

低炭素型カルシア人工石の開発と CO₂削減効果の検討

田村 勇一朗¹・山崎 彩花²・田中 裕一²

¹ 正会員 五洋建設株式会社 環境事業部 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)
E-mail: Yuuichirou.Tamura@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)
² 正会員 五洋建設株式会社 環境事業部 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)

港湾の脱炭素化に向けて建設資材由来の CO₂ 削減が大きな課題であり、低炭素型材料の開発や実用化が求められている。一方で、カルシア人工石は浚渫土や製鋼スラグ等の副産物から製造した代替石材であり CO₂ 排出量はコンクリート等と比べて低い特徴がある。本研究では、このカルシア人工石に炭素素材を添加・固定することで CO₂ 吸収型人工石(炭素固定人工石)の開発を試みた。炭素固定人工石は一定範囲の添加量では軟石や準硬石相当の強度を示し、適度に CO₂ 固定した製鋼スラグで置換すると強度増加が認められた。またワカメを用いた海域生育試験ではコンクリート同等以上の生長が確認され藻礁ブロック等への適用可能性が示唆された。脱炭素の観点では、藻場造成工事に導入することで、施工・共用後の合計排出量は-20t-CO₂とカーボンネガティブになる試算結果が得られた。

Key Words : *artificial stone, dredged soil, steel-making slag, negative emission technologies, carbon dioxide storage, blue carbon*

1. はじめに

2050 年ゼロエミッションに向けて港湾の脱炭素化を目的としたカーボンニュートラルポートの形成が進められており、海洋土木分野においても建設時に生じる CO₂ 排出量削減策が求められている¹⁾。一方で、港湾工事における CO₂ 排出量の大部分は機械稼働等に比べて、コンクリートや鋼材、石材等の材料製造に起因する報告があり²⁾、今後は CO₂ 排出量削減に資する低炭素型材料の新技术開発や工事への導入・実装が喫緊の課題である。

コンクリート分野ではセメント製造の CO₂ 排出量が産業全体に占める割合も多く、低炭素型コンクリートの開発が先行しており、木質バイオマスを混和した環境配慮型コンクリート³⁾や CO₂ 固定型特殊混和材を添加した高流動コンクリート⁴⁾等が建設現場に適用されている。

脱炭素の観点では、CO₂ 排出量が高いコンクリート代替材料の活用も効果的である。港湾分野では製鉄過程で生じる副産物である製鋼スラグが挙げられる。その用途として転炉系製鋼スラグと浚渫土、結合材(高炉セメントや高炉スラグ微粉末等)、水等を混練し水和固化後に破碎する浚渫土固化体(カルシア人工石)がある⁵⁾。軟弱な浚渫土を有効利用した天然石代替材やブロック製造技術であり、魚礁・藻礁石として海域投入がされている⁶⁾。

本研究では、このカルシア人工石に対して炭素素材を

添加し炭素固定することでカーボンネガティブな人工石(炭素固定人工石)の開発を目指した。まず炭素固定人工石の強度特性や海藻生育基盤性等の基本的な性能を確認した。さらに工事適用時の脱炭素効果を検討するため、CO₂ 排出原単位や炭素固定人工石を活用した場合の施工や共用過程での CO₂ 排出・吸収量の試算と評価を試みた。

2. 方法

(1) 室内配合試験

a) 炭素固定人工石の概要

炭素固定人工石の開発構想は、カルシア人工石(人工石)に添加した炭素素材が人工石とともに固化・不溶化して流失や飛散が抑制されることで、安定的に炭素固定される代替石材とした。力学的な材料性能は、一軸圧縮強さが準硬石(9.8N/mm²)や軟石(3.0~9.8N/mm²)相当とし、施工時における適用・用途は、藻場礁・魚礁マウンド材、被覆石、潜堤等の海中利用を想定した。

b) 添加する炭素素材

炭素固定手法には、光合成により大気中の CO₂ を吸収固定したバイオマス由来と、鉱物等に含まれる Ca 成分に CO₂ を反応させ CaCO₃ として無機化学的に固定するものがある⁷⁾。本試験では、図-1 に示す固定化作用を基

に表-1の炭素素材(方法)を添加対象とした。なおCaを主成分とする製鋼スラグは、水和・炭酸化でのCO₂吸収固定能力⁸⁾を利用し、含有するCaCO₃塩を固定対象とした。

c) 配合条件・方法

炭素素材添加と発現強度の関係を確認するため、表-2,3に示す材料及び配合条件の人工石に無添加と炭素素材を外割りで3水準添加する配合試験を行った。浚渫土は自然含水比(w_n)と液性限界(w_L)との相対含水比 w_n/w_L が2.5となる164%に加水調整し混合率は50 vol%とした。高炉スラグ微粉末は、カルシア人工石の強度管理⁵⁾に用いる強度指数が1.0となる配合量とした。炭素固定人工石は浚渫土と製鋼スラグ、高炉スラグ微粉末に各炭素素材を添加混合した。CO₂固定スラグは、製鋼スラグをCO₂培養器(CPE-2201:ヒラサワ製)に10mm厚で敷設しCO₂濃度20%、温度25℃、湿度80%で15分、25分、180分間暴露した。また海藻は約1mm片に細断し使用した。

d) 試験・分析

各人工石は配合後に試験用型枠(φ50mm×h100mm)に装填し室温20℃で封緘養生し材齢28日目で一軸圧縮試験(JISA1216:N=2/各水準)に供した。また、炭素素材の炭素含有率に関して、分析試料は110℃昇温設定した水分分析装置(TGM800:LECO製)により含水比を求め、粉砕・均一化した後、CNS元素分析計(CNS928:LECO製)により測定した。また、底質調査法II-4.2を準拠しTC-TOC法で、バイオマス系は有機炭素(TOC)、炭酸塩系は無機炭素(TIC)として炭素含有率を求めた。

e) CO₂固定量の算定法

炭素固定人工石のCO₂固定量は、炭素素材の固定化による炭素(CO₂)追加分と定義して式(1)により算出した。

$$\text{CO}_2\text{固定量} = CM \times \frac{C_{cm}}{100} \times 1 - \frac{w_{cm}}{(w_{cm} + 100)} \times \frac{44}{12} \quad (1)$$

