

コンクリートの新技術

New Technologies in Concrete

三橋 博三*1

1. はじめに

石油、石炭、天然ガスなどの化石燃料は、産業革命以降、人類の経済発展を支えてきた。しかしながらその一方で、大量消費が続けばそれらの資源は急速に減少して枯渇することが予測されるばかりではなく、大量のCO₂が排出されて地球温暖化の原因となり、深刻な問題となっている。振り返って見ると、1980年代前半頃からサステナビリティ (sustainability、持続可能性) という言葉が注目されるようになった。即ち、化石燃料に限らず天然鉱物を含む化石資源の枯渇を回避することが注目され始めた。社会・経済の発展には様々な開発が必要だが、将来の世代が自らのニーズを満たす能力を損なうことなく、現在のニーズを満たす開発が求められるようになったと言える。2015年にはSDGs (Sustainable Development Goals、持続可能な開発計画) が国連で採択された。

地球温暖化のリスクが一般に認知されるようになったのは1980年代末だが、温暖化ガスの排出がその原因であることは疑う余地のない事とのコンセンサスを得て、温暖化対策の必要性が広く認識されるようになったのは2000年頃からである。気候変動に関する国際条約を話し合うために1995年に始まったCOP (Conference of the Parties、締結国会議) は、その後ほぼ毎年開催され、京都議定書 (1997年) やその後継となるパリ協定 (2015年) の採択を経て、「世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて2℃より十分低く保ち、1.5℃に抑える努力をすること」という長期目標が示された。この目標を達成すべく、世界各国が温室効果ガス排出量削減目標を設定している。日本政府は、中期的目標として温室効果ガスの排出量を2030年度までに2013年度比で46.0%削減

すると共に、長期的目標としては2050年までに温室効果ガスの排出実質ゼロ (即ち、カーボンニュートラル) を目指すとしている。

この政府提案の目標達成のために、2020年に「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン戦略」が策定され、コンクリート関連項目としては、コンクリートへのCO₂固定技術やCO₂排出削減技術の普及拡大の目標などが示された¹⁾。このグリーン成長戦略を推進するために、(国研) 新エネルギー産業技術総合開発機構 (NEDO) にグリーンイノベーション基金が創設され、その基金事業として様々な技術開発が試みられている。コンクリート分野では、2010年代半ば頃から、民間プロジェクトにCO₂排出削減と高品質を両立する環境配慮型 (あるいは、低炭素型とも呼ぶ) コンクリートが適用されている²⁾。

本稿では、上述のような時代背景を踏まえつつ開発されている新しい時代のコンクリート材料を創出するものとして注目されている新技術について、それらの概要・現況・今後の課題や将来展望について述べる。

2. 環境配慮型コンクリート

コンクリート材料の製造時に排出するCO₂の大半は、その主要材料であるセメントの製造過程に起因している。即ち、このセメントの主原料である石灰石 (CaCO₃) を高温で焼成する過程で大量のCO₂が発生する。そこで、コンクリート製造に使用するセメントの量を減らしたり、コンクリート内にCO₂を吸収するなどして固定することにより、コンクリート製造時のCO₂排出量をトータルとして削減する取り組みが活発に行われている。このようなコンクリートは、「環境配慮型コンクリート」³⁾あるいは

*1 MIHASHI Hirozo : 東北大学 名誉教授 工学博士

表-1 環境配慮型コンクリートを創り出す要素技術の分類
(文献⁵⁾を参考にして作成)

要素技術のタイプ	技術の概要	例
①セメントを置換	セメントの一部あるいは全部を、産業副産物である高炉スラグ微粉末やフライアッシュ、あるいは「再生セメント」に置き換えてCO ₂ の排出量を低減	ECM (米澤 ⁶⁾)、クリーンクリート (小林 ⁷⁾)、T-eConcrete (大脇 ⁸⁾)、サステインクリート (松田 ⁹⁾)、CELBIC (古川 ⁹⁾)
②骨材や粉体にCO ₂ を固定化して練り混ぜ	コンクリートスラッジにCO ₂ を反応させて炭酸カルシウム(CaCO ₃)の微粉末や骨材を製造し、それらを材料としてコンクリート内に練り混ぜてCO ₂ を固定化	軽質炭酸カルシウム微粉末 (佐々木 ¹⁰⁾)、その他の各種CCU骨材 ¹¹ ・CCU粉体 ¹¹⁾ の利活用
③コンクリート製造時あるいは養生時に直接CO ₂ を吸収	コンクリートの製造時や養生時に高濃度のCO ₂ を吹きかけてコンクリート中にCO ₂ を吸収させ、CaCO ₃ として固定化	CO ₂ と反応する特殊な混和材を用いたCO ₂ 吸収コンクリート (取違 ¹²⁾)、T-Carbon Mixing (松本 ¹³⁾)

*1: ここに、CCU骨材とは Carbon Capture and Utilization を施した骨材の略称で、排ガスあるいは大気中のCO₂を分離・回収して骨材中に固定し、利活用する技術のこと。

