

カーボンリサイクル・コンクリート 「T-eConcrete[®]/Carbon-Recycle」の社会実装の進展 カーボンネガティブを実現したコンクリートの現状と種々の特徴

大 脇 英 司・加 藤 優 志・宮 原 茂 禎

著者らのグループは、コンクリートに使用するポルトランドセメントの使用量を低減してCO₂排出量を抑制し、さらに、カーボンリサイクル技術によりCO₂を資源として製造した炭酸カルシウムを添加して「カーボンネガティブ」を達成したカーボンリサイクル・コンクリートの開発・社会実装を進めている。鉄筋コンクリート構造または無筋構造で、構造部材から仕上げ材まで幅広い用途における実装事例を示し、基本的な性状と用途に応じて付与した性能などをまとめた。また、実装の実績からカーボンリサイクル・コンクリートに適した炭酸カルシウムの性状について示唆を与えた。これらの状況を踏まえ、今後の進め方を展望した。

キーワード：コンクリート，低炭素，社会実装，CCU，カーボンネガティブ，カーボンニュートラル，炭酸カルシウム，高炉スラグ

1. はじめに

わが国は「2050年カーボンニュートラル」を宣言し、2030年度の温室効果ガスの排出目標を2013年度比で46%の削減とする^{1), 2)}。政府は温暖化への対応を「経済と環境の好循環」による成長の機会とし、グリーン成長戦略³⁾のひとつとして主要な温室効果ガスであるCO₂を炭素資源として回収・利用するカーボンリサイクル技術（Carbon dioxide Capture and Utilization：CCU）の開発を進めている⁴⁾。

著者らのグループは、ポルトランドセメント（以後、セメント）の使用量を削減してCO₂排出量を抑制する環境配慮コンクリート（T-eConcrete[®]シリーズ）を開発し、さらにCO₂を資源とする炭酸カルシウム（以後、CCU-CaCO₃）を用いたカーボンリサイクル・コンクリート（T-eConcrete/Carbon-Recycle）の開発・社会実装を進めている（図-1）。カーボンリサイクル・コンクリートはCO₂を炭酸塩鉱物（CaCO₃）として長期に亘り安定して固定し、使用材料に関わるCO₂排出量収支がマイナスとなる「カーボンネガティブ」を達成した⁵⁾。

ここでは、カーボンリサイクル・コンクリートの社会実装の状況を整理し、実装における特徴や今後の展望をまとめた。なお、社会実装の進展を反映し、一部の情報を前報⁵⁾から更新した。

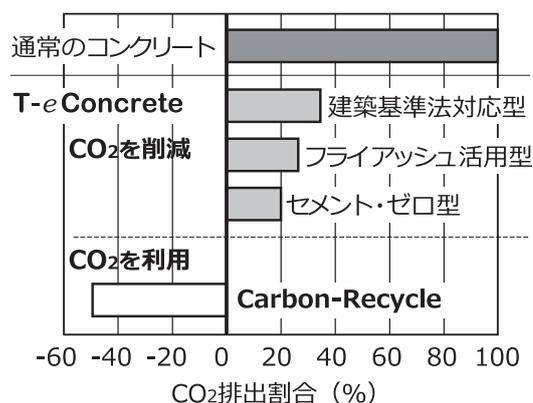


図-1 環境配慮コンクリートの構成とCO₂排出削減効果

2. カーボンリサイクル・コンクリートとは

カーボンリサイクル・コンクリートの特徴を表-1に示す^{6)~8)}。製造時のCO₂排出量が多いセメント（1トンあたり約760kgを排出）に代えて製鉄副産物である高炉スラグ微粉末と刺激材（カルシウム系化合物）を結合材とし、大量のCCU-CaCO₃を用いる点が従来と異なる。CO₂を大量に固定するが強アルカリ性を保ち、鉄筋の防食性能を維持する。また、レディーミクスト・コンクリート工場や建設現場で高濃度のCO₂を扱わず、安全である。これまでに蓄えた設備や施設、知識や経験を活用し、脱炭素社会における基盤材料として円滑に普及させるため、用途・用法や、製造・施