ここに、CO₂固定量:人工石1m³当たりのCO₂固定量(kg-CO₂/m³)、CM:炭素素材添加量{製鋼スラグの配合量}(kg-wet/m³)、C_{cm}:炭素素材の炭素含有率{製鋼スラグに含有するTIC}(%-dry)、w_{cm}:炭素素材の含水比{製鋼スラグの含水比}(%)、44/12:CO₂/C、なお、上述の{}はCO₂固定スラグの用いた場合を示し、製鋼スラグ配合量にCaCO₃に相当するTIC含有率を乗じてCO₂固定量とした。

(2) 海藻生育試験

a) 試験体の配合・準備

炭素固定人工石の海藻生育基盤としての性能を確認するため小型試験体を製作した。試験体の配合設定は、表-2,3と同様の材料及び配合条件の人工石を含む6ケースとした(表-4)。CO₂固定スラグは、実際の排気ガスに含まれるCO₂を吸収固定する目的で、製鋼スラグを小型発電機(EU16i:ホンダ製)の排気ガスを通気するグローブバックに10mm厚で敷設し180分間暴露した。暴露時はCO₂濃度13.5%、温度20℃、湿度75%であった。

試験体は、配合後に試験用型枠(φ50mm×h100mm)に装填して20℃で封緘養生した。材齢28日で脱型後、エアレーションを加えた淡水養生に切り替え、試験開始ま

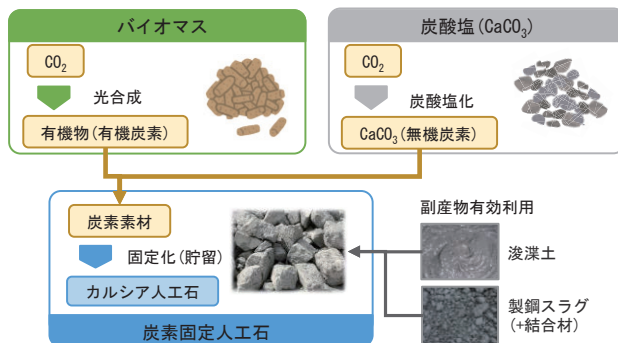


図-1 炭素固定人工石の炭素固定

表-1 添加対象とした炭素素材

炭素素材	使用材料の概要（主な用途）
炭酸塩	炭酸カルシウム 石灰石微粉末（CO ₂ 固定型の高流動混和材 ⁴⁾ ）
CO ₂ 固定スラグ	転炉系製鋼スラグ（人工石の主材料） ※CO ₂ 固定した製鋼スラグとして利用
バイオマス	もみ殻燐炭 炭化後のもみ殻（土壌改良・バイオ炭利用）
もみ殻	脱穀残渣（土壌改良・バイオマス燃料利用）
堆肥	食品残渣系特殊堆肥（堆肥・炭素貯留利用）
海藻	生アオサ（食用・バイオマス利用）

表-2 使用材料の物性

浚渫土		
項目	単位	物性値
土粒子密度	g/cm ³	2.624
細粒分含有率	%	91.8
自然含水比	%	72.7
液性限界	%	65.4
強熱減量	%	7.5
製鋼スラグ（未エージング材）		
項目	単位	物性値
表乾密度	g/cm ³	3.01
配合粒径	mm	< 9.5
遊離石灰	%	8.4

表-3 配合・添加条件

ケース	浚渫土 kg/m ³	スラグ kg/m ³	結合材 kg/m ³	炭素素材				湿潤密度		
				g/cm ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	g/cm ³	kg/m ³	kg/m ³
無添加	666	1,075	413				0			2.153
CO ₂ 固定スラグ*	666	1,075	413	-	54	81	108	2.153	2.153	2.153
炭酸カルシウム	666	1,075	413	2.70	150	250	500	2.182	2.200	2.239
もみ殻燐炭	666	1,075	413	0.55	25	50	100	2.084	2.020	1.907
もみ殻	666	1,075	413	1.40	10	25	50	2.148	2.140	2.127
堆肥	666	1,075	413	0.60	25	50	100	2.091	2.034	1.932
海藻（生アオサ）	666	1,075	413	1.03	100	200	300	2.055	1.972	1.901

*CO₂固定スラグの添加量 (kg-CaCO₃) = TIC(%) / 100 × 100 / 12 (CaCO₃/C) × 製鋼スラグ配合量 (1,075kg)、
CO₂固定率TIC(%) : +0.6%(15分), +0.9%(25分), +1.2%(180分)

