



ムーンショット「C⁴S研究開発プロジェクト」における 炭酸カルシウムコンクリートの創造

東京大学 大学院工学系研究科教授 野口 貴文

1. プロジェクトの背景

コンクリートは社会資本整備にとって必須の建設材料であるが、その主要材料であるセメントの生産に際して、天然の石灰石を大量に使用するとともに、温室効果ガスであるCO₂を大量に排出している。日本における石灰石の可採年数は最長でも200年弱(2009年度における予想可採鉱量: 272億トン、石灰石採掘量: 1.4億トン/年)であり、世界全体の年間CO₂排出量約330億トンの約7%がセメント生産によるものである。特に、地球温暖化の抑制は人類の喫緊課題であり、2050年までに産業革命以前からの地球の平均気温の上昇を1.5°C以下に抑えるためには、人類の活動に伴うCO₂の排出削減だけでなく、大気中からのCO₂回収が必要となる。図-1に示すように、セメント生産時の石灰石の脱炭酸に伴うCO₂の累積排出量は、世界全体で500億トンにも及んでいる。このような背景の下、内閣府によって、ムーンショット目標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」が定められ、Cool Earthに向けて、CO₂を環境負荷物質ではなく資源として捉え、大気中に広く分散

したCO₂を回収し、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ための研究開発が求められた。

2. プロジェクトの概要・目標

「C⁴S」はCalcium Carbonate Circulation System for Construction(建設分野の炭酸カルシウム循環システム)の略である。本プロジェクトでは、コンクリート構造物中のカルシウム(Ca)をCO₂吸収源とみなし、構造物の解体によって生ずる廃コンクリート中のCaと大気中のCO₂とを結合させ、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建設材料として利用することで、図-2に示すCO₂とCaの循環を実現することを目標としている。現在、

4つの課題を設け、表-1に示す8機関で分担して研究開発を進めている。C⁴Sの実現により、世界全体

表-1 プロジェクト参画機関一覧

機関	主要研究者
東京大学	野口貴文(PM)、丸山一平
北海道大学	北垣亮馬
東京理科大学	兼松 学
工学院大学	田村雅紀
宇都宮大学	藤本郷史
清水建設	辻埜真人、中澤春生、黒田泰弘
太平洋セメント	平尾 宙、兵頭彦次
増尾リサイクル	増尾孝義

でセメント生産時の石灰石の脱炭酸によって大気中に放出された累計500億トンのCO₂は、コンクリート中に残されたCaによって吸収・固定化されることとなる。

3. CCC材料の製造

CCCの原料は廃コンクリートとCO₂のみであり、原料からCCC材料の製造は、概略、①廃コンクリートを微破碎し、大気中のCO₂によって炭酸化(DAC: Direct Air Capture)する、②炭酸化した粗粒

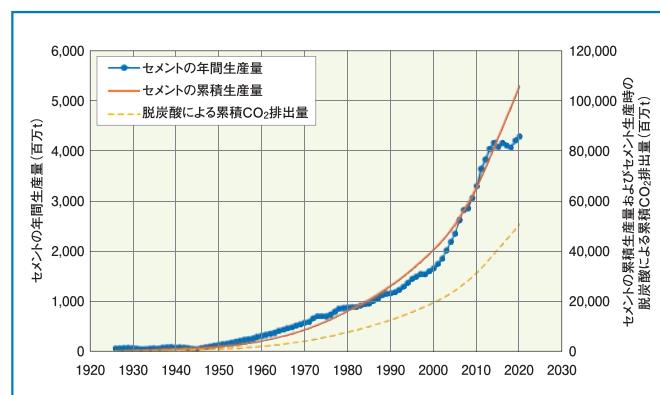
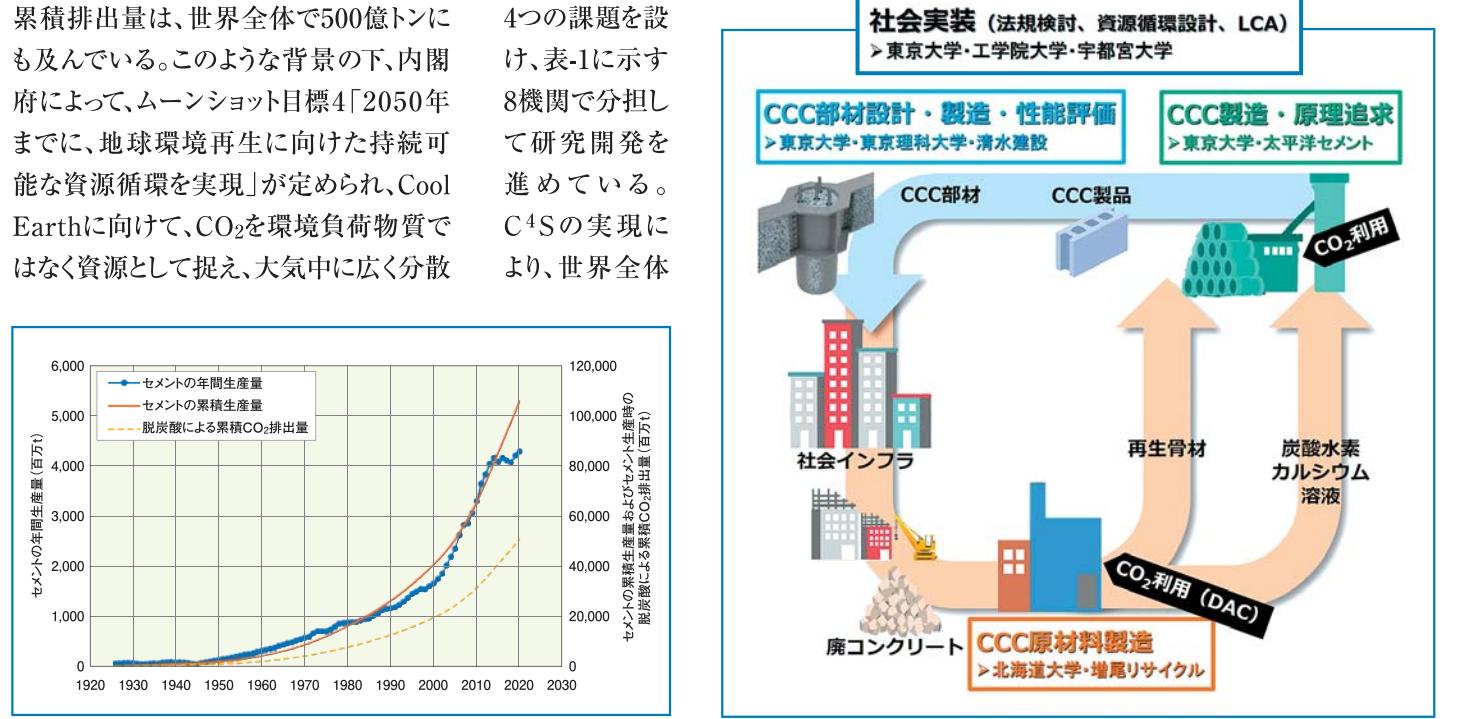


