

報告 ブルーインフラの構築に向けた低炭素型コンクリート藻場ブロックの適用

鈴木 南都*1・西脇 智哉*2・北辻 政文*3

要旨：国土交通省が主導するブルーインフラ構築の試験適用として、ジオポリマーコンクリートおよびセメント使用量を極力抑えた低炭素型セメントコンクリートを用いて藻場ブロックを作製し、山形県酒田市酒田港の海中に設置した。また、フレッシュ性状や圧縮強度などの試験や CO₂ 排出量の試算を行った。藻場ブロックを普通ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートで作製した場合、カーボンニュートラルの達成に約 14 年が必要だが、ここで用いた低炭素コンクリートブロックの場合には、約 2～3 年で達成可能であると試算された。すなわち、ブルーカーボン生態系の保全・再生・創出に大きく貢献できることが期待される。

キーワード：ブルーインフラ、磯やけ、コンクリート藻場ブロック、低炭素、産業副産物

1. はじめに

島国である我が国は、沿岸部に豊富な海洋資源を有しており、全国の沿岸部には約 1400 種の海藻と約 50 種の海草が生息している。筆者らは、特に概ね水深 0～20 m に海藻や海草が生息する場所である「藻場」に注目した。藻場は生態系の一次生産の場であり、栄養塩吸収や波浪の静穏化などの環境保全や水産上有用な魚介類を含む多様な生物の生息の場として、直接・間接的に重要な役割を担っている¹⁾。しかし現在、この藻場が全国的に減少傾向にある。1991 年の第 4 回事前環境保全基礎調査では 2012.12 km²、1998 年の第 5 回事前環境保全基礎調査では 1424.60 km²と、文献・資料、ヒアリング、現地確認などの手法を用いて調査されており、わずか 10 年間で約 30% 減少していることが分かる^{2),3)}。その後、2021 年の藻場分布調査では以前の手法に加えて衛星画像解析も行われ、測定された藻場の面積は 1643.40 km²と報告されている⁴⁾。調査手法が異なるため単純な比較は出来ないが、少なくとも 30 年で約 20% 以上が減少していると言える。

以上のように、藻場の再生は日本の海洋資源を守るための重要な課題である。またそれだけではなく、図-1 に示すように森林等のグリーンカーボン生態系による CO₂ 固定量が 22 億トン/年であるのに対して、藻場や干潟などのブルーカーボン生態系による全体の CO₂ 固定量は 26 億トン/年であることから、森林よりも地球温暖化対策の構築に大きく貢献できると言われている^{5),6)}。これまでに実施されてきた例として、海藻の種である配偶体を培養し苗を作る技術を確認させ、海中の藻場を陸上の畑のように管理することで藻場の持続に取り組む事例がある⁷⁾。また、表面からアミノ酸が溶け出す環境活性コ

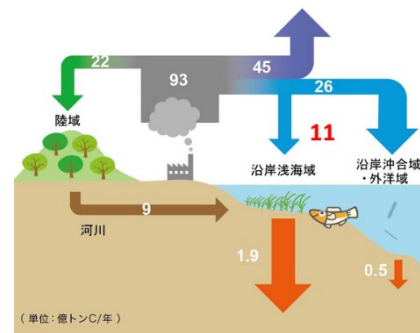


図-1 ブルーカーボン生態系による CO₂ 固定化の概略図および量⁵⁾

ンクリート (EAC) を使用した柱状のブロックを作製し、藻場を生育しつつ、ウニによる食害対策などに取り組むほか、CO₂ を吸収させた炭酸カルシウムによるカーボンリサイクル・コンクリートブロックの周りに EAC のパネルを貼り付けたブロックを作製することで、CO₂ 排出量の削減に取り組む事例もある^{8),9)}。また、北辻らは栄養塩および鉄の拡散速度をコントロールし、かつ継続的に供給できるコンクリート藻場ブロックを開発した。海洋に人工土壌を形成し、海藻の栽培を安定的に行い、豊かな生態系および水産資源の増殖に取り組んでいる^{10),11)}。2022 年の調査では、1 年でブロック 1 個当たり 150 kg の海藻が生え、CO₂ を約 20 kg 固定できると言われており、藻場の再生だけでなく、CO₂ 排出量の削減にも貢献できることが確認されている¹²⁾。