で養生水は1回/週程度の頻度で全換水を行った。

b) ワカメ遊走子の着生・培養

対象海藻種は、日本全国に生育し種苗培養や養殖手法も確立されているワカメ *Undaria pinnatifida* とした。2023年4月に孢子葉を岩手県気仙沼湾の養殖ワカメから調達した。孢子葉は陰干し後に海水水槽(人工海水;塩分30‰)に浸漬し遊走子を放出させた。孢子葉回収後に試験体(N=1/ケース)を30分浸漬させ遊走子を着生させた。試験体は室内水槽(人工海水100L;塩分28~30‰)に移設し、水温16~18℃、照度1.0~3.0k luxで発芽初期まで培養した。5月以降は水温27℃、照度0.5k lux以下で休眠状態とした。休眠中は水質を一定管理し、適宜、水槽容積1/4程度の換水を行った。10月下旬に休眠解除し目視可能な幼葉(h=5mm程度)まで室内培養した(写真-1)。

c) 海域生育試験

ワカメの海域生育試験は、名古屋港潮見町に位置する名古屋土壌再利用センター水域占有内の積込用棧橋部で行った。同年11月上旬にワカメ幼葉が育つ試験体を海中移植した。試験体は生育水深が水面下1.0mとなる水平筏方式で固定用ロープに0.2m間隔で配置した。また、水平筏は棧橋桁部から垂下したロープで係留した(図-2)。

d) モニタリング

試験体の海中移植後、モニタリングは2023年12月から2024年3月間に毎月1回行った。測定項目はワカメ個体数と湿重量とし、生体写真の画像解析(ImageJ)により同一試験体の上面(A=20cm²)を計数追跡した。3月には上

面のワカメを刈り取り各試験体当たりの湿重量を測定した。代表的な成熟ワカメ(N=3)は、葉状部・茎部・孢子葉部・仮根部ごとに湿重量を測定し、炭素素材と同じ分析機械及び方法で含水比と炭素含有率を分析した。

(3) 材料当たりのCO₂排出量の検討

炭素固定人工石のCO₂排出量削減効果を検討するために、材料製造に伴うCO₂排出原単位を「港湾空港技術研究所資料No.1399²⁾」を基に積み上げ法で算出した。炭素固定人工石の算出条件は、室内配合試験の配合量や添加条件を引用した(表-2,3)。炭素固定人工石のCO₂排出原単位算出に用いた原材料や従来材料(比較対照)のCO₂排出原単位を表-5に示す。なお、浚渫土のCO₂排出原単位は、浚渫工事が主目的と取り扱い0.0kg-CO₂/tとした。

(4) 藻場造成工事におけるCO₂削減効果の試算

本検討では、低炭素型材料への代替効果に関して施工と供用後のプロセス全体での評価を試みた。CO₂排出量は「原材料の製造・運搬」、「人工石製造」「工事(機械稼働)」,CO₂吸収源は「炭素固定人工石でのCO₂固定」、「ブルーカーボン」を計算対象とした。

試算条件として、工事は姫路市網干地区土砂処分場護岸のカルシア改質土浅場¹⁾において天端面に藻礁石を投入する藻場造成を想定とした(表-6)。藻礁石は、人工石(無添加)及び2種類の炭素固定人工石(もみ殻燐炭50kg/m³、炭酸カルシウム200kg/m³)の3ケースを設定した。

CO₂排出量試算に関して、「原材料の製造」は表-5に示す原材料のCO₂排出量を用いた。「原材料の運搬」について、製鋼スラグと高炉スラグ微粉末は瀬戸内製鉄所広畑

表-4 海藻生育試験ケース

ケース		添加量 kg/m ³	CO ₂ 固定量 kg-CO ₂ /m ³
カルシア人工石	無添加	0.0	0.0
炭素固定人工石	もみ殻燐炭	30.0	13.7
	海藻	70.0	13.2
	CO ₂ 固定スラグ ^{*1}	95.5	42.0
	炭酸カルシウム	200.0	24.2
コンクリート	比較対照 ^{*2}	-	-

*1: TiO₂含有率(1.1%・C)、含水比(5.8%)、スラグ配合量(1,075kg)

*2: 高炉セメント(B)358kg/m³、砂614kg/m³、砂利648kg/m³、水205kg/m³



a: 孢子葉



b: 遊走子着生



c: 孢子体
(休眠解除後)



d: 培養水槽
(水量100L)

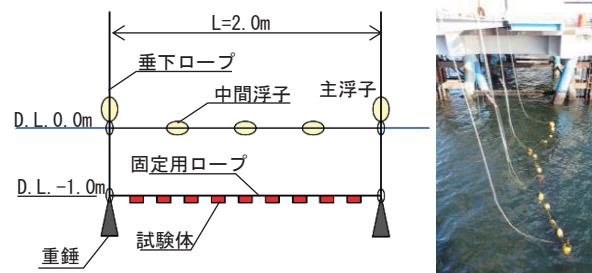


e: 試験体
(水槽培養中)



f: ワカメ幼葉
(CO₂固定スラグ)

写真-1 ワカメ室内培養状況



[試験詳細図]

[水平筏]

図-2 海域生育試験の概要

表-5 各材料のCO₂排出原単位

構成材料	単位	CO ₂ 排出量
カルシア人工石		
浚渫土	kg-CO ₂ /t	0.0
製鋼スラグ ^{*1}	kg-CO ₂ /t	2.6
高炉スラグ微粉末 ^{*1}	kg-CO ₂ /t	39.6
比較対照材料		
天然石材 ^{*2}	kg-CO ₂ /m ³	20.1
コンクリート ^{*1}	kg-CO ₂ /m ³	219.0

*1は9)より、*2は10)を基に比重2.5kg/m³と想定

地区, もみ殻燐炭はバイオ炭¹²⁾を製造する奈良県吉野郡, 炭酸カルシウムはCO₂固定型の軽質炭酸カルシウム混和剤の製造設備¹³⁾がある滋賀県湖南市とし, 各運搬距離をトンキロ法¹⁴⁾により燃料消費量を算出した。なお, 浚渫土について同製鉄所の航路浚渫から夢前岸壁への運搬過程は別プロセス(維持浚渫)として計算対象外とした。