図-1 セメント生産量・脱炭酸によるCO₂排出量の推移



分は骨材とする、③炭酸化した細粒分は水中に投入してCaを抽出し、炭酸水素カルシウム溶液を生成する、という手順となる。①の過程では、破碎した廃コンクリート粒子に大気中のCO₂を効率よく吸収固定させる必要がある。図-3に示すように、廃コンクリート粒子を分級し、粒度を揃えて隙間を設け、乾湿または滴水・乾燥の繰返しを行うことで、分級せず大気中に放置した場合の41~56倍の炭酸化速度を実現している。また、炭酸水素カルシウム溶液のCa溶解度は温度に大きく依存し、Ca溶解度の増加速度はCaを含む固体の粒径の影響を受ける。容器に入れたイオン交換水を5°Cまたは20°Cに冷却してCO₂ガスを吹き込みながら18時間攪拌した後、炭酸化したセメントペーストとモルタルを加えてCa²⁺濃度とpHの経時変化を測定した結果、図-4に示すように、Ca溶解度は20°Cより5°Cの方が高く、粒径が小さいほどCaの溶解速度が大きく溶解度は高くなるという結果が得られている。

4. CCCの製造

CCCは、炭酸化させた廃コンクリート粗粒分の骨材と炭酸水素カルシウム水溶液を用いて製造する。これまで検討してきた製造方法は、析出法と加圧法に大別される。析出法では、図-5に示すように、骨材を型枠に密に詰め、骨材間の隙間に炭酸水素カルシウム溶液を流し、温度

変化(加熱)・pH増大・蒸発といった操作を与えることで、骨材間に炭酸カルシウムの微細結晶を析出させ、炭酸カルシウムが骨材どうしを架橋することで、CCC硬化体が得られる。一方、加圧法では、図-6に示すように、破碎して炭酸化させた廃コンクリート全量を水と練り混ぜた後に型枠に詰めて加圧成形(または振動成形)を行い、炭酸水素カルシウム溶液への浸漬と乾燥を行うことで(成形後に炭酸ガス養生を行う場合あり)、CCC硬化体が得られる。

加熱による析出法では、骨材間に生じる支配的な析出相である針状結晶のアラゴナイト(図-5参照)がCCC硬化体の強度発現に有用であることがわかっている。また、炭酸水素カルシウム溶液から炭酸カルシウムを析出させた場合に再度生成するCO₂は、未炭酸化水和物中のCaと反応(Wet carbonation)

して炭酸カルシウムを生成するため、CCC原材料の製造過程で炭酸化が十分でなかったとしても、析出過程でCCCのCO₂固定率は高まる。図-7に示すように、析出法によってCCC硬

化体の強度を増大させるためには、最適な充填率(炭酸水素カルシウム溶液の流路が確保され、かつアラゴナイトの析出密度が高まる状態)で骨材を型枠に詰める必要があることがわかっている。これまでのところ、φ1×2cmの円柱供試体では建築基準法で要求される最低圧縮強度の12MPaが得られてはいるが、供試体の大型化に伴って均質なCCC硬化体の製造が困難になるため、現在、CCCの実用化に向けて別の製造方式への転換を図っている。

一方、加圧法では、型枠に詰めた炭酸化廃コンクリート粒子(粒径0.6mm以下)を10MPaで加圧した後に炭酸水素カルシウム溶液への浸漬と乾燥を行うことで、φ10×20cmの供試体で圧縮強度12MPaが容易に得られることを確認している。また、炭酸水素カルシウム溶液に浸漬