このような状況を踏まえて、国土交通省は 2022 年度より「命を育むみなとのブルーインフラ拡大プロジェクト」をスタートさせた。ブルーインフラとは、ブルーカーボン生態系および生物共生型港湾構造物のことであり、

*1 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻 (学生会員)

*2 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻 准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 宮城大学 食産業学群 教授 博士 (農学) (正会員)

全国の港湾区域内でブルーカーボン生態系の保全・再生・創出に関する先進的な取り組みを推進するものである¹³⁾。その第一弾として、山形県酒田市酒田港北港船だまりにおけるブルーインフラ実証実験が実施された。筆者らもこのプロジェクトに参加し、藻場ブロックを設置した。本報告では、藻場ブロックの作製方法や海中に設置した様子、また各種試験結果から期待される展望について報告する。特に筆者らが開発した低炭素コンクリート¹⁴⁾については、地上構造物への適用を見越して乾燥収縮試験も実施したことを報告する。

2. 藻場ブロックの作製

ブロックの材料として結合材が普通ポルトランドセメントのみであるコンクリート（以下、普通コンクリートと称す）を使用した場合、セメントのCO₂排出量原単位が極めて大きい。そのため後述のように、ブルーカーボン生態系によるCO₂固定を考慮しても、カーボンニュートラルの達成には10年以上が必要であると試算されている¹²⁾。そこで筆者らは、低炭素コンクリートを使用することで、藻場の再生と同時に短期間でカーボンニュートラルを達成可能な藻場ブロックを提案・作製した。また、普通コンクリートでもブロックを作製し、フレッシュ性状や圧縮強度、カーボンニュートラル達成までに必要な期間を比較した。今後はコンクリートの材料の違いによる藻場への影響を確認する予定である。

本報告では、普通コンクリートを用いた藻場ブロック2体（N1,N2）、セメントの大部分を混和材で置き換えたコンクリート¹⁴⁾を用いた藻場ブロック1体（C4）、セメントを使用しないジオポリマーコンクリートを用いた藻

場ブロック1体（GP）の計4体を作製した。

2.1 藻場ブロックの形状と設置物

藻場ブロックはいずれも鉄筋コンクリートとして作製した。N1,N2は写真-1に示すように蓋を含めて0.7×0.7×0.7 mの343 Lであり、内部に0.5×0.5×0.5 mの約125 Lの空間を有したブロックである。また、C4, GPは写真-2および写真-3に示すように蓋を含めて0.9×0.9×0.9 mの729 Lであり、内部に0.6×0.6×0.6 mの約220 Lの空間を有したブロックである。N1,N2は表面に人工土壌を組み込むことで、またC4, GPはふたの表面を洗い出しにより凹凸をつけることで、海藻を付着しやすくしている。ブロックの上部と側面部には直径75 mmの塩化ビニル製パイプ（以下、パイプと称す）を1本ずつ計2本組み込み、さらに上部にはN1, N2は5×400 mmの透水孔を2カ所、C4, GPは5×200 mmの透水孔を4カ所組み込んだ。パイプはクエン酸および液体肥料を入れるための穴として、透水孔は中から栄養塩と鉄が溶けだす量を調節する役割を持つ。液体肥料とは肥料成分である窒素やリンなどを多く含み、ブロックの周囲に栄養塩を拡散可能な水溶液のことである。中の空洞部には、N1, C4, GPはクエン酸0.5 kgと鉄鋼スラグ50 kgを、N2はクエン酸0.5 kgと鉄くず50 kgを設置した。クエン酸は鉄を可溶性である酸化鉄（二）（FeO）の状態に保ち、鉄鋼スラグおよび鉄くずは酸化鉄の供給源となる役割を持つ。写真-4にブロック内部の材料を示す。クエン酸は食品加工用のもので水に接すると固化する。粉体でパイプに投入した場合、パイプが閉塞してしまうことから、事前に水を加えて約300~500 gの球状に加工した。鉄鋼スラグは最大寸法40 mmの還元スラグであり、鉄くずは鉄の