「人工石製造」は夢前岸壁での現地プラント(製造能力300m³/日)の設置・製造, 「工事(機械稼働)」は人工石の運搬・投入・均し作業とし, 港湾請負工事積算基準¹⁵⁾及び建設機械等損料算定表¹⁶⁾を参考に各過程の燃料消費量を算出した。これらの各項目の燃料消費量に環境省が公表する排出係数¹⁷⁾を乗じてCO₂排出量へ換算した。

CO₂吸収源に関して, 「炭素固定人工石でのCO₂固定」は, 人工石のCO₂排出量から各炭素固定人工石のCO₂固

表-6 CO₂削減効果試算の条件
(*1:19), *2:18)より引用)

区分	試算条件
工事	施工面積 A=10,000m ²
	施工厚さ:1.0m (天端面:D.L.-2.5m)
	積出岸壁から施工箇所間の片道距離:6.5km
製材料	人工石製造量:6,667m ³ (かさ比重1.5想定)
	試算項目:プラント運搬・組立・解体, 調泥, 人工石混練・打設・破碎・積込・運搬・仮置
材料運搬	製鋼スラグ:片道4km(瀬戸内製鉄所～夢前岸壁)
	高炉スラグ微粉末:片道4km(製鋼スラグと同条件)
	もみ殻燐炭:片道174km(奈良県吉野郡～夢前岸壁)
	炭酸カルシウム:片道167km(滋賀県湖南市～夢前岸壁)
ブルーカーボン	対象藻場:ワカメ場(被度階級5:被度75~100%)
	試算年数:20年
	藻場造成面積:10,000m ²
	含水率, 炭素含有率(TOC):海藻生育試験測定値
	P/B比:1.3文献値 ^{*1)} の平均値
	残存率①②:文献値(①:海藻藻場, ②:ワカメ場) ^{*2)}
	生態系への変換係数:文献値(海藻藻場) ^{*2)}

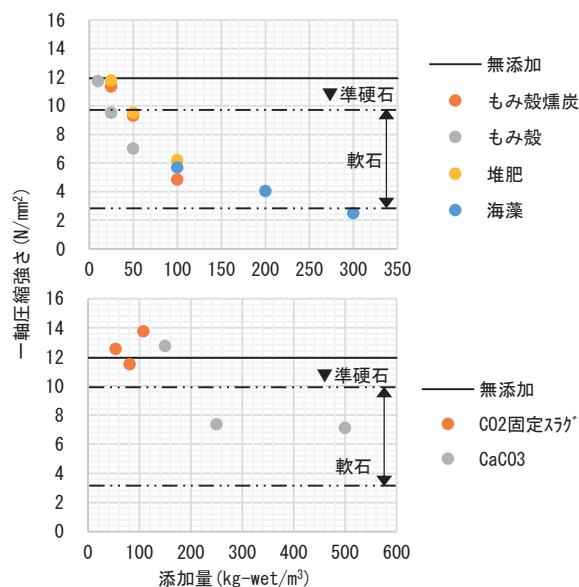


図-3 炭素素材の添加と強度(σ28)の関係
(上:バイオマス, 下:炭酸塩)

定量を減じて算出した。「ブルーカーボン」は, Jブルークレジット認証申請の手引き¹⁸⁾の藻場生態系の算定式を参考に, 本検討の藻場造成面積に吸収係数を乗じて試算した。各項目の試算条件を表-6に示す。

3. 結果

(1) 室内配合試験

a) 添加量と強度発現

表-3に示すケースの一軸圧縮試験の結果, バイオマス系炭素素材を添加した場合, 添加量の増加とともに強度は低下するものの, 一定の添加範囲においては軟石相当以上の強度を満たすことが明らかとなった。一方で, 炭酸塩系(CO₂固定スラグと炭酸カルシウム)のケースでは, 添加量 54~150 kg/m³ 範囲で準硬石相当の無添加人工石と同等かそれ以上の強度を示し, また, 全添加範囲内で少なくとも軟石相当以上の強度が確認された(図-3)。

b) 炭素固定人工石(CO₂固定スラグ)の組織観察

強度増加を示した炭素固定人工石の微細組織を SEM-EDS(SU5000:日立製)を用いて観察した。観察対象は炭素固定人工石(CO₂固定スラグ 81 kg/m³ 添加)と無添加人工石とし材齢 28 日で SEM に供した。その結果, これらの人工石は破断面形態が異なり, 炭素固定人工石にはケイ酸カルシウム水和物(C-S-H 等)と CaCO₃ が混在する可能性が示唆された(写真-2)。この追加固定された CaCO₃ が強度増加に何らかの関与をしている可能性が考えられた。