「低炭素コンクリート」⁴⁾等と呼ばれている。環境配慮型コンクリートは、CO₂を削減あるいは吸収する形態などから、表-1に示す3タイプに分類される⁵⁾。

2.1 コンクリート中のセメントを産業副産物などで置換する技術

京都議定書が発効された2008年に、コンクリートのCO₂排出量の削減を狙ったNEDOプロジェクトとして、Energy CO₂ Minimum (略称、ECM) セメント・コンクリートシステムの研究が始まった⁶⁾。ECMコンクリートは、普通ポルトランドセメントの使用量を削減するためにCO₂排出原単位が小さい高炉スラグ微粉末でセメント量の60~70%を置き換えることで、コンクリートのCO₂排出量を60~70%削減しようとするものである⁶⁾。その後開発されたクリーンクリート⁷⁾、T-eConcrete⁸⁾、サステインクリート⁹⁾では、CO₂排出量の少ない高炉ス

ラグ微粉末の他にもフライアッシュ、シリカフェームを混和材として用いている。例えばクリーンクリートでは、セメントを30%以下で高炉スラグ微粉末を70%以上とする調合が最も汎用的なものとしている⁷⁾。また、T-eConcreteのセメント・ゼロ型の標準的な調合では、高炉スラグ微粉末をカルシウム系化合物(刺激剤)で硬化させる例もある⁸⁾。

しかしながら、高炉スラグ微粉末の混入率を60%以上と大きくすると、経時に伴う大きなスランプの低下、初期強度の発現性低下、大きな自己収縮、早い中性化の進行等の様々な問題が起こってくる。また、初期強度発現性や収縮保障のためにある程度の量の石こうを加えるが、一方で耐火性や凍結融解抵抗性の低下にも繋がることから、適切な量とすることが必要である²⁾。これらの問題を解決して初めて、それぞれのコンクリート新材料は「環境配慮型コンクリート」として社会的認知を得られる。更なる普及拡大のためには、生コン工場(供給拠点)の整備なども課題である。

なお、表-1中の「再生セメント」とは、乾燥スラッジ微粉末(DSP)のことである¹⁴⁾。これは、建設副産物の戻りコンクリートから骨材を分離し乾燥・粉碎・分級して製造されたもので、普通セメントの50~60%程度の強度発現性を有する高品質のDSPを得ることができる。通常のセメントのCO₂排出量と比べて約8分の1に低減できる³⁾ことから、環境配慮型コンクリートのセメント代替材料として利用されている。

2.2 骨材や粉体にCO₂を固定化した上でコンクリート中に練り混ぜる技術

コンクリート中には、大小様々な骨材が全体で約70%含まれている。その骨材にCO₂を吸入・固定化できれば大幅なCO₂削減につながることから、種々のCCU材料の技術開発がなされている。佐々木¹⁰⁾は、プレキャストコンクリート工場が発生するコンクリートスラッジに豊富に含まれるカルシウム成分と、蒸気養生に必要なボイラー等から排出されるCO₂ガスとの反応から、軽

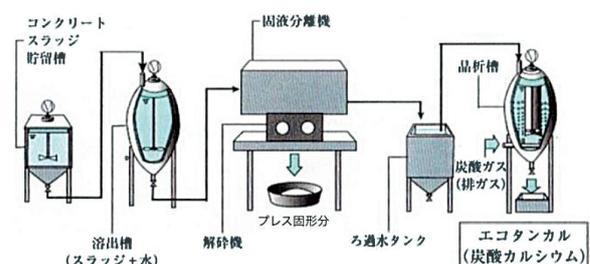


図-1 コンクリートスラッジを用いた炭酸カルシウム製造フロー³⁾

質炭酸カルシウム微粉末を製造する方法を開発した(図-1)。

この微粉末は、コンクリート中へのCO₂固定化に用いられると共に、高流動コンクリートの分離抵抗性向上にも寄与している¹⁵⁾。

2.3 コンクリートに直接CO₂を吸収させる技術

コンクリート養生時に直接CO₂を吸収させるために、特殊な混和材を練り混ぜて成形したコンクリートに養生槽内で高濃度のCO₂を与えることにより、コンクリート中にCO₂を固定化する技術が開発されている¹²⁾。この特殊な混和材 γ -C₂Sは、カルシウムカーバイドからアセチレンを発生させるプロセスで副生する消石灰Ca(OH)₂を原料として製造されるもので、水とは反応せずにCO₂と反応して炭酸カルシウムを生成し、硬化する性質を持っている。

一方、コンクリートの練り混ぜ時にCO₂を噴霧してコンクリート中にCO₂を固定化させる方法も開発されている。その中の一例(T-Carbon Mixing¹³⁾)では、コンクリートの製造を2つのステップに分け、一次練りのモルタルにCO₂の噴霧を行うことで、作業効率を上げている。単位当たりのコンクリートへのCO₂固定量は近年開発されている他の方法よりも10分の1程度と少ないものの、現場打ちコンクリートへの適用も可能で現場展開が容易な点などの特徴を有している。但し、CO₂を排出しているメーカーから純度の高いCO₂を高額で購入して利用することは、コスト高の要因となるので対策が必要である。