表一 1 カーボンリサイクル・コンクリートの特徴

項目	特徴など
用途・用法	
構造形式	鉄筋コンクリート構造、無筋構造
適用形態	場所打ちコンクリート、二次製品
使用材料	
結合材	ポルトランドセメントを使用せず
CO ₂ の吸収・固定	CCU-CaCO ₃ を活用
骨材・化学混和剤	従来の材料を使用
製造	
コンクリート製造	従来と同様の装置・設備・手順
二次製品製造	従来と同様の装置・設備・工程
施工	
場内運搬・圧送	高流動コンクリートと同等の扱い
締固め・仕上げ	従来と同様
養生方法	従来と同様。暑熱・寒冷に配慮
フレッシュ性状	
流動性・充填性	スランプ/スランプフローで管理
凝結特性	従来と同様
発熱特性	従来より優れる。発熱が小さい
硬化後性状	
圧縮強度	従来と同様に、水結合材比または水粉体比で設計
その他の力学特性	従来と同様に圧縮強度と関係づけ
収縮特性	従来の予測式で推定可能
耐久性	
中性化抵抗性	やや速いが、従来と同様に供用可
塩分浸透性抵抗性	従来より優れる。浸透が遅い
凍害抵抗性	従来と同等。適正な空気導入が必要
ASR [*] 抵抗性	非常に優れる

※：アルカリシリカ反応

工法、材料特性などが従来のコンクリートと同様となるように開発を進めた。

3. 社会実装事例と基本性状

コンクリートは安全・安心な社会基盤の提供に欠かせない。所有者や発注者、使用者の「安全と安心」は新しい材料への「理解と信用」に基づく。例えば長期耐久性は、促進試験などの科学的な手法で「理解」は深まるが、「信用」を得るには長期の供用実績も重要である。2030年、2050年のCO₂削減目標に向け、多様な構造物や使用環境で早期の実装を加速している。

実装したカーボンリサイクル・コンクリート^{9)~18)}の基本性状(表一2)と実装の状況(写真一1)をまとめた。カーボンリサイクル・コンクリートは二次製品工場や移動プラントの常用ミキサーで製造でき、所

表一 2 社会実装の実績のあるカーボンリサイクル・コンクリートの基本性状

項目	基本性状など
ミキサー	製品工場：パン型、強制二軸型 移動プラント：パン型、傾胴型
スランプ	21 ± 2 cm
スランプフロー	45 ± 7.5 ~ 70 ± 7.5 cm
空気量	4.5 ± 1.5 ~ 6.0 ± 1.5%
圧縮強度 [*]	27.5 ~ 50.5 N/mm ²
CO ₂ 固定量	98 ~ 171 kg/m ³
CO ₂ 原単位	-116 ~ -8 kg/m ³
CO ₂ 削減率 [#]	103 ~ 149%

※：各事例における20℃水中養生、材齢28日での平均値。

#：普通セメントを使用した同一強度レベルの従来のコンクリートとの比較。事例毎に比較対象が異なるため百分率で示した。

定のスランプやスランプフローに調整できた。二次製品も従来と同様な養生工程や生産(操業)サイクルで脱型時や出荷時の強度などの規定を満足し、生産性の低下はなかった。空気量は、セメントを使用しないことから、耐凍害性が必要な場合は6.0%とした¹⁹⁾。1m³あたりCO₂を98~171kg固定したうえで圧縮強度は27~50N/mm²となり、十分な強度発現性を示した。CO₂原単位は-116~-8kg/m³で、従来のコンクリートに対するCO₂削減率は103~149%となり、いずれの事例もカーボンネガティブを実現した。

使用したCCU-CaCO₃の品質を表一3に示す。石灰石微粉末は天然石を粉砕したCaCO₃であり、化学合成されるCCU-CaCO₃と異なるが、化学組成や鉱物組成は類似するため品質規格案の基準²⁰⁾を併記した。なお、データの取得実績が限られる項目は除外した。基準値の一部を満たさない場合でも、表一2のように良好に活用できた。この規格案を目安に実装を重ね、CCU-CaCO₃の品質規格の制定に反映したい。