(2) 海藻生育試験

海藻生育試験における生育個体数の時系列変化を図-4

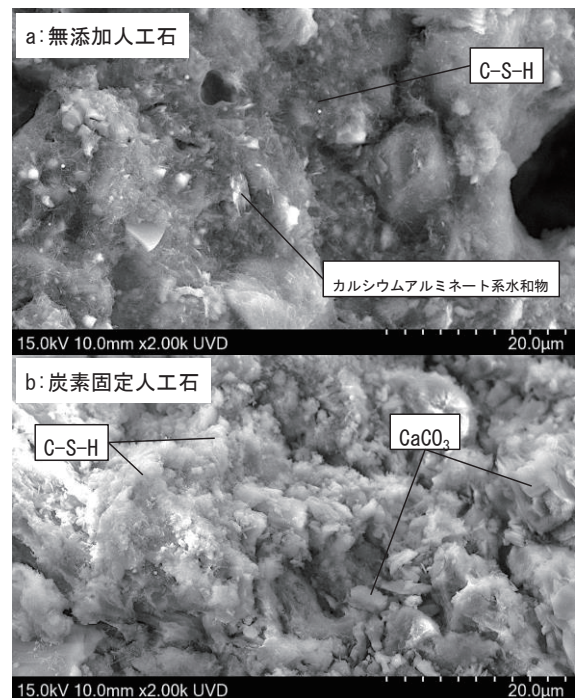


写真-2 SEM による二次電子像

に示す。個体数に関して、12月の炭素固定人工石(88~133 ind./体)は人工石(85 ind./体)と比べて同等かそれ以上の傾向であったが、3月は概ね26~32 ind./体に収束した。一方で、コンクリートは全期間で低い傾向(7~26 ind./体)であり、これらの人工石とコンクリートの生育個体数の相違は、基質表面の粗度の影響⁹⁾の可能性も考えられた。また湿重量に関して、炭素固定人工石はもみ殻燐炭、海藻、炭酸カルシウム、CO₂固定スラグの順に多く、いずれも人工石やコンクリートよりも多く、3月時には全ケースで孢子葉の形成も確認された。(図-5、写真-3)。

ここまで、炭素固定人工石の発現強度や海藻生育性能を確認した。添加量を制御することで軟石・準硬石相当の代替石材となる可能性があり、小型試験体ではあるものの、ワカメ着生~成熟段階でコンクリートや人工石同等以上の生長状況が確認された。以上のことより、藻礁等へ従来材料と同様に適用可能であることが示唆された。

(3) 材料当たりのCO₂排出量

炭素素材の含水比、炭素含有率の分析結果及びCO₂固定量の算出結果を表-7に示す。準硬石や軟石相当の強度が得られた50 kg/m³添加の場合で比較すると、CO₂固定

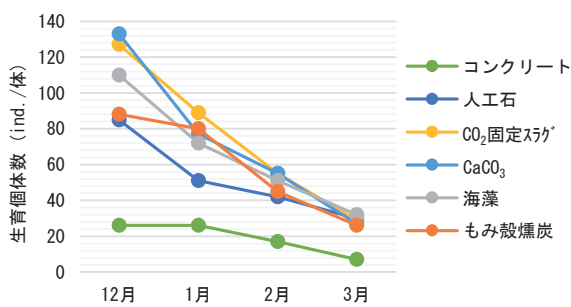


図-4 生育個体数の時系列変化

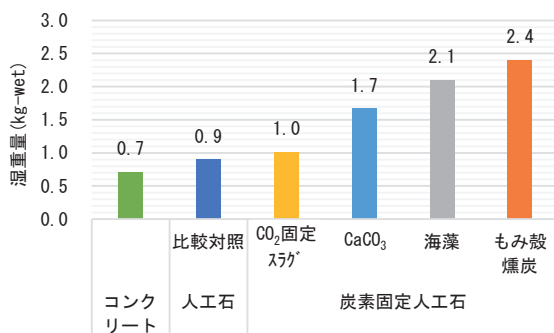


図-5 各ケースのワカメ合計湿重量(2024年3月)



写真-3 炭素固定人工石のワカメ生長状況(2024年3月)

量ともみ殻燐炭が最も高く、海藻は乾湿比の影響で低い値となった。炭酸塩系添加材は20 kg-CO₂/m³程度のCO₂固定量が求められた。これらの結果と室内配合条件(表-3)、CO₂排出原単位(表-5)を基に材料当たりのCO₂排出量の試算した(図-6)。人工石は、無添加の段階で副産物を使用するためコンクリートに比べて排出量は低くなり、天然石材と同等程度の試算値となった。さらに炭素素材の添加によって排出量が0.0 kg-CO₂/m³付近かそれ以下となり、最大で-62.7 kg-CO₂/m³(もみ殻燐炭)と、炭素固定人工石はCO₂吸収型の代替石材となる試算が得られた。

(4) 藻場造成工事におけるCO₂削減効果

施工と供用後のCO₂排出(吸収)量の試算結果を表-8に示す。原材料運搬過程のCO₂排出量について、製鋼スラグと高炉スラグ微粉末は合計1.5 t-CO₂、もみ殻燐炭と炭酸カルシウムは10.0 t-CO₂、38.5 t-CO₂であり陸送運搬距離が増加要因となった。工事過程では合計236.2 t-CO₂で石材均しが72%を占め、人工石製造過程では合計171.6 t-CO₂のうち混練や打設、運搬がCO₂排出量の大部分(83%)を占めた。また、ブルーカーボン創出によって9.2 t-CO₂(20年間)のCO₂吸収量が見積もられた。

これらの試算結果に原材料製造時のCO₂排出量を加えた炭素固定人工石のCO₂削減効果を図-7に示す。人工石は、製造時のCO₂排出量が加算されるが炭素固定により合計CO₂排出量は0 t-CO₂付近となり、さらに、ワカメ場(ブルーカーボン)が形成された場合、プロセス全体で合計排出量は-20 t-CO₂となった。以上の試算結果から、

表-7 炭素素材のCO₂固定量

添加材	炭素含有率 %-dry	含水比 %	添加量 kg/m ³	CO ₂ 固定量 kg-CO ₂ /m ³
CO ₂ 固定スラグ*	12.0	5.8	50	20.8
CaCO ₃ *	12.0	0.1		22.0
もみ殻燐炭	46.1	3.2		81.9
もみ殻	34.9	9.3		58.6
堆肥	13.0	64.4		14.5
海藻(生アオサ)	23.5	887.5		4.4