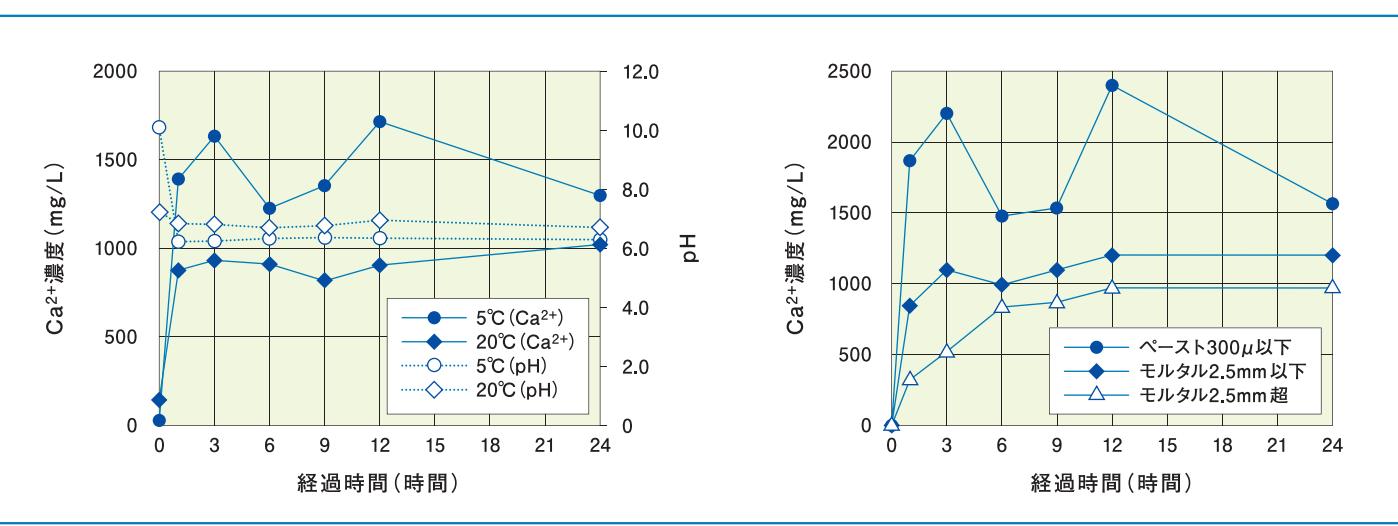
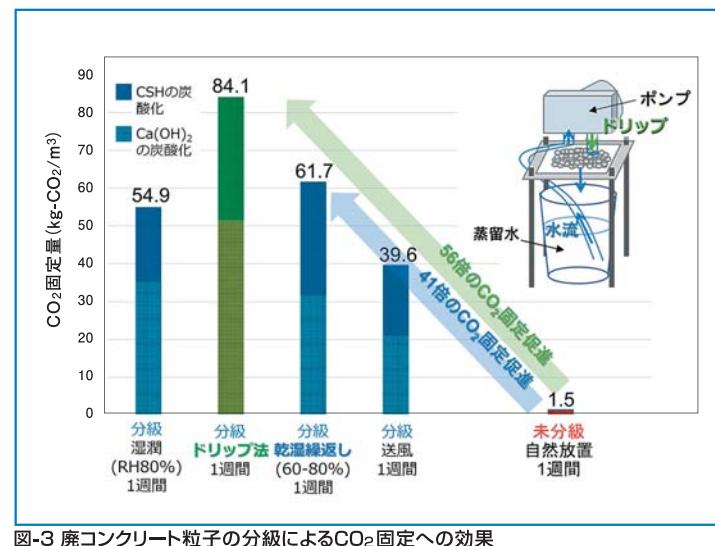