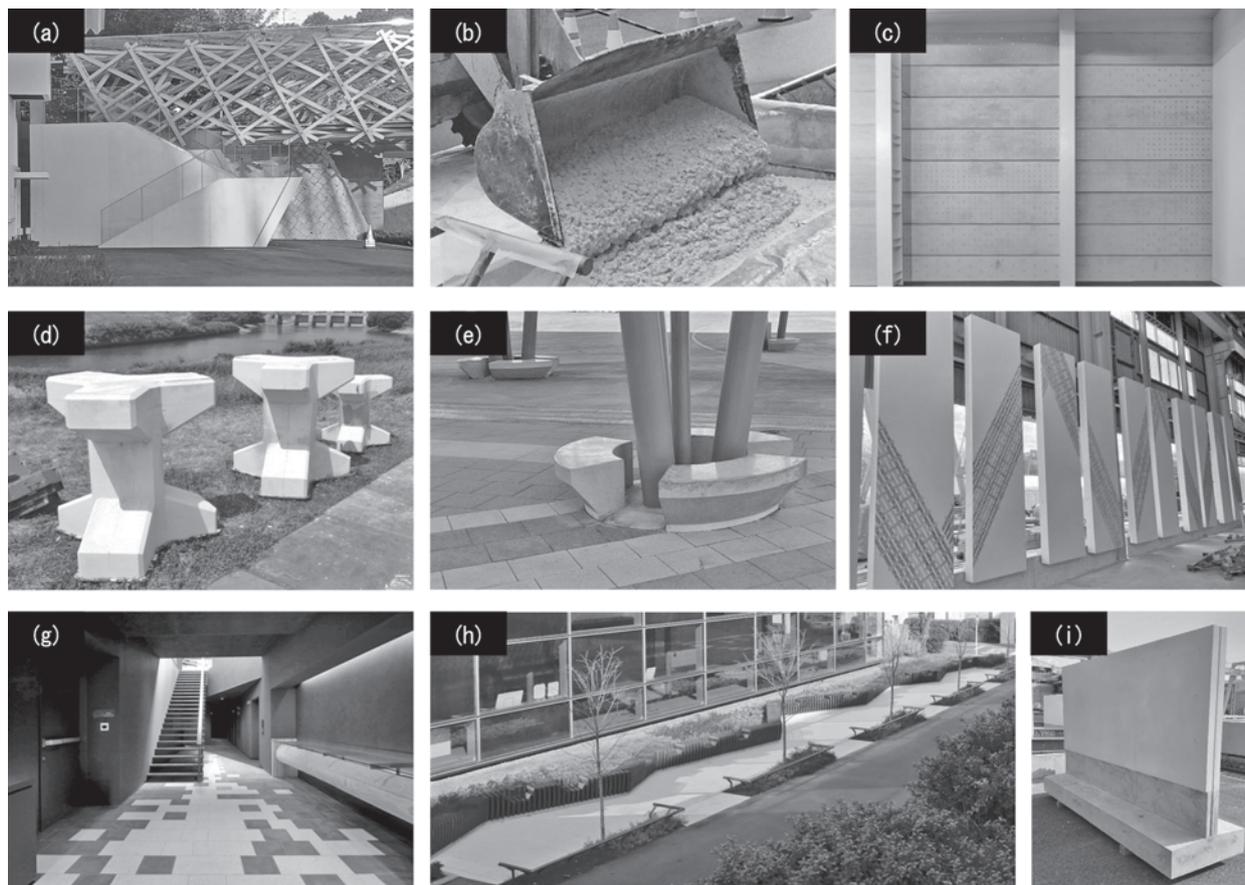
4. 実装事例で個別に確認した性状など

(1) 建築基準法への適合

セメントを使用しないコンクリートを建築物の基礎、主要構造部等に用いるには、建築基準法第20条に則った大臣認定が必要である。カーボンリサイクル・コンクリートを用いた構造物の安全性を確認して大臣認定を取得し、人道橋の基礎と屋外階段に適用した⁹⁾。