*炭素含有率: CaCO₃1mol中に含まれるCの式量に換算

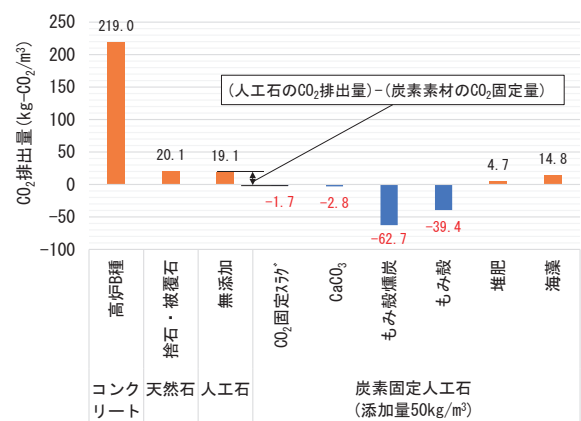


図-6 各材料のCO₂排出量の試算結果

天然石材を炭素固定人工石で代替することで港湾構造物建設時のCO₂削減に大きく寄与する可能性が示唆された。

同様に、プロセス全体でCO₂排出量が0t-CO₂となるカーボンニュートラル(CN)を達成する時の炭素固定人工石の添加量と発現強度について本研究で得られた結果から試算した。その結果、もみ殻燐炭は添加量50.1kg/m³で強度9.3N/mm²、炭酸カルシウムは添加量196.3kg/m³で強度10.4N/mm²であり、いずれのケースにおいても、捨石や被覆石に対応する準硬石相当の強度が得られるものと考えられた(図-8)。

4. まとめ

・材料強度や海藻生育性能について

カルシア人工石に炭素素材を添加しCO₂固定する炭素固定人工石は、一定範囲内の添加量において軟石または

準硬石相当の強度を満たした。また、適度な炭酸塩添加による強度増加も確認され、内部組織の空隙率の変化等の増加要因を調べる必要がある。ワカメを用いた海域生育試験では、コンクリートや人工石と同等かそれ以上の生育状況であり、胞子葉(成熟個体)の形成が確認された。

・炭素固定人工石の使用によるCO₂削減効果

藻場造成工事に炭素固定人工石を用いた場合を想定して脱炭素効果を試算した結果、施工・材料・共用後のプロセス全体における合計排出量は-20t-CO₂(炭酸カルシウム添加)であり、ブルーカーボンと合わせてカーボンネガティブとなる可能性が示唆された。

今後は、工事実装に向けて現場実装レベルでの技術検証を進めるとともに、炭素添加に伴う追加コストの試算を含めた評価が必要となる。また、港湾工事での脱炭素に向けて、各現場での配合・製造条件に合わせた本技術の試行や実績の蓄積が重要になると考えられる。