2.4 カーボンネガティブコンクリートの実現と課題

上述の様に、コンクリートの製造に欠かすことができないと考えられてきたセメントに由来するCO₂の排出量削減を狙い、様々な要素技術が開発されてきた。しかしながら、セメントの代替のみでは、目標とする「2050年までにカーボンニュートラル」を実現することは困難である。そこで、一般のコンクリートが排出するCO₂よりも多い量のCO₂を逆に吸収する「カーボンネガティブ」技術の開発が進められている。

例えばCO₂-SUICOMは、一般的な混和材の高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等を併用してセメントの使用量を大幅に低減することに加えて、特殊な混和材 γ -C₂S混入と炭酸化養生によって強制的に大量のCO₂をコンクリート中に吸収・固定化することにより、いち早く「カーボンネガティブ」を実現し、小型の無筋コンクリートブロックを中心に実績を重ねてきた¹⁶⁾。他にも、クリーン

クリートやT-eConcreteに、CO₂を吸収・固定化した炭酸カルシウムを主成分とする粉体を混入したクリーンクリートNやT-eConcrete/Carbon-Recycleも「カーボンネガティブ」を達成している。

更に、2022年にはECMやCO₂-SUICOM開発に関連した企業を含む44企業、11研究機関の全55団体からなる大型コンソーシアムCUCOが結成され、革新的カーボンネガティブコンクリートを社会実装させる目的で、グリーンイノベーション基金事業として技術開発に取り組んでいる¹⁷⁾。特徴的な所は、表-1に示す各要素技術を更に高度化すると共にそれらを複合的に結びつけ、原材料の選定、組成や製造条件の最適化、コストダウン等の課題解決に取り組んでいる点である(図-2)。材料単独では、コスト的にも社会実装が難しくなるので、i-constructionが目指す建設施工現場の省人化等と結び付けた検討¹⁵⁾やPCa構造としての展開¹⁸⁾等も試みられている。

3. ジオポリマーコンクリート

3.1 ジオポリマーとは

コンクリート製造時のCO₂排出削減問題を背景に、セメントを全く使わない新たなタイプの硬化体としてジオポリマー(Geopolymers、以下、GPと略称)の研究も世界的に注目されている。我が国における建設材料としてのGPに関する研究は、特にJCI-GP研究委員会(2015、2016年度)の活動をきっかけに、近年大きく発展してきた¹⁹⁾。GPは、結合材としての活性フィラーにアルカリ刺激剤としてのアルカリ溶液を加えることによって生ずる反応で生成される硬化体である。GPという名称は、1970~1980年代にDavidovits(仏)により提唱された用語で、活性フィラーとして用いられたメタカオリンが水ガラスのアルカリ刺激を受けて縮重合(ポリマー化)した状態を表したものである。その後、強度や耐久性の観点から、メタカオリンやフライアッシュ(以下、FAと略称)等の活性フィラーだけではなく、酸化

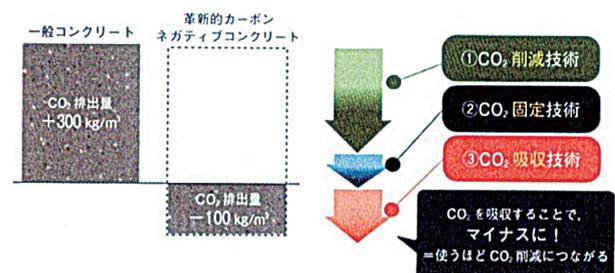


図-2 CUCOの概要¹⁸⁾

カルシウムを多く含む高炉スラグ微粉末（以下、BFSと略称）を併用する等、使用材料も多様化し、反応生成物の観点からは正しくジオポリマーとは呼びにくい状況もあり²⁰⁾、最近ではアルカリ活性材料 (Alkali Activated Materials、以下、AAMと略称) と呼ぶ例が多く見られている²¹⁾。

JCI-GP研究委員会では、出発材料に着目して、GPを以下のように定義している。「セメントクリンカーを使用せず、非晶質のケイ酸アルミニウムを主成分とした原料（活性フィラー）とアルカリ金属のケイ酸塩、炭酸塩、水酸化物の水溶液の少なくとも1種類（アルカリ溶液）を用いて硬化させたもの」¹⁹⁾。また、菊地ら²¹⁾はAAMを簡潔に「SiとAlを主成分とする粉体をアルカリ水溶液で混練りし製造した硬化体」と言い表している。この粉体の代表的なものは、FAである。なお、ジオポリマーに細骨材を加えたものをジオポリマーモルタル、さらに粗骨材を加えたものをジオポリマーコンクリートとし、一般的なコンクリートと同様に強制二軸ミキサなどを用いて練り混ぜることができる²⁰⁾。