(2) 構造体強度の推定

厚さが30cmと100cmの部材を、夏期、標準期、冬期に作製し、コアを抜いて求めた材齢91日の圧縮



(a) 人道橋基礎・外階段⁹⁾ (b) 現場打ち舗装¹¹⁾ (c) 鋼繊維補強壁部材¹⁸⁾
 (d) 根固めブロック¹³⁾ (e) 公園ベンチ¹⁴⁾ (f) プレキャスト縦ルーバー¹⁵⁾
 (g) 天然石材調建材（内装床仕上材）¹⁶⁾ (h) 天然石材調建材（舗装ブロック）¹⁷⁾ (i) プレキャスト門扉部材¹⁰⁾

写真-1 カーボンリサイクル・コンクリートの社会実装例

表-3 カーボンリサイクル・コンクリートに適用した CCU-CaCO₃ の品質

項目	適用実績	参考規格値*
比表面積 (cm ² /g)	3,560 ~ 8,690	2,500 以上
CaCO ₃ (%)	85.2 ~ 97.7	90 以上
MgO (%)	0.1 ~ 2.9	5 以下
SO ₃ (%)	0.24 ~ 1.8	0.5 以下
Al ₂ O ₃ (%)	0.08 ~ 0.42	1.0 以下
湿分 (%)	0.06 ~ 3.8	1.0 以下

※：JCI-SLP コンクリート用石灰石微粉末品質規格（案）²⁰⁾ から抜粋。

強度と、20℃で水中養生した場合の材齢 28 日の圧縮強度から、構造体強度補正值_{28S₉₁}を通期で 3 N/mm²とした¹⁰⁾。セメントを用いた場合の 3~6 N/mm²と同様であった。

(3) 現場打ち施工

2 種類のカーボンリサイクル・コンクリート（A, B）を舗装に用いた。平均気温は 15.5℃であったが、材齢 28 日の圧縮強度は A：43.8 N/mm²、B：25.5 N/mm²

と良好に強度が発現した。材齢 56 日の Torrent 試験では、A：very good, B：good と判定され、通常の施工方法で高品質なコンクリートを得た¹¹⁾。

(4) 鋼繊維補強コンクリートへの適用

カーボンリサイクル・コンクリートは鋼材の防食性がある。鋼繊維を添加して引張軟化曲線を求め、実績のある繊維補強コンクリートの曲線と比較した。両者はよく一致し、同等の引張靱性であると確認した¹²⁾。

(5) 供用期間における CO₂ の吸収・固定の促進

無筋コンクリートの根固めブロックは鉄筋防食の必要がない。刺激材を調整して中性化速度（炭酸ガス吸収速度）を速くし、地上での備蓄中の CO₂ 吸収・固定量を増やした。また、アルギン酸を混合して、水中投入後の藻類の生育による CO₂ 固定（ブルーカーボン）の促進を図った。材料・備蓄・供用の 3 つの段階で複合した CO₂ の吸収・固定効果の検証を続けている¹³⁾。

(6) 環境安全性の確認

河川水や海水、地下水との接触に備えて溶出試験を行い、排水基準より厳しい土壌環境基準（環境省告示第46号、別表）と照らした。いずれの成分も検出下限未満であり、環境安全性を有することを確認した¹³⁾。

(7) 製造安定性

現状では、製造経験が乏しい場合や日常の製造規模より著しく小さい場合があるが、ベンチの製造の例では、数回の製造で習熟できた¹⁴⁾。

また、縦ルーバーでは調合管理強度 33 N/mm² に対し平均強度 45.2 N/mm²、標準偏差 2.6 N/mm² であった¹⁵⁾。いずれも製品工場の通常設備を用いて、安定した製造が可能であった。

(8) 狭隘部への充填性

鉄筋のほか、多数のアクリル樹脂製の棒や取付金具を埋設した狭隘部の多い壁部材に鋼繊維補強コンクリートとして適用し、部材を製造した。狭隘部では鋼繊維の絡み合いにより充填が不十分になることが懸念されたが、スランプフローを 50 ± 7.5cm に管理することで、従来と同様の手順で欠陥なく良好に製造できた¹²⁾。