図-4 廃コンクリート粒子の分級とCO₂固定量の関係

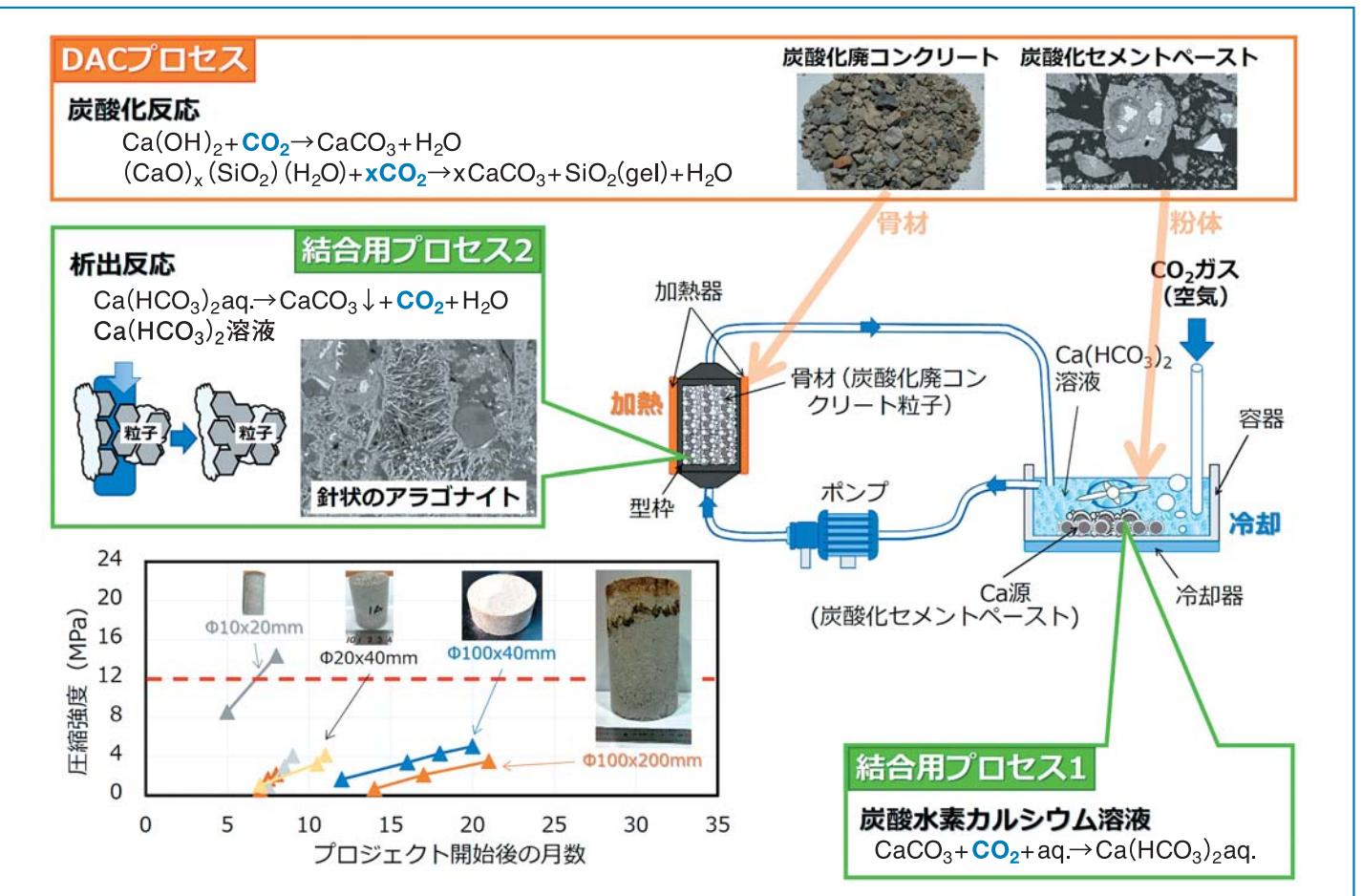
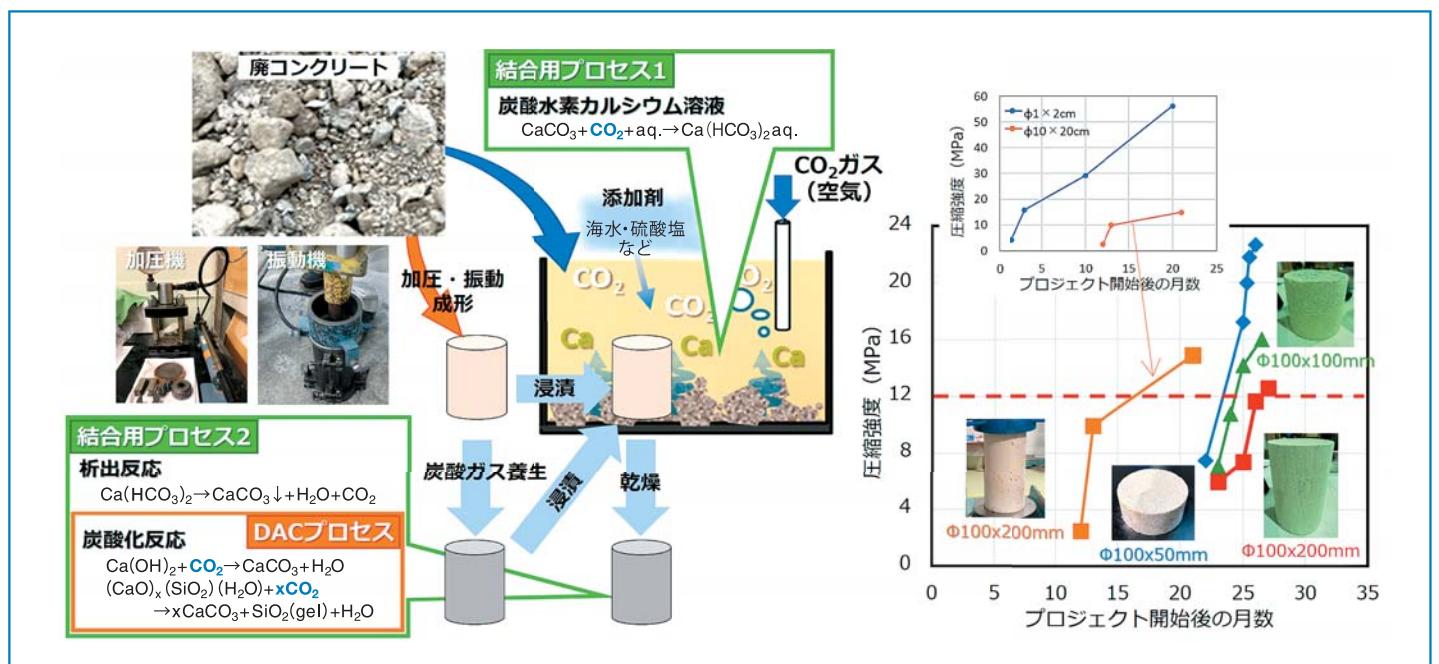