3.2 活性フィラーおよびアルカリ溶液の構成材料と特徴

GP（あるいはAAM）の性能は、活性フィラーとアルカリ溶液の種類、品質、構成比などによって大きく異なることが、既往の研究からわかっている²¹⁾。我が国では、活性フィラーの代表的な構成材料としてFAをベースに、その一部をBFSで置換したFA-BFS系に対する研究・開発が一般的である²²⁾。FAの主要成分はSiとAlであるのに対して、BFSはSiやAl成分に加えてCa成分を多く含んでいる。FAのみを使用した場合は低強度であるのに対して、FAとBFSを併用した場合（FA-BFS系）では強度が増大すること、更にそのFA-BFS系では蒸気養生に先立つ常温での前養生の時間を延ばすことで、

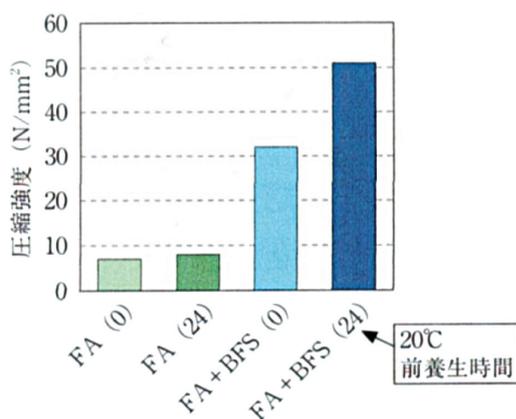


図-3 使用粉体および前養生による強度の変化²¹⁾

強度が顕著に増大することなどが明らかにされている（図-3）²¹⁾。

なお、常温養生と加温養生では反応生成物が異なるために、同様の強度であっても諸性質は異なる場合があるので注意を要する²²⁾。また、BFSの置換率に比例して強度は上昇するが、BFS置換率が20%（容積比）を超えると可使時間が極端に短くなる傾向にあることから、BFSの置換率の目安は10～20%であると言われている²²⁾。

3.3 建設材料としての特徴

GP（あるいは、AAM）は、耐酸性、耐糖性、耐高温性（耐火性）、耐硫酸性、塩分浸透抵抗性に優れているので、従来のセメントモルタルやコンクリートでは劣化が激しく補修を繰り返していた箇所等への適用も試みられている。また、物質移動抵抗性が高いことから、放射性物質等の有害物質を固定するのに適しているなど、大きな特徴を有している²²⁾。一方、クリープ性状や耐疲労性、耐凍害性等に関しては、未だ評価が不十分である²¹⁾。また、粘性が高いことから、一般のコンクリート材料と比べて作業性に劣るともいえるが、この性質を生かした3Dプリンター用材料としての可能性も期待される。

3.4 残された課題

海外では当初は耐火材として利用されていたが、構造部材への適用例も報告されている。一方、我が国においては施工実績の不足や高い材料コストなどから未だ適用例は限られているが、温泉地や酸性環境下の歩車道境界ブロックや下水道施設など、特殊環境下で適用されている²³⁾。また、可使時間の短さや高い粘性を改良するための新たな混和剤の開発、ポンプ圧送施工の技術開発等が取り組まれている²⁰⁾。今後一層の展開が期待される。

4. 自己治癒・自己修復コンクリート

4.1 自己治癒・自己修復を発現する様々な機構

私達の日々の生活環境を支えている社会基盤構造物や建築物は、築後50年を過ぎた頃からその老朽化対策が課題となり、維持管理のための費用が高んでくる。そこで、地球環境の持続可能性の観点からも、このような構造物の長寿命化が、建設分野における研究・技術開発の重要な課題として注目されている。

コンクリートは、圧縮力の作用には強いものの引張力に対しては弱いために、引張抵抗力の強い鋼材で適切に補強して構造材料として用いられている。しかしながら、例えば地震の揺れや乾燥に伴う収縮ひずみ等が原因となり、ひび割れが形成される場合がある。これらは、構造物の安全性に関わる大きなひび割れではなくとも、鋼材

腐食を引き起こす劣化要因の侵入経路を形成する。したがって、コンクリート構造物の長寿命化を実現するためには、ひび割れの発生やそれに伴う劣化の進展を抑える、より適切な材料の選択や補修技術の開発・適用が求められる。

1990年代以降、従来からの補修技術の適用とは異なり、材料自らがひび割れ発生などの異変発生を察知し、材料自身に内在する力で治癒や修復の対応を実行する機能を有する自己治癒・修復材料の開発が、金属、セラミックス、繊維強化高分子材料、コンクリート等の分野で積極的に進められてきた²⁴⁾。2007～2008年の2年間に亘り、日本コンクリート工学会に設けられたセメント系自己修復性の評価とその利用法研究委員会が、現象発生機構に着目して行った自己治癒／修復の分類と用語の定義が、この分野の研究を理解する上で有益である²⁵⁾。表-2に、自己治癒／修復の分類とそれに対応する研究事例を示す。