(9) 意匠性の付与と使用性

石材調建材を製作し、屋内外で床材¹⁶⁾、舗装材¹⁷⁾ に使用した。セメントを使わないため白いことを活用し、白御影石調とした。曲げ強度のほか、摩耗抵抗性と滑り抵抗性、耐候性（変色）について試験し、十分な使用性を持つことを確認した¹⁷⁾。

(10) ひび割れの発生

体積変化を拘束したひび割れ試験（JIS A 1151）に

より、主に乾燥収縮によるひび割れが材齢 28 日までに発生しないことを確認した¹⁸⁾。このコンクリートを用いた壁部材は設置から約 2.5 年が経過するが、顕著なひび割れは観察されていない。

(11) 曝露試験

根固めブロックの河川堤防での曝露試験¹³⁾ は約 1.5 年が経過した。また、実装事例の追跡調査のほか、神奈川県横浜市における試験体の曝露試験は約 4 年が経過した。いずれも劣化事象は観察されていない。

5. 今後の展望

カーボンリサイクル・コンクリートの CO₂ の回収・固定から社会実装までの流れを図-2 に示す。著者らのコアコンピタンスを活かした多様な連携を推進している。

“CCU 技術”には環境側面、経済側面から合理的な CCU-CaCO₃ の製造が求められる。これを用いたコンクリートの開発では CCU-CaCO₃ の適合性について情報を還流し、両者の有機的な連携により“新材料開発”として環境価値、経済価値を高めている。開発成果の普及には“商品化（製品化）”が必須である。商品開発・製造・販売を司る T-eConcrete 研究会²¹⁾ のメンバーは 30 社を超え、供給体制を整えている。また、生産性の向上など、新しい社会に調和させるため 3D プリンターを用いた施工についても検討している²²⁾。

技術的認知度を高め、使用や発注などに関わる多くのルールと整合を図るには“官民連携”は不可欠である。実装に深く関与する建築基準法については、我々を含む民間からの規制改革の要望に対し、内閣府に設置された「規制改革推進会議」が、建築基準法が社会実装に対するハードルにならないよう、環境配慮型コ

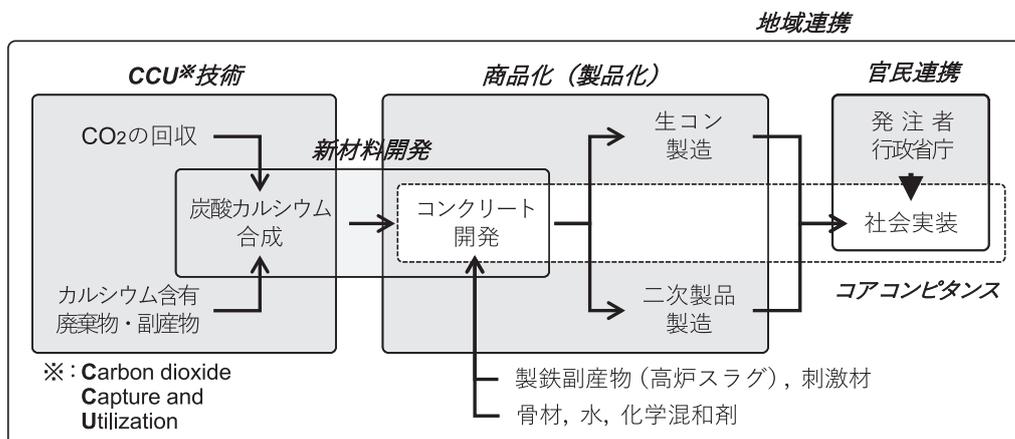


図-2 カーボンリサイクル・コンクリートの社会実装の流れ

ンクリートの社会実装に向けた検討に速やかに着手すべきであるとの考え方に沿って答申を示した²³⁾。

国土交通省はそれに基づき、例えば、建築研究所において「環境配慮型コンクリートを用いた鉄筋コンクリート部材の構造性能に関する検討」として具体的な検討を始めている²⁴⁾。

カーボンリサイクル・コンクリートの社会実装により、炭素とカルシウムに係るサーキュラーエコノミーの場が作られる。廃棄物や副産物の活用には、区域内処理の原則や運搬に係るCO₂の削減を踏まえ地産地消が望まれる。例えば愛知県などとの“地域連携”により、新しい地産地消モデルの導入について地域の環境や経済への効果も踏まえて検討を始めている²⁵⁾。