図-5 析出法のフロー図

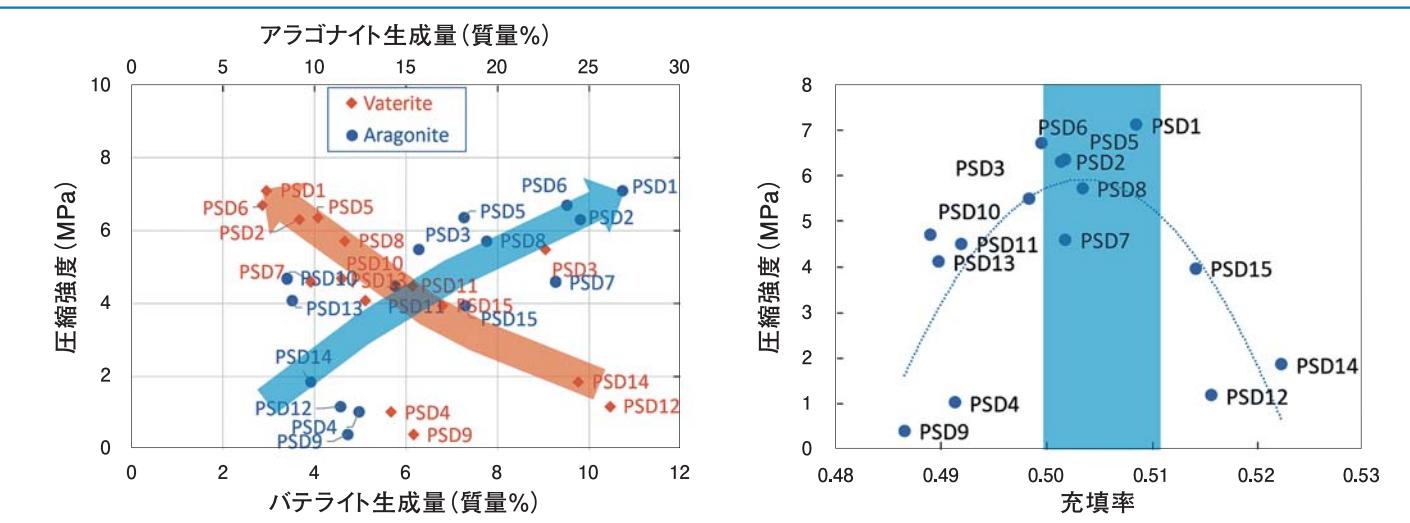


する際に硫酸マグネシウムや海水を加えることで、強度を高めることができ、 $\phi 1 \times 2\text{cm}$ の供試体で 56 MPa の圧縮強度が得られている。現在、CCC硬化体の大型化を目指して、製造プロセスの最適化が進められている。

5. CCCを用いた構造物

CCC構造物の構造形式としては、図-8に示すように、薄肉鋼管内に低強度コンクリートを充填した模擬柱部材の実験結果では、コンクリートの圧縮強度が 5 MPa でも鋼管のコンファインド効果によって 10 MPa

填した梁部材とを接合する架構が検討されている。この構造形式の実現に向けて実施された薄肉鋼管内に低強度コンクリートを充填した模擬柱部材の実験結果では、コンクリートの圧縮強度が 5 MPa でも



コンクリート中の鉄筋腐食と「RFID腐食環境検知システム」

コンクリート中の鉄筋に錆(腐食)が生じると、コンクリート構造物にひび割れが生じ耐久性が低下するため、鉄筋の状態を適切に把握することが重要です。今回は、コンクリート中の鉄筋腐食のメカニズムや補修方法について解説するとともに、腐食の未然防止にも活用が期待できる「RFID腐食環境検知システム」について紹介します。