「治癒 (Healing)」は、セメントの再水和やCaCO₃の析出などによりひび割れが閉塞する現象で、「自然治癒」は元々コンクリートが持っているポテンシャルが発揮されて起こるものである。それに対して、反応生成物の析出がひび割れ空間を充填することを狙って膨張材²⁷⁾やフライアッシュ等の混和材を混入したり、CaCO₃を創り出すバクテリアをコンクリート内に混入しておいたり²⁸⁾、あるいはひび割れ幅拡大を抑制しCaCO₃の析出を助けるために短繊維を混入しておく方法²⁶⁾等によるものを「自律治癒 (Autonomic Healing)」と呼んでいる。更に、これら2種類の「治癒」を包含するものとして、「自己治癒 (Autogeneous Healing)」を定義している²⁵⁾。これに対して「自動修復 (Activated Repairing)」は、小型の装置等をコンクリート部材中にあらかじめ組み込んでおいて、従来の補修・補強に代わる手段によってひび割れを閉塞するものである。その例としては、補修材を充填したパイプのネットワークを巡らしておいたりする方法²⁹⁾等が提案されている。また、ひび割れ幅の拡大を抑えるように、超弾性合金を補強筋として用いる試みも報告されている³⁰⁾。但し、CaCO₃の析出による自己治癒の多くは、ひび割れを閉塞することはできても、強度の回復まで成功した例はごく限られている³¹⁾。勿論、自己治癒によってひび割れを閉塞することで、鉄筋の腐食進行を抑制できることが明らかにされており³²⁾、例え十分な強度回復ができなくとも、構造物の長寿命化には貢献できる。好気性微生物を利用した鋼材腐食抑制技術の開発³³⁾なども取り組まれており、今後の展開が期待される。

表-2 自己治癒／修復の分類とそれに対応する研究事例
(文献²⁵⁾を参考に作成)

	分類	研究事例	治癒	発現の種類
[A]	自然治癒	・低水セメント比による残存未水和セメントの再水和 ・水理構造物に見られるひび割れ内での再水和	治癒	潜在型自己治癒
[B]	自律治癒	・フライアッシュのポゾラン反応を利用 ・短繊維混入によるひび割れの幅抑制と分散制御 (例: ECC ²⁶⁾) ・特殊混和材の利用 (例: 膨張材 ²⁷⁾) ・CaCO ₃ を創り出すバクテリアの利用 (例: basilisk ²⁸⁾)	治癒	設計型自己治癒
[C]	自動修復	・補修材を内包するマイクロカプセルの分散混入による利用 ・補修材を内包するパイプネットワークの利用 (ひび割れ発生の検知をどうするか?: ガラスパイプ, 発熱デバイス ²⁹⁾ , モニタリング技術との融合) ・形状記憶合金や超弾性合金を補強材として利用 ³⁰⁾	修復	設計型自己修復

また、技術の実用化に当たっては、その生産コストと比べて治癒あるいは補修効果が十分かを定量的に評価する必要があり、その評価方法の標準化が求められる³⁴⁾。

4.2 短繊維補強によるひび割れ幅抑制と自己治癒

コンクリート内のひび割れ表面に水が供給されるとCaCO₃が析出し、ひび割れ幅がごく小さい場合にはその析出物で自然に閉塞されることが知られている²⁵⁾。その性質を利用してひび割れを自己治癒するための鍵は、ひび割れ幅をいかに小さく抑えるか、あるいは如何にしてひび割れ内に効率よくCaCO₃を析出させるかにある。引張荷重下では脆性的に破断するモルタルであっても、それに直径数十ミクロン程度の細い合成繊維を容積率で約2%混入すると、引張荷重にも粘り強く抵抗できる材料へと変身させることができる (例えば、ECC²⁶⁾)。この短繊維補強モルタルには、沢山の細いひび割れが発生し、ひび割れを架橋するように細い繊維が連なっている。このひび割れが水で満たされると、CaCO₃が析出して

ひび割れた空間を満たし、やがては閉塞される。注目されるのは、この架橋している繊維が、この CaCO_3 結晶の析出を助ける働きをすることである。繊維の種類や量の影響も見逃せない³¹⁾。

4.3 量産技術が確立された細菌による自己治癒コンクリート

ヨンカース (H.M. Jonkers) 率いるオランダ・デルフト工科大学の研究グループが、2000年代初期に細菌を用いた自己治癒コンクリート技術を開発した²⁴⁾。アルカリ耐性の強い細菌とその餌となるポリ乳酸を内包するカプセルをコンクリート中に分散混入させ、細菌を不活性状態に置いておく。コンクリートのひび割れ発生に伴って浸透してくる水分と酸素に反応して細菌が活性化し、 CaCO_3 結晶を析出させてひび割れを閉塞するという仕組みである。一般に、カプセル状の混和材をコンクリート中に練り混ぜる際には、弱いと壊れること、軽いと浮き上がること、硬化した後も他のコンクリート特性(強度や剛性等)に変化を引き起こすこと、などを避けなければならない。加えて、数十年後にひび割れが起こった時には、不活性状態にあった細菌がタイムリーに活動を開始する必要がある。様々な試みを経て、最初ヨーロッパで商品化されたバジリスクは、製造工程が複雑で大量生産には不向きであった。その後、會澤高圧コンクリートおよびアイザワ技術研究所との共同研究により、カプセルの粉末化と量産化が実現して、我が国に於いても様々なところで利用されるようになった²⁸⁾。ひび割れに水分が供給される環境であることと強度回復ではないことに注意が必要ではあるが、コンクリート構造物の長寿命化に繋がる技術として期待されている。