大きな枠組みでの取組みは「経済と環境の好循環」にも貢献するとして複数の賞を授かった^{26)~28)}。

脱炭素社会の実現には「移行期」が伴い、カーボンリサイクル・コンクリートを取り巻く状況も流動的である。現時点ではCO₂排出量が多いためポルトランドセメントは使用しないが、将来はその限りではない。CCU-CaCO₃についても、例えばグリーンイノベーション基金事業として²⁹⁾、製造法や製品の品質、セメントやコンクリートへの適用性が精力的に検討されており^{30),31)}、その成果を大いに期待しているが、今後、より優れたCCU材料が開発された場合には、その材料への転換もあり得る。

脱炭素社会、循環型社会の構築に貢献するため、カーボンリサイクル・コンクリートは社会実装を進める一方で、進化を継続しなければならない。

6. おわりに

CO₂を資源とするCCU-CaCO₃と製鉄副産物を主成分とする結合材を用いて「カーボンネガティブ」を達成したカーボンリサイクル・コンクリートの特徴や社会実装の状況、展望をまとめた。

本技術の開発や実装は業界内外の多くの関係者に支えられている。深謝いたします。また、成果の一部は、国土交通省関東地方整備局公募事業「現場ニーズと技術シーズのマッチング」、広島県カーボンリサイクル関連技術研究開発支援補助金による。関係各位に深く感謝いたします。



《参考文献》

1) 首相官邸 HP: 第二十三回国会における菅内閣総理大臣所信表明演説, 2020.10.26. https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/statement/2020/1026shoshinhyomei.html. (参照 2024-2-26).

- 2) 地球温暖化対策推進本部: 第45回地球温暖化対策推進本部議事要旨, 2021.4. <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/kaisai/dai45/gijiyousi.pdf>. (参照 2024-2-26).
- 3) 経済産業省: 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略, 2021.6.18. https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/pdf/green_honbun.pdf. (参照 2024-2-26).
- 4) 経済産業省: カーボンリサイクル技術ロードマップ, 2019.6 (2021.7改訂). <https://www.meti.go.jp/press/2021/07/20210726007/20210726007.pdf>. (参照 2024-2-26).
- 5) 大脇英司・萩野正貴: カーボンリサイクル・コンクリート「T-eConcrete®/Carbon-Recycle」の開発, 建設機械施工, vol.74, No.2, pp.13-17, 2022.2.
- 6) 萩野正貴・大脇英司: 炭酸カルシウムを利用したカーボンリサイクル・コンクリートの基本性状について, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.1090-1095, 2023.
- 7) 加藤優志・渡邊悟士・山本佳城・黒岩秀介: 高炉スラグ微粉末とカルシウム系刺激材を使用した環境配慮コンクリートの建築物への適用に向けた基礎物性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.1108-1113, 2023.
- 8) 加藤優志・渡邊悟士・山本佳城・今井和正・黒岩秀介: T-eConcrete®/セメント・ゼロ型, Carbon-Recycleの建築物適用に向けた基礎物性評価, 大成建設技術センター報, No.56, pp.05-1~05-7, 2023.
- 9) 加藤優志・一色裕二・坂本正義・小林 圭: セメントを使用しない環境配慮コンクリートの構造部材への適用, コンクリート工学, Vol.62, No.2, pp.150-155, 2024.2.
- 10) 今井和正・渡邊悟士・山本佳城・井之上太: CO₂排出量収支がマイナスとなる環境配慮コンクリートの建築物への適用 その1プレキャスト門扉部材への適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1314, pp.627-628, 2023.9.
- 11) 萩野正貴・大脇英司・宮原茂禎・岡本礼子: 移動式コンクリートプラントによるカーボンリサイクル・コンクリートの現場打ち舗装, 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会, V-408, 2022.9.
- 12) 吉田 泰・加藤優志・渡邊悟志・黒岩秀介・萩野正貴・大脇英司・佐藤靖昌・永田達也: 環境配慮コンクリートの建築物への適用: 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1302, pp.607-608, 2022.9.
- 13) 近藤祥太・宮原茂禎・大脇英司: CO₂吸収コンクリートを用いた根固めブロックの現地実証試験, 電力土木, No.428, pp.28-31, 2023.11.
- 14) 畑山昌之・大脇英司・松元淳一・岡本修一: 製紙工程で生じる炭酸カルシウムの環境配慮コンクリートへの適用検討, 令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会, VI-242, 2023.9.
- 15) 山本佳城・渡邊悟士・今井和正・古市 理: CO₂排出量収支がマイナスとなる環境配慮コンクリートの建築物への適用 その2プレキャスト縦ルーバー部材への適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1315, pp.629-630, 2023.9.
- 16) 渡邊悟士・今井和正・山本佳城・上田恭平: CO₂排出量収支がマイナスとなる環境配慮コンクリートの建築物への適用 その3擬石平板への適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1316, pp.631-632, 2023.9.
- 17) 大脇英司・萩野正貴・岡本礼子・宮原茂禎: カーボンリサイクル・コンクリートを用いた天然石材調ブロックによる舗装の事例, 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会, V-407, 2022.9.
- 18) 坂本 淳・萩野正貴・大脇英司・岡本礼子・渡邊悟士・加藤優志: 繊維を添加したカーボンリサイクル・コンクリートのプレキャスト部材への適用検討, 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会, V-409, 2022.9.
- 19) 土木学会コンクリート委員会: 混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー152, 土木学会, 2018.9.
- 20) コンクリート工学協会: JCI規定集1977-2002年度, pp.465-467, 2004.
- 21) 大成建設 HP: 環境配慮コンクリート「T-eConcrete®」の普及展開に向け研究会を設立, 2021.1.12. https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2021/210112_5022.html. (参照 2024-2-26).
- 22) 木ノ村幸士・田中俊成・張 文博・古市 理・井坂匠吾: 環境配慮3Dプリンティング配合の開発と実適用, 令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会, V-340, 2023.9.
- 23) 内閣府 規制改革推進会議: 規制改革推進に関する答申～転換期におけるイノベーション・成長の起点～, 2023.6.1.
- 24) 建築研究所: 共同研究者の募集を行います「環境配慮型コンクリートを用いた鉄筋コンクリート部材の構造性能に関する検討」, 建築研究所ニュース, 2024.1.12.
- 25) 愛知県 HP: 企業から提案のあった「CO₂コンクリート固定化技術を