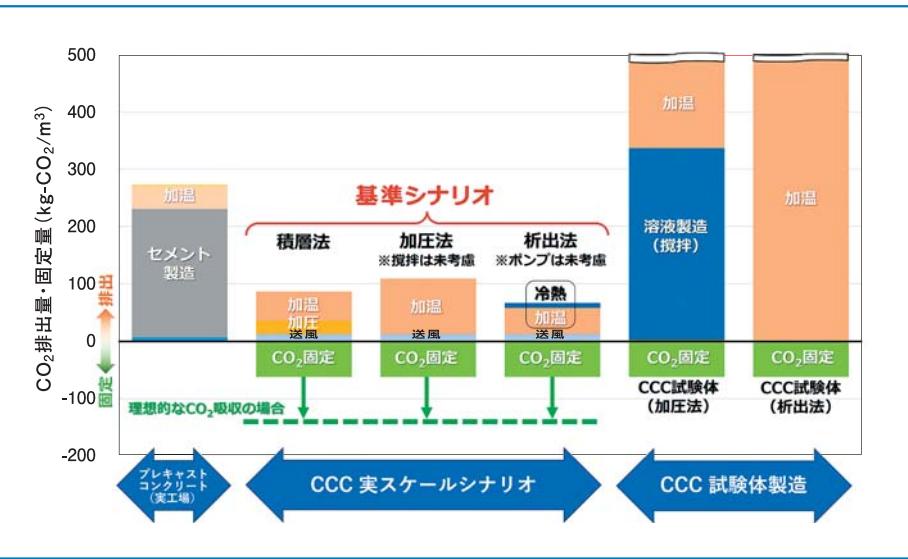
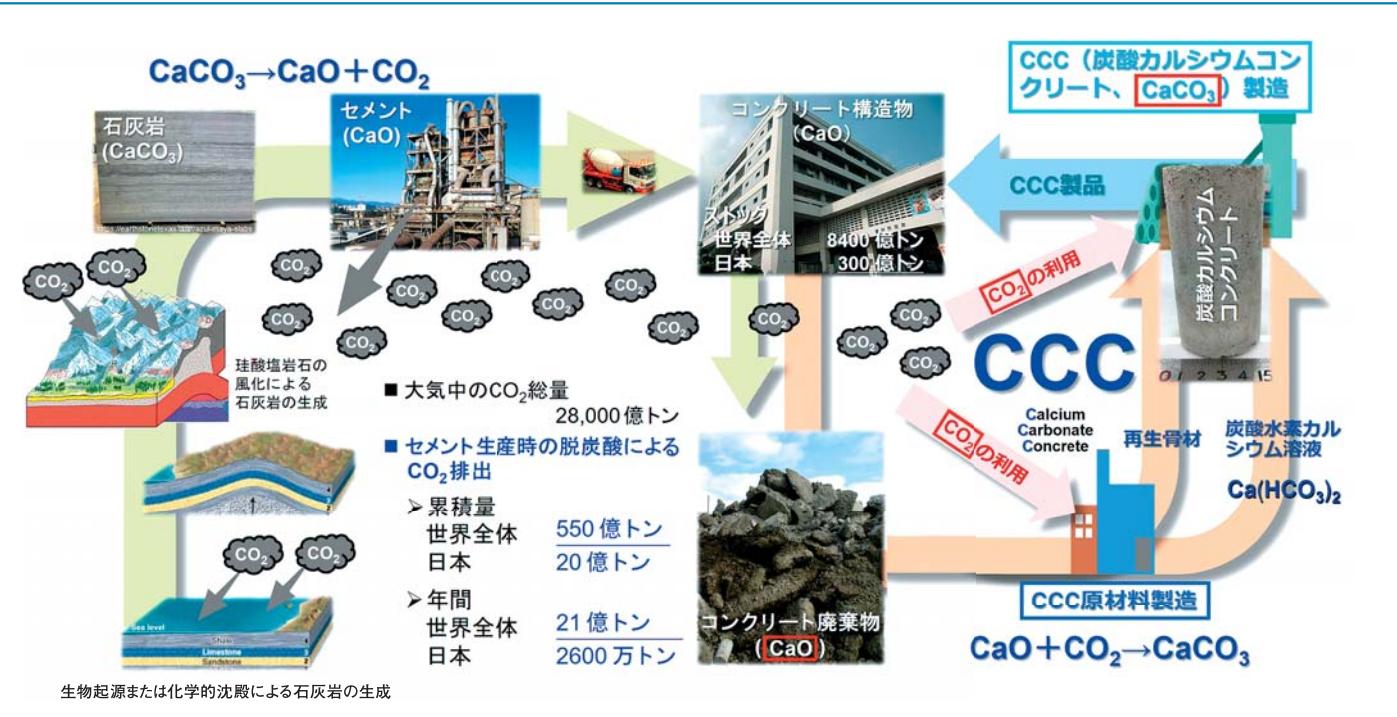


表-2 CCC普及のために必要な法規類の制定・改正への対応一覧

年度	CCCの開発・普及目標	CCCの期待生産量	CO ₂ 固定量	法規類の制定・改正への対応
2022	12N/mm ² の圧縮強度達成	0千t/年		
2024	30N/mm ² の圧縮強度達成 大阪万博での実験構造物の建設	0.1千t/年	24t/年	
2029	低層CCC造建築物の建設	2千t/年	470t/年	①建築基準法第20条に基づく大臣認定の取得 ②日本建築学会規準・標準仕様書等の制定 ③建設省告示1446号(技術的規準)の改正 ④建築基準法第37条2項に基づく大臣認定の取得 ⑤日本産業規格(JIS)の制定 ⑥建設省告示1446号(技術的規準)の改正 ⑦建築基準法第37条1項への適合
2040	生産量毎年1.725倍増	345千t/年	8.2万t/年	
2050	コンクリート構造物の50%がCCC造	110,000千t/年	2,600万t/年 (世界:約21億t/年)	



(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、建築物的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は、表-2に示すように、実績を踏まえたうえでの各種法規格等の制定・改正を経る必要がある。

数億年前の太古にヒマラヤ山脈やアルプス山脈が隆起する過程でCO₂が固定化され、生物が生きていけるクールアースが誕生した。図-11に示すように、本プロジェクトは、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期待されている。



[著者略歴]
1961年岡山県生まれ。
1985年東京大学卒業、1988年東京大学助手、1998年同助教授、2014年同教授。
2018年よりISO/TC71/SCB議長、2020年よりC4S研究開発プロジェクトプロジェクトマネージャー、2023年より日本建築学会材料施工委員長を務める。

Q1

コンクリート中の鉄筋はなぜ錆びるのですか。

A1

健全なコンクリート中は、安定した強アルカリ環境であるため、コンクリート内の鉄筋は不働態被膜と呼ばれる薄い膜に覆われて腐食から守られていますが、コンクリートの中性化が進行する、あるいは塩化物イオンが外部から侵入するなどの影響で不働態被膜が破壊されると、腐食が始まります。