5. その他の動向

5.1 再生骨材の品質改善による利用促進の試み

建設廃棄物の中で、排出量が最も多い割合を占めているのはコンクリート塊である。そのリサイクル率は98%と高いものの、その殆どが再生路盤材や埋め立て用であり、2000年代初頭になってコンクリートへの再利用促進のために再生骨材H、M、Lとその品質に応じて3段階にJIS化された。しかしながら、品質向上のためには製造コストが高み、実用性や環境負荷の点からも未だその普及拡大には繋がっていない。そこで伊代田ら³⁵⁾は、製造コストが低く、エネルギー消費量や副産微粉末発生量が少なくすむ低品質の再生骨材に CO_2 ガスを吹き付けて炭酸化し、再生骨材の品質を改善する技術開発に

取り組んでいる。改質再生骨材の強度増大、乾燥収縮低減、凍結融解抵抗性などの耐久性向上が一連の実験によって確認されている。低品質の再生骨材には、より多くのセメント硬化体が付着しており、そのことが明確な品質改善効果に繋がっているものと考えられる。

5.2 完全循環を目指すムーンショットプロジェクト：CCC

2018年6月、内閣府の総合科学技術・イノベーション会議において、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(ムーンショット型研究)の必要性が提言された。3つの領域に関わる9つの目標が定められ、研究開発事業が進められている。その中の4番目の目標は、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することで、2020年にNEDOから公募に付された。そこで、野口ら³⁶⁾の「 C^4S 研究開発プロジェクト」(Calcium Carbonate Circulation System for Construction, 建設分野の炭酸カルシウム循環システム)が採択され、研究開発が開始された。ここでは、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_2 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、このCCCを従来のセメント・コンクリートに代わる主要な建設材料として実用化することで、資源循環を実現することを目標としている³⁶⁾。

CCCの製造原理は、図-4の通りである。コンクリート廃棄物を破砕して再生骨材粒子とセメント硬化体を主成分とする微粉末とに分別し、どちらも完全に炭酸化させる。次に、炭酸化した微粉末を水中に投入した後に、その中へ CO_2 ガスを吹き込んで炭酸水素カルシウム水溶液とする。更に、容器に詰めた再生骨材粒子の間にこの炭酸水素カルシウム水溶液を加圧通水した後、炭酸カ

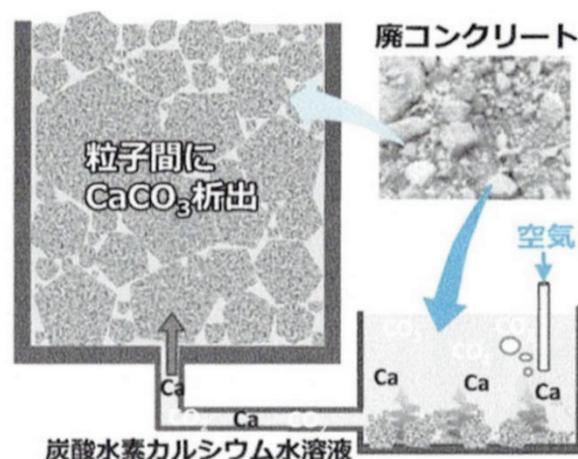


図-4 CCCの製造手法の概要³⁶⁾

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て骨材粒子同士を結合させ、水分を蒸発させてCCC硬化体が出来上がる³⁷⁾。しかもこのCCCは、何度でもリサイクルが可能である。現段階では実用に供されるレベルまでの道のりは遠いかもしれないが、今後、構造材料としても十分な強度、構造部材として機能し得る寸法、等を満足する新材料に成長することが期待される。

5.3 蓄電・蓄熱コンクリート

ウルム (F.J. Ulm) から米国MIT (マサチューセッツ工科大学) の研究グループは、コンクリートにナノカーボンブラックと呼ばれる炭素微粒子をある量だけ混入することで、コンクリート内部に電気を貯蔵する機能を持たせることに成功した³⁸⁾。カーボンブラックは、疎水性の物質であるために水和反応に関わることなく、セメント硬化体内に連なる無数の微細空隙の周囲に留まり、炭素微粒子の3次元ネットワークを構成する。このコンクリートが電解質溶液に浸漬されると、カーボンブラックの周囲に電子が集まり電気を蓄積することから、カーボンセメント複合体からなる電子二重層コンデンサが形成される³⁸⁾。