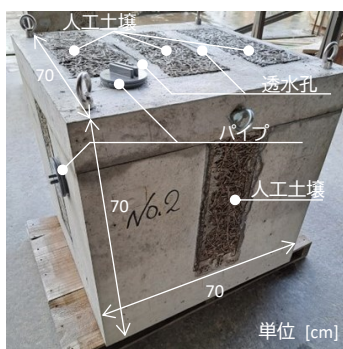


写真-1 藻場ブロック (N)

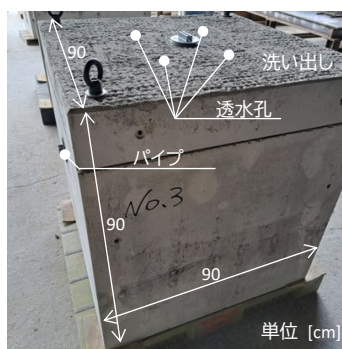


写真-2 藻場ブロック (C4)

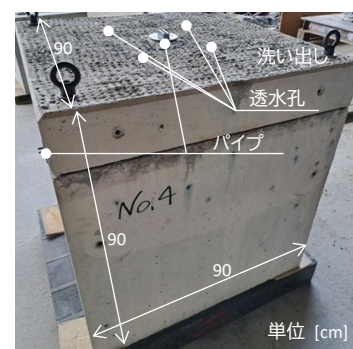


写真-3 藻場ブロック (GP)



写真-4 ブロック内の材料（左からクエン酸、鉄鋼スラグ、鉄くず）



写真-5 材料の設置状況

切削加工時に出る切削くずから油分を取り除いたものである。N2で鉄くずを使用した理由は、東北地方で入手が容易ではない鉄鋼スラグに代えて、東北地方を含めた全国いずれの地域でも低コストで入手可能な鉄くずが使用可能かを確認するためである。それぞれの材料は、写真-5のように麻袋の中に入れてブロック内部に設置した。平時はブロック内部が負圧の状態であるため、ブロック内部の栄養塩や鉄等の拡散速度は小さいが、海流が起きた際に拡散量が増えると考えられる。

2.2 使用材料と配(調)合および作製方法

結合材(B)として、普通ポルトランドセメント(C, 密度 3.16 g/cm³), 高炉スラグ微粉末(GGBS, 密度 2.91 g/cm³), フライアッシュ(FA, 密度 2.20 g/cm³)およびシリカフューム(SF, 密度 2.20 g/cm³)を使用した。骨材には、細骨材に砕砂(S1, 表乾密度 2.63 g/cm³もしくはS2, 表乾密度 2.60 g/cm³), 粗骨材に砕石(G1, 表乾密度 2.71 g/cm³, 最大寸法 20 mm)もしくはG2, 表乾密度 2.70 g/cm³, 最大寸法 20 mm)を使用した。混和剤には、高性能減水剤(SP1, ポリカルボン酸系, 収縮低減タイプ, 密度 1.05 g/cm³もしくはSP2, ポリカルボン酸系, 超高強度用, 密度 1.05 g/cm³)と遅延剤(R, ポリヒドロキシカルボン酸複合体系, 密度 1.20 g/cm³)を、水(W)と混ぜて使用した。また、アルカリ刺激剤として粒状の水酸化ナトリウム(密度 2.61 g/cm³)とガラス微粉末(密度 2.52 g/cm³, ブレーン値 3000 cm²/g)を、およそ 3:2 の比率でプレミックスした粉体(AS, 密度 2.58 g/cm³)を使用した。使用した材料を表-1に、配(調)合を表-2に示す。目標強度はPCaコンクリート製品の基準を参考に 24~30 N/mm²とした。なお、ブロックを海中に設置することから耐久性への影響は小さいことを考慮し、空気量やスランプ値については目標値を設定せず、PCaコンクリート製品として打込みおよび締固めが行える程度とした。また、C4の混和剤量について、1バッチ目(200 L)では 7.00 kg/m³としたが、若干の材料分離が確認されたため、