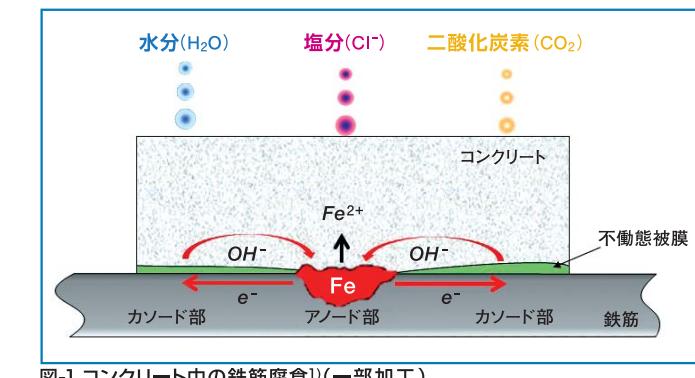
解説

コンクリート構造物の代表的な劣化として、大気中の二酸化炭素などによりコンクリート中のpHが低下する「中性化」や、海水などの飛沫に含まれる飛来塩分、寒冷地で散布される凍結防止剤由來の塩化物イオンに起因するコンクリートの「塩害」があります。これらの劣化は、コンクリート中の鉄筋を腐食させ、ひび割れやかぶりコンクリートの剥落といった問題を引き起こします。

健全なコンクリート中は強アルカリの環境になっており、鉄筋表面には、厚さ3nm（ナノメートル、1nmは1mの10億分の1）程度の水和酸化物から成る不働態被膜が形成され、耐食性を有しています。しかし、コンクリートに水や二酸化炭素が供給されると、コンクリートのpHが概ね10～11まで低下して不働態被膜は消失します。また、塩化物イオン(Cl⁻)も不働態被膜を局所的に破壊する作用を有しており、いずれ

の場合も腐食しやすい環境となります。

このように、鉄筋の不働態被膜が消失した部分では、鉄



置まで中性化が進行すると不働態被膜が破壊され、腐食が始まるとされています。通常、中性化はコンクリート表面から進行するため、コンクリート表面を塗膜防水材で被覆する、早期にひび割れを補修するといった方法で、水や二酸化炭素を遮断し中性化の進行を抑制します。また、塩害では、鉄筋位置の塩化物イオン量がコンクリート1m³あたり1.2～2.5kgを超えると鉄筋腐食が始まると言われています。そのため、土木学会コンクリート標準示方書では、鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度という限界値が定められています。

Q2

コンクリート中の環境はどうなると鉄筋腐食が始まりますか。

A2

鉄筋腐食環境は、コンクリート中の塩化物イオン濃度(Cl⁻)と、水酸化物イオン濃度(OH⁻)の比に依存しており、ある閾値を超えると鉄筋腐食が始まるとされています。

解説

コンクリートは、pHが概ね10～11を下回るとアルカリ性が失われてしまい、鉄筋位

Q3

鉄筋が腐食するとコンクリートにはどのような影響がありますか。

A3

健全な鉄よりも大きな体積を持つ錆が生成されるため、コンクリートに膨張圧を作ることでコンクリートにひび割れが生じ、コンクリートの剥落といった第三者被害を生じさせる可能性があります。

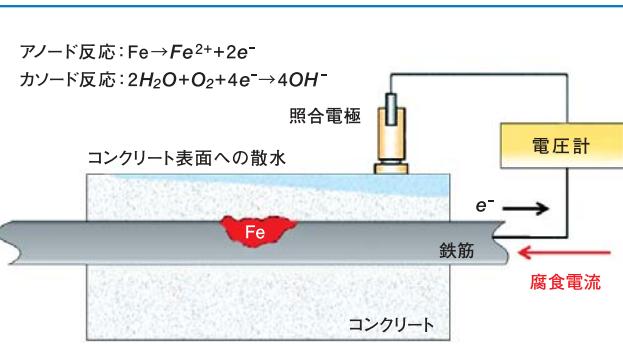


図-2 自然電位法の概要

解説

錆の体積は、鉄よりも2~4倍程度大きいと言われているため、錆の生成に伴って鉄筋は膨張し、その膨張圧が周囲のコンクリートに圧力を加え、腐食ひび割れの発生といった影響を及ぼします。ひび割れは、水や二酸化炭素をコンクリート中に侵入させる主な原因となり、一度錆が生成されると、鉄筋腐食は加速度的に進みます。腐食によるひび割れが進展すると、コンクリートの剥落など、第三者被害の発生に繋がるおそれがあることから、定期的な調査を通じて早期に鉄筋の状態を把握することが重要です。

Q4

既設コンクリート構造物中の鉄筋の状態を把握するには、どのような方法がありますか。

A4

鉄筋の腐食は、電気化学的な作用であることを利用し、電流や抵抗値を測定することで鉄筋の状態を調査する方法があります。

解説

コンクリート中の鉄筋の腐食は、電気化学的な反応が主体となるため、その特性を利用した調査方法があります。代表的な手法として、例えば自然電位法²⁾は、腐食により変化する鉄筋の電位を測定しています。鉄筋が腐食すると鉄筋には

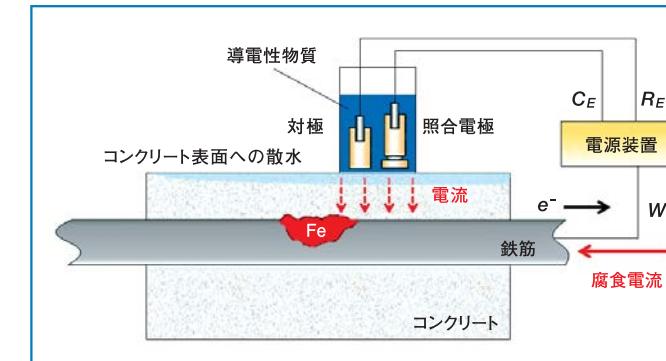


図-3 分極抵抗法の概要

その後、補修モルタルにて鉄筋を埋め戻し、コンクリート表面に水や二酸化炭素の侵入を防ぐ塗装を施します。

解説

電位差が生じ、腐食電流が流れます。鉄筋が腐食しているアノード部は卑側(-側)になることから、この負の電位を測定することにより、鉄筋の腐食程度を推定します(図-2)。