発電・蓄電できるこの新しいコンクリート材料^{ec³} (electron-conducting carbon concrete) を社会実装するために、MITと會澤高圧コンクリートは、産業レベルの利活用を狙った共同開発を推進する「^{ec³} コンソーシアム」を2024年4月に設立した。この技術により、電気を蓄える蓄電型コンクリートと電気を通すと融雪などに利用できる自己発熱コンクリートの開発を進めるとしている³⁹⁾。この材料を、例えば戸建て住宅の基礎に用いることで、太陽光発電などにより得られた丸一日分の電気エネルギーを蓄えることができ、送電線を必要としないエネルギーシステムの実現が期待できる。また、札幌市との共催で2024年12月から翌25年2月末にかけて、大通公園で融雪の実証実験を行い、発熱能力や融雪効果の検証を試みている³⁹⁾。社会実装の大きな成果が期待される。

6. むすび

本稿で取り上げたコンクリートの新技術は、いずれも2050年までにカーボンニュートラルを実現するという大きな社会的目標に向かっていくものである。いずれの取り組みも、社会実装へ向けての課題に、コストの低減が挙げられている。その対策としては、例えばPCa化を図り、その蒸気養生に必要なボイラーから排出される

CO₂ガスを素材の炭酸化に利用する提案がある¹⁸⁾。また、新材料のコストそのものは通常のコンクリートに比べて高くとも、それを取り巻く流通や生産・施工全体のコストの低減に結びつけることが求められている¹⁵⁾。更に、使用セメント量の低減に伴い、アルカリ成分が減って補強筋の錆対策も重要な課題となる。錆びない素材への切り替えの他にも、繊維補強埋設型枠とするなど、工法全体の変化にもつながってくる可能性がある^{15),16)}。

新規材料開発の出発点には、大学や企業・研究機関の基礎的な研究成果による例が多い。しかしながら、社会実装へ向けての展開には、様々な得意技を有する多様な企業・研究機関との共同研究・開発による性能向上や製造法の改良等があつて初めて大きな成果に結びついている例も多い。単なる新たな素材開発にとどまらず、総合的な展開が求められている。

また、我が国においては、例えば建築基準法等の法規制が新材料の社会実装への大きな壁となっている。安全性を担保しながら、規制緩和を実現する方策の検討も重要である。

【参考文献】

- 1) https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/pdf/green_koho_r2.pdf (2025.1.31確認)。
- 2) 小島正朗, 辻大二郎, 依田和久, 橋本学: 低炭素型コンクリート「ECMコンクリート」の開発と今後の普及展開, セメント・コンクリート, No.900, pp.76-81, 2022.
- 3) 久田真, 宮里心一, 坂田昇: 環境配慮型コンクリートの全体像と今後の展望, コンクリート工学, Vol.60, No.10, pp.881-887, 2022.
- 4) 加藤佳孝, 川端雄一郎, 伊代田岳史, 取違剛, 櫻庭浩樹, 蔵重勲, 宮原茂禎: コンクリート技術を活用したカーボンニュートラルの実現に向けて—土木学会234委員会の活動報告, コンクリート工学, Vol.62, No.6, pp.507-513, 2024.
- 5) 久田真, 宮里心一: カーボンネガティブコンクリートの社会実装に向けて, 土木施工, Vol.62, No.11, pp.22-25, 2021.
- 6) 米澤敏男, 坂井悦郎, 鯉淵清, 木之下光男, 釜野博臣: エネルギー・CO₂ミニマム (ECM) セメント・コンクリートシステム, コンクリート工学, Vol.48, No.9, pp.69-73, 2010.
- 7) 小林利光, 一瀬賢一, 並木憲司: 低炭素型のコンクリート「クリーンクリート」, 大林組技術研究所報, No.80, pp.1-4, 2016.
- 8) 大脇英司, 岡本礼子, 松本淳一, 渡邊悟士: 混和材を大量に使用したコンクリートと事例, コンクリート工学, Vol.57, No.1, pp.71-74, 2019.
- 9) 松田拓, 篠崎裕生, 佐々木亘, 野並優二: 持続可能性に貢