用いた域内カーボンリサイクルプロジェクト」を支援します，2024.2.9. <https://www.pref.aichi.jp/press-release/aichi-cn-3.html>, (参照 2024-2-26).

- 26) 環境省：令和4年度気候変動アクション環境大臣表彰，開発・製品化部門，2022.12.5.
- 27) 科学技術と経済の会：第11回技術経営・イノベーション大賞 科学技術と経済の会会長賞，2023.2.13.
- 28) 内閣府ほか：第6回日本オープンイノベーション大賞 選考委員会特別賞，2024.2.14.
- 29) NEDO-HP：グリーンイノベーション基金事業概要，<https://green-innovation.nedo.go.jp/about/>，(参照 2024-2-26).
- 30) 荻野正貴・松元淳一・宮原茂禎・近藤祥太・畑 明仁・明渡翔太・池田千博・本田和也・小西正芳：リサイクル炭酸カルシウムを添加したコンクリートを用いた二次製品の製造（その1），令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会，V-589，2023.9.
- 31) 畑 明仁・松元淳一・橋本 理・宮原茂禎・近藤翔太・天野元輝・本田和也・小西正芳：リサイクル炭酸カルシウムを添加したコンクリートを用いた二次製品の製造（その2），令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会，V-590，2023.9.

[筆者紹介]

大脇 英司（おおわき えいじ）
大成建設㈱ 技術センター
T-eConcrete 実装プロジェクトチーム
荣誉研究員



加藤 優志（かとう ゆうし）
大成建設㈱ 技術センター
都市基盤技術研究部 構造研究室
主任



宮原 茂禎（みやはら しげよし）
大成建設㈱ 技術センター
社会基盤技術研究部 材工研究室
課長