表-1 各藻場ブロックに使用した材料

	使用材料
N1, N2	C, S1, G1, W, SP1
C4	C, GGBS, FA, SF, S2, G2, W, SP2
GP	GGBS, S2, G2, W, AS, R, SP2

表-2 藻場ブロックの配(調)合

	W/B (%)	s/a (%)	単位質量 (kg/m ³)									
			C	GGBS	FA	SF	S	G	W	AS	R	SP
N1, N2	42.6	40.0	340	-	-	-	731	1129	145	-	-	2.21
C4	25.0	45.7	20	176	246	60	803	954	125	-	-	7.00/6.53
GP	40.0	40.0	-	358	-	-	671	1048	165	55	0.716	7.43

2, 3バッチ目(250 L×2)では結合材に対する混和剤使用量(SP/B)を0.1%減じた 6.53 kg/m³とした。

練混ぜ方法について、練混ぜには 500 L オムニミキサーを使用した。N1, N2とGPは、結合材と細骨材を入れて 10秒間空練りした後、水と混和剤(GPはアルカリ刺激剤も)を入れて 60秒、粗骨材を入れて 60秒間練り混ぜた。C4は、結合材と細骨材を入れて 60秒間空練りした後、水と混和剤を入れて 4分間、粗骨材を入れて 2分間練り混ぜた。練混ぜ量の合計は、N1, N2では約 250 L, GPでは約 600 L, C4では約 700 Lである。養生方法について、PCaコンクリート製品と同様、外気温で前養生 3時間、昇温 2時間、最高温度(65℃) 3時間、降温 10時間、その後外気温で 3時間保持し、この合計約 21時間経過後に脱型した。また同時に、圧縮試験用に直径 100 mm×高さ 200 mmの円柱試験体を作製した。ブロックと同様の養生を施して脱型時を 1d, その後屋外気中養生をして PCaコンクリート製品の出荷材齢である 14日時点を 14dと呼ぶこととする。また C4については、既往¹⁴⁾との比較用に 1日封緘養生をして脱型した後、90℃で 48時間蒸気養生をした円柱試験体も用意した。なお、試験体は 3本ずつである。

2.3 試験および評価方法

ブロック作製に使用したコンクリートの試験および評価方法として、フレッシュ性状、圧縮試験、コンクリートの CO₂排出量の試算を行った。C4については乾燥収縮試験も実施した。

フレッシュ性状は、スランプ(フロー)試験および空気量試験を行った。圧縮試験は JIS A 1108を参考に、載荷速度を 0.6 N/mm²として行った。乾燥収縮試験は百瀬らが開発した省力化法¹⁵⁾を参考に実施した。乾燥収縮試験では、試験体は 1日封緘養生した後脱型して水中養生し、打込みから材齢 7日の試験体を屋内空間(室温約 17℃, 相対湿度約 40%)に静置した後に測定を開始した。なお、屋内空間は恒温恒湿ではないため、測定結果は参考値である。CO₂排出量は以下の式(1)を用いて計算した。

$$E_{CO_2} = \sum(w \times e_{CO_2}) \quad (1)$$

ただし、E_{CO₂}: CO₂排出量 (kg/m³)

w: 各材料の単位質量 (kg/m³)

e_{CO₂}: 各材料の CO₂排出量原単位 (kgCO₂/kg)

単位質量は表-2 の値を、CO₂ 排出量原単位（以下、CO₂ 原単位と称す）は表-3 の値を用いた¹⁶⁾。なお、SF のCO₂ 原単位にはFA の値が代用されている場合が多いが、SF は海外からの輸入に頼っていることから、輸送によるCO₂ 排出量がFA よりも大きいと考えられる。そこで、SF のCO₂ 原単位は式(2)を用いた算出値とした。

$$SF_{eCO_2} = MT \times L + 6 \times 10^{-3} \quad (2)$$

ただし、SF_{eCO₂} : SF のCO₂ 排出量原単位 (kgCO₂/kg)

MT:海上輸送によるCO₂ 排出量(kgCO₂/kg/km)

L : 2 点間の距離 (km)

