，pp.1052-1060，2021
- 19) 野口貴文ほか：ムーンショット目標4に貢献する「C<sup>4</sup>S研究開発プロジェクト」の概要，日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工，pp.381-382，2021