- 献する超低収縮・低炭素コンクリート, コンクリート工学, Vol.58, No.1, pp.84-89, 2020.
- 10) 佐々木猛, 八木利之: エコタンカル: CO₂を原料とした環境にやさしい軽質炭酸カルシウム, 土木施工, Vol.62, No.11, pp.87-90, 2021.
- 11) <https://www.nedo.go.jp/content/100920409.pdf> (2025.1.11 確認).
- 12) 取違剛, 横関泰祐, 吉岡一郎, 盛岡実: CO₂排出量ゼロ以下の環境配慮型コンクリート CO₂-SUICOM, セメント・コンクリート, No.786, pp.26-31, 2012.
- 13) 松本淳一, 橋本理, 坂本淳, 丸屋剛: コンクリート製造時に二酸化炭素を固定させる技術, コンクリート工学, Vol.61, No.2, pp.138-144, 2023.
- 14) 百瀬晴基, 石関浩輔, 閑田徹志, 巴史郎, 大川憲, 青木真一, 笠井哲郎: 乾燥スラッジ微粉末を混和材として用いたレディーミクストコンクリートの開発, 鹿島技術研究所年報, 第66号, pp.75-84, 2018.
- 15) 坂田昇, 村上陸太, 八木利之, 渡邊賢三: 建設施工現場の省人化と CO₂削減を同時に達成するコンクリート技術, コンクリート工学, Vol.60, No.7, pp.584-589, 2022.
- 16) 取違剛, 森泰一郎, 河内友一, 藤城昭宏: CO₂固定型カーボンネガティブコンクリート CO₂-SUICOMの開発と今後の展開, セメント・コンクリート, No.900, pp.64-69, 2022.
- 17) 取違剛, 森泰一郎, 小島正朗: 革新的カーボンネガティブコンクリートの材料・施工技術及び品質評価技術の開発, コンクリート工学, Vol.61, No.6, pp.520-527, 2023.
- 18) 江口康平, 大野正人, 中島正人, 辻大二郎: カーボンネガティブコンクリート「CUCO ー建築用プレキャスト部材」の適用, コンクリート工学, Vol.62, No.7, pp.589-594, 2024.
- 19) 日本コンクリート工学会: 建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書, 2017.9.
- 20) 南浩輔, 太田健司, 舟橋政司, 梶田秀幸: 低炭素・資源循環型社会における建設材料としてのジオポリマー, コンクリート工学, Vol.57, No.1, pp.91-93, 2019.1.
- 21) 菊地道生, 柴山淳, 山本武志: フライアッシュを最大限活用する環境配慮型コンクリートの開発, コンクリート工学, Vol.62, No.6, pp. 520-526, 2024.
- 22) 一宮一夫, 池田攻, 上原元樹: 低炭素材料としてのジオポリマーの普及・活用, コンクリート工学, Vol.59, No.9, pp.794-800, 2021.
- 23) 一宮一夫: ジオポリマーの研究開発の現状, コンクリート工学, Vol.55, No.2, pp.131-137, 2017.
- 24) 新谷紀雄 (監修): 最新の自己修復材料と実用例, 326p., シーエムシー出版, 2010
- 25) 五十嵐心一, 國枝稔, 西脇智哉: 委員会報告 セメント系材料の自己修復性の評価とその利用法研究委員会, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.37-42, 2009.
- 26) Li, M., Sahmaran, M., Li, V.C.: Effect of Cracking and Healing on Durability of Engineered Cementitious Composites under Marine Environment, HPFRCC 5, RILEM PRO 53, pp.313-322, 2007.
- 27) 山田啓介, 細田暁, 在田浩之, 岸利治: 膨張材を用いたコンクリートのひび割れ自己治癒効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.261-266, 2007.
- 28) <https://basilisk.co.jp/> (2025.1.31 確認).
- 29) 西脇智哉, 三橋博三, 張炳國, 杉田稔: 発熱デバイスを利用した自己修復機能を有するインテリジェントコンクリートの開発に関する基礎的研究, コンクリート工学論文集, Vol. 16, No.2, pp.81-88, 2005.
- 30) 上野拓, 尾形雅人, 荒木慶一, S. Pareek: 自己修復システムによる超弾性合金を用いたRC梁部材の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1309-1314, 2015.
- 31) 三橋博三: コンクリートの自己修復, 最新の自己修復材料と実用例, 新谷紀雄 (監修), シーエムシー出版, pp.298-306, 2010.
- 32) Mihashi, H., Ahmed, S.F.U., Kobayakawa, A.: Corrosion of Reinforcing Steel in Fiber Reinforced Cementitious Composites, J. of Advanced Concrete Technology, Vol.9, No.2, pp.159-167, 2011.
- 33) 河合慶有: 自己治癒材の活用と将来展望, コンクリート工学, Vol.60, No.1, pp.46-50, 2022.
- 34) 五十嵐心一, 細田暁, 人見尚, 今本啓一: 委員会報告 セメント系材料の自己治癒技術の体系化研究専門委員会, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1-9, 2011.
- 35) 松田信広, 亀山敬宏, 松田美奈, 伊代田岳史: CO₂ガスの強制吸着による低エネルギー型再生骨材製造方法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1732-1737, 2014.
- 36) 野口貴文: 「カルシウムカーボネイトコンクリート (CCC)」が創造する資源循環の将来像, 建設マネジメント技術, 2022年2月号, pp.64-69, 2022. (一般財団法人経済調査会)
- 37) Maruyama, I., et al.: Cold-sintered Carbonated Concrete Waste Fines: A Calcium Carbonate Concrete Block, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.19, pp.1052-1060, 2021.
- 38) <https://eccube.mit.edu> (2025.1.31 確認).
- 39) <https://www.chikudenconcrete.com> (2025.1.31 確認).

【執筆者】



*1 三橋 博三
(MIHASHI Hirozo)