SF の回収に伴う負荷として 6×10^{-3} kgCO₂/kg¹⁷⁾を加え、MT = 5.54×10^{-6} kgCO₂/kg/km, L = 21662 km¹⁸⁾より、SF_{eCO₂} = 126×10^{-3} kgCO₂/kg となる。また、AS のCO₂ 原単位は水酸化ナトリウムのCO₂ 原単位 1143×10^{-3} kgCO₂/kg¹⁹⁾とガラス微粉末のCO₂ 原単位 46.4×10^{-3} kgCO₂/kg^{20),21)}を用いて算出した。なお、練混ぜ・蒸気養生などのCO₂ 排出量はここでの試算には含まず、材料のみでの比較としている。これは、蒸気養生によるCO₂ 排出量がPCa コンクリート製品作製時に排出されるCO₂ 総排出量の約2%と十分に小さいという試算²²⁾があるためである。これらの詳細な検討は今後の課題である。

3. ブロックの設置および試験結果・考察

3.1 フレッシュ性状

フレッシュ性状の結果を示す。Nはスランブ11.5 cm, 空気量4.0%, GPはスランブ19.5 cm, 空気量1.7%, C4は1 バッチ目がスランブフロー68.5 × 68.5 cm, 空気量1.4%, 2 バッチ目がスランブフロー73.5 × 72.0 cm, 空気量2.1%であった。なお、GPは外気温が25℃以上の時間帯で練り混ぜると流動性が大きく低下することが確認された。また、C4についても練混ぜ時間が15分を超えた際にコンクリートが発熱し、同様の現象が確認された。すなわち、GP、C4ともに温度が上昇してしまうとワーカビリティが低下すると考えられるため、可使時間の確保について今後検討する必要がある。

3.2 圧縮試験

圧縮試験の結果を図-2 に示す。1d 強度はすべて20 N/mm²を超える結果となり、脱型時強度の目安となる8~12 N/mm²を十分に満たしていた。特にGPは他と比べて強度が大きく発現した。14d 強度は、N1, N2とGPは30 N/mm²を超え、C4は24 N/mm²程度と目標強度を満足した。1dと14dの結果から、C4とGPの強度増進が2~3 N/mm²程度と非常に小さいことが確認された。また、C4のみ長期強度として91d 強度を試験したところ、29 N/mm²であった。ここで、既往の養生方法である90℃48時間蒸気養生¹⁴⁾を施した場合は、蒸気養生終了時点の材齢3日で50 N/mm²に到達した。このように、一般的

表-3 CO₂排出量原単位^{16)~21)}

材料	CO ₂ 排出量原単位 (×10 ⁻³ kgCO ₂ /kg)
C	766.6
GGBS	26.5
FA	19.6
SF	126
S	3.7
G	2.9
AS	704.4
SP	100

ただし、SFは参考文献17,18

ASは参考文献19,20,21

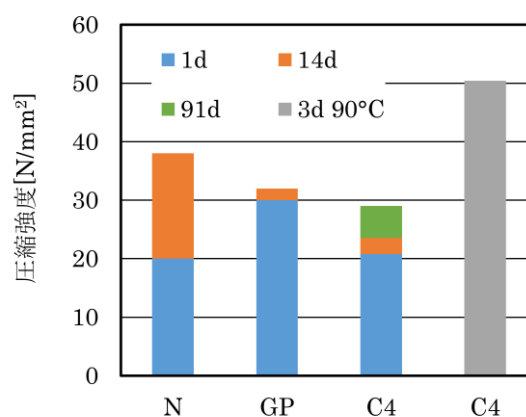


図-2 圧縮強度

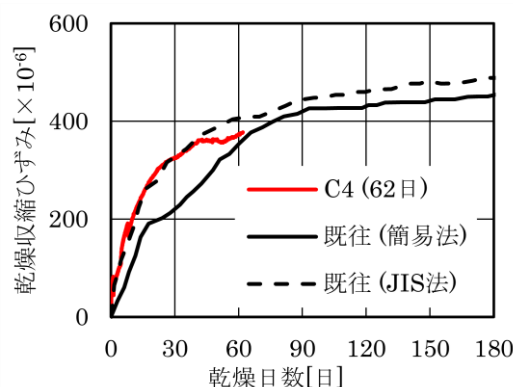


図-3 乾燥収縮試験の結果

な65℃の蒸気養生では早期強度の発現が遅れる理由として、多量のGGBSとFAの置換によりアルカリ量が少ないことなどが考えられる。今