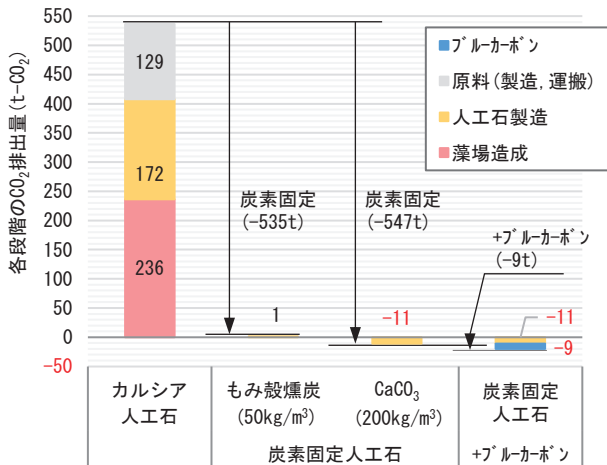


図-7 藻場造成によるCO₂削減効果の試算

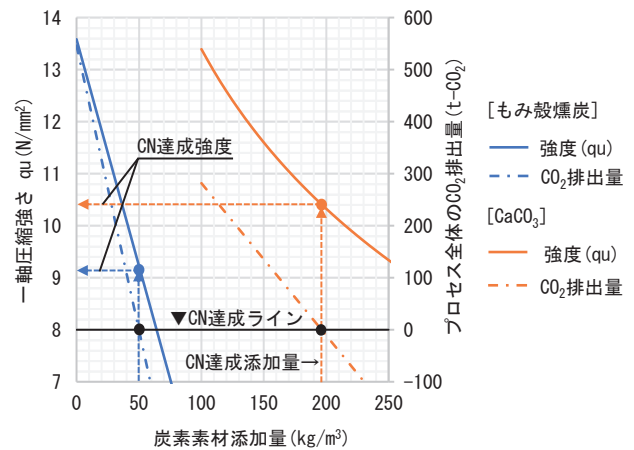


図-8 カーボンニュートラル(CN)となる添加量・強度

表-8 施工及び共用時におけるCO₂排出(吸収)量の内訳

計算区分	材料・原材料	材料・計算条件	使用量 t	運搬距離 km	排出係数 g-CO ₂ /tkm	CO ₂ 排出量 t-CO ₂
原材料(製造)	人工石	無添加, 配合: 表-2, 3参照	6.667m ³ × 19.1kg-CO ₂ /m ³			127.3
	炭素固定人工石	もみ殻燐炭50kg/m ³	6.667m ³ × -62.7kg-CO ₂ /m ³			-418.0
		炭酸カルシウム200kg/m ³	6.667m ³ × -68.8kg-CO ₂ /m ³			-458.7
原材料(運搬)	製鋼スラグ	トンボ法(内航船)	7.167	4	39	1.1
	高炉スラグ微粉末	トンボ法(内航船)	2.753	4	39	0.4
	もみ殻燐炭	トンボ法(営業用普通車)	333	174	173	10.0
	炭酸カルシウム	トンボ法(営業用普通車)	1,333	167	173	38.5
計算区分	作業区分	使用機械	燃種*2	作業日数 日	燃料消費量 L/日	CO ₂ 排出量 t-CO ₂
藻場造成 (機械稼働)	石材運搬・投入	起重機船(鋼120t吊), 1000m ³ 台船x2	A重油	9.8	510	4.998
		引船(鋼D700PS型)x2	A重油	9.8	880	17.248
		潜水士船(D180PS型 3~5t吊)x1	A重油	9.8	162	1.588
		潜水士船(D180PS型 3~5t吊)x10	A重油	38.3	162	62.069
	浅瀬土調泥解泥	バックホウ(0.8m ³ 級)x1, 発電発電機(125kVA)x1	軽油	22.2	258	5.727
人工石製造 (機械稼働)	人工石混練	バックホウ(0.8m ³ 級)x1, ホイローダ(3.3m ³ 級)x1, 発電発電機(200kVA, 400kVA)x1	軽油	22.2	1,018	22,630
	人工石打設	バックホウ(0.8m ³ 級)x3, 不陸地運搬車(11t積級)x1	軽油	22.2	751	16,691
	人工石破碎	バックホウ(0.8m ³ 級:大型ブレード)x1	軽油	22.2	100	2,230
	人工石積込・運搬・仮置	ホイローダ(3.3m ³ 級)x1, 不陸地運搬車(11t積級)x1, バックホウ(0.8m ³ 級)x1	軽油	22.2	670	14,897
	プラント組立・解体	ラフレンクレーン(50t吊)x1(台・日)	軽油	22.0	138	3,036
	プラント運搬	ラフレンクレーン(50t吊)x1(台・日)	軽油	2.0	138	276
ブルーカーボン	ワカメ	含水率90.4%, 炭素含有率23.3% (本試験の実測値)	1.0ha × 38.3t/ha × 0.032 × 20年*1			-9.2

*1 CO₂吸収量=藻場分布面積×単位面積当たりの湿重量×藻場のCO₂換算ブルーカーボン残存率¹⁸⁾×試算年数

*2 排出係数 A重油:2.75, 軽油:2.62(tCO₂/kL)