また、分極抵抗法³⁾は、鉄筋の腐食速度と分極抵抗の逆数が比例関係にあることを利用し、分極抵抗から鉄筋の腐食程度を推定する手法です。分極抵抗とは、鉄筋の腐食反応に伴う腐食電流量が、その鉄筋を分極させた場合の負荷電圧と、それにより生じる電流の変化量の比で表されます。コンクリート表面に設置した電極から鉄筋に微弱な電流を流した際に生じる電流変化量から、腐食速度と反比例の関係にある分極抵抗を求め、鉄筋の腐食速度を推定します(図-3)。ただし、いずれの手法もコンクリートから鉄筋の一部をはつり出す必要があることや、測定時にコンクリート表面が湿潤状態でなければならないなどの条件が定められているため、より簡便な非破壊での調査方法が求められています。

Q5

鉄筋腐食が判明した場合、どのような補修を行いますか。

A5

コンクリートの表面にひび割れが確認された場合は、まずコンクリートをはつり、腐食が疑われる鉄筋を露出させ、鉄筋の錆を除去し、防錆剤を鉄筋やはつり面に塗布します。

Q6

その他に、鉄筋の状態を把握する方法はありますか。

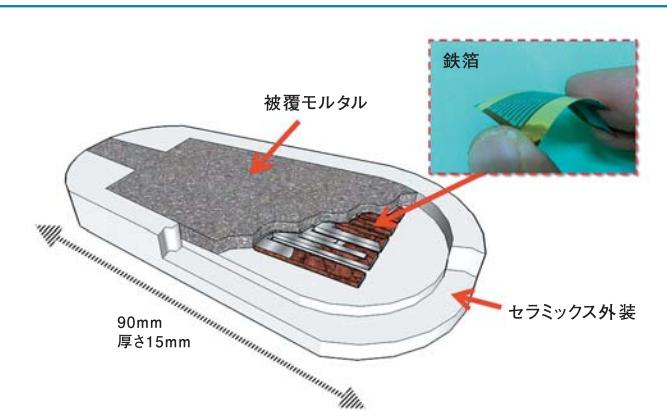


図-5 腐食センサの構成

A6

「RFID腐食環境検知システム」という、近接無線通信技術を用いた方法があります。

解説

電気化学的手法を用いて鉄筋腐食を検知するセンサは海外を中心にいくつかの製品があります(図-4)。前述した自然電位法や分極抵抗では、測定結果に少なからずかぶりコンクリートの影響を受けますが、これらのセンサはコンクリート内部に埋設します。例えば、ミニセンサ⁵⁾は鉄筋に直接設置し、搭載している小型円形の照合電極および環状対極により自然電位や分極抵抗を連続的に測定するため、かぶりコンクリートの影響を最小限化することができます。しかし、図-4で紹介したセンサの多くは、センサ本体はコンクリート内に埋設されることから、紫外線や周囲の環境



写真-1 腐食センサの設置状況および測定状況

接無線通信技術によって、非接触で鉄筋腐食の有

による劣化の懸念がないため、長期的な鉄筋状態のモニタリングに適しています。腐食センサの設置から約10年経過後にも問題なく通信(測定)ができるおり、同センサの活用によって構造物の効果的かつ効率的な維持管理が期待できます。

太平洋セメント株式会社中央研究所研究開発推進部
インキュベーション推進チーム 小池 耕太郎

【参考文献】

- 日本コンクリート工学会:コンクリート診断技術'22基礎編, pp.191-202, 2022.3
- 株式会社太平洋コンサルタントHP:<https://www.taiheiyo-c.co.jp/cement/tansafusyoku/>
- 小林孝一, 宮川豊章:分極抵抗を用いた鉄筋の腐食速度評価に関する研究, 土木学会論文集, No.669, V-50, pp.173-186, 2001.2
- 太平洋マテリアル株式会社HP:https://www.taiheiyo-m.co.jp/products/product_detail.php?cate=2&itemNum=93
- 永山勝, 田村博, 下澤和幸:腐食電流計およびミニセンサーを併用した鉄筋腐食試験方法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, 1996
- 佐藤達三, 江里口玲, 中西博, 井坂幸俊, 宮里心一, 越田剛志:RFID構造物診断技術「WIMO®」の概要と適用事例, 太平洋セメント研究報告, No.171, pp.12-23, 2016

名称	腐食環境検知システム	ラダーシステム	エクスパンジョンリング	ミニセンサ	腐食センサ(CS5)	Corro Watch
製造国	日本(太平洋セメント)	海外	海外	日本	日本	海外
計測原理	センサ断線による抵抗変化	電位・電流の変化	電位・電流の変化	鋼材と対極板の電位変化	電圧変化(抵抗)	電位変化
計測方法	無線or有線リーダーライタテスター	有線専用機	有線専用機	有線テスター	有線専用機、テスター	有線専用機
特長	NETIS登録無線計測計測結果記録簡単作業	NETIS登録腐食進展を確認既設コア孔への設置	NETIS登録腐食進展を確認既設コア孔への設置	極小、低コスト日本総合試験所認定	腐食進展を確認サイズ小	段階的な電位変化を把握

図-4 腐食センシング装置の一例