REFERENCES

- 1) 港湾工事における二酸化炭素排出量削減に向けた検討 WG : 港湾工事における二酸化炭素排出量算定ガイドライン(施工段階編(試行工事用)), 2023 年. https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_tk5_000046.html (閲覧日 : 2024 年 3 月 25 日) [Guidelines for calculating carbon dioxide emissions in port construction (construction stage edition (for trial construction)), 2023]
- 2) 中村堇, 川端雄一郎, 辰巳大介 : 港湾構造物の建設時における CO₂ 排出量算定に関する基礎検討-工事実施前での CO₂ 排出量算定のための手法の整理と試算-, 港湾空港技術研究所資料, No.1399, 2022. [Nakamura, S., Kawabata, Y. and Tatsumi, D.: Fundamental study on the calculation of CO₂ emissions from construction of port structures -Investigation on the pre-estimation method and trial calculation of CO₂ emissions from construction of port structures-, *Technical note of the Port and airport re-search institute*, No. 1399, 2022.]
- 3) 山本伸也, 幸田圭司, 清水和昭, 田中博一, 久保昌史 : 環境配慮型コンクリート「SUSMICS-C」の開発-バイオ炭を混和して炭素を貯留-, 清水建設研究報告, 第 101 号 2023 年 12 月, pp.15-24, 2023. [Yamamoto, S. Yukita, K. Shimizu, K. Tanaka, H. and Kubo, M.: Eco-Friendly Concrete [SUSMICS-C] -Mixing with Biochar to Store Carbon-, *Technical research report of Shimizu Construction Co., Ltd.*, Vol.101, pp.15-24, 2023.]
- 4) 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, 第 62 巻, 第 11 号, pp.79-82, 2021. [Sasaki, T. Yagi, T., Ecotancal Eco-friendly light calcium carbonate made from CO₂, *the doboku-seko*, Vol.62, No.11, pp.79-82, 2021.]
- 5) 辻匠, 田中裕一, 中川雅夫, 野中宗一郎, 長尾喬平, 赤司有三, 木曾英滋, 田崎智晶 : 浚渫土人工石の材料特性と製造技術, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 71 巻 2 号, pp.I_1173-I_1178, 2015. [Tsuji, T. Tanaka, Y. Nakagawa, M. Nonaka, S. Nagao, K. Akashi, Y. Kiso, E. Tasaki, Y., Materials properties and production technology of artificial stone using the dredged soil, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering)*, Vol.71, No. 2, pp. I_1173-I_1178, 2015.]
- 6) 宮向智興, 今尾和正, 田崎智晶, 赤司有三, 鈴木輝明, 田中義人 : 浚渫土と鉄鋼スラグを用いた人工石への生物増集効果に関する天然石との比較, 水産工学, 57 巻, 1 号, pp.11-25, 2020. [Miyamukai, T. Imao, K. Tasaki, T. Akashi, Y. Suzuki, T. Tanaka, Y. Comparison of Artificial Rock Using Dredged Soil and Steel Slag with Natural Rock on the Effect of Biological Gathering, *Fisheries Engineering*, Vol.57, No.1, pp.11-25, 2020.]
- 7) ネガティブエミッション市場創出に向けた検討会 : ネガティブエミッション市場創出に向けた検討会とりまとめ, 2023 年. https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/negative_emission/006.html (閲覧日 : 2024 年 3 月 25 日) [Summary of study group aimed at creating negative emissions market, 2023]
- 8) 松井俊介 : 製鋼スラグ中のカルシウム化合物の安定化技術, 日本製鉄技報, 415 号, pp.94-99, 2020. [Matsui, S. Stabilization of Calcium Compounds in the Steelmaking Slag, *Japan steel works technical review*, Vol.415, pp.94-99, 2020]
- 9) 中村堇, 川端雄一郎, 森川忠泰, 石澤武紘, 木村匡伯 : 鉄鋼スラグ水和固化体の護岸ブロックへの適用による CO₂ 排出量削減効果に関する一検討, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 79 巻 18 号, ID: 23-18044, 2023. [Nakamura, S. Kawabata, Y. Morikawa, T. Ishizawa T. Kimura, M., A study on CO₂ emission reduction by application of steel-making slag concrete to revetment blocks, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering)*, Vol.79, No.18, ID: 23-18044, 2023.]
- 10) 山下真奈, 川端雄一郎, 中村堇, 岡部昇 : CO₂ 排出量の観点からの岸壁における構造形式の選定に関する一考察, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 79 巻 18 号, ID: 23-18065, 2023. [Yamashita, M. Kawabata, Y. Nakamura, S. Okabe, H., A study on the selection of structural type of quay walls in terms of CO₂ emissions *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering)*, Vol.79, No.18, ID: 23-18065, 2023.]
- 11) 中川雅夫, 安藤満, 今村均, 木曾英滋, 眞鍋忠司 : カルシア改質土を適用した大規模浅場造成工事の概要とモニタリング調査報告, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 76 巻 2 号, pp.I_834-I_839, 2020. [Nakagawa, M. Ando, M. Imamura, H. Kiso, E. Manabe, C., Report on construction method and monitoring survey of large-scale shallows using calcia improved soil, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering)*, Vol.76, No.2, pp. I_834-I_839, 2020.]
- 12) 古田昭二, 衣川剛央, 高木祥生, 田村繁雄, 西田葉佑子, 長澤正明, 土屋尚典, 前田敏也 : 溶融スラグとバイオ炭を用いた脱炭素型地盤改良工法(その 1)-室内試験-, 令和 5 年度土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会, VI_1024, 2023. [Furuta, S. Kinugawa, Y. Takagi, S. Tamura, S. Nishida, M. Nagasawa, M. Tsuchiya, H. Maeda, T. A decarbonizing soil improvement method using molten slag and biochar (No.1): Laboratory test, *78th Annual Academic Lecture, National Conference of the Japan Society of Civil Engineers*, VI_1024, 2023.]
- 13) 日本コンクリート工業株式会社, 出光興産株式会社 : 「コンクリートスラッジを利用した合成炭酸カルシウム製造による CO₂ 固定化実証試験」が滋賀県補助金事業として採択, 2023 年. <https://www.idemitsu.com/jp/content/100043281.pdf> (閲覧日 : 2024 年 3 月 25 日) [CO₂ fixation demonstration test by producing synthetic calcium carbonate using concrete sludge, 2023.]
- 14) 経済産業省, 国土交通省 : ロジスティクス分野における CO₂ 排出量算定方法共同ガイドライン Ver.3.1, 2016. https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/enterprise/overview/others/ (閲覧日 : 2024 年 3 月 25 日) [Ministry of Economy, Trade and Industry and Ministry of Land, Infrastructure, Joint guidelines for calculating CO₂ emissions in the logistics field Ver.3.1, 2016.]
- 15) 国土交通省港湾局 : 港湾請負工事積算基準, 2021. [Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism Ports and Harbors Bureau: Port contract construction cost estimation standards, 2021.]
- 16) 公益社団法人日本港湾協会 : 船舶および機械器具等の損料算定基準 (令和 3 年度改訂版), 2021. [The Ports & Harbors Association of Japan: Standards for calculating losses for ships, machinery, etc. (Revised version in 2021), 2021.]

- 17) 環境省：算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧,2023 年 . https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/itiran_2023_rev3.pdf (閲覧日 : 2024 年 3 月 25 日) [Ministry of Environment: List of calculation methods and emission factors in the calculation, reporting, and publication system.2023]
- 18) ジャパンブルーエコノミー技術研究組合：J ブルークレジット認証申請の手引き-ブルーカーボンを活用した気候変動体策 - Ver.2.4, 2024 年 . <https://www.blueeconomy.jp/credit/> (閲覧日 : 2024 年 3 月 25 日) [Japan Blue Economy Association :J Blue Credit Certification Application Guide.2024]
- 19) 水産庁：第 3 版 磯焼け対策ガイドライン, 2023 年. [Fisheries Agency: 3rd edition: isoyake prevention guidelines.2023]

(Received February 6, 2024)

(Accepted May 13, 2024)

DEVELOPMENT OF LOW-CARBON CALCIA ARTIFICIAL STONE AND EXAMINATION OF CO₂ REDUCTION EFFECT

Yuichiro TAMURA, Ayaka YAMAZAKI and Yuichi TANAKA

In our research, we developed a carbon-fixed artificial stone by adding and fixing carbon materials to Calcia artificial stone, a low CO₂ emission material. This stone showed strength equivalent to riprap, and increased strength when replaced with CO₂ fixed steel slag. Marine algae growth tests with *Undaria pinnatifida* suggested its potential application to algae reef blocks. When introduced into seaweed bed construction, the total emissions after construction and shared use amounted to -20t-CO₂, indicating from the calculations that it results in carbon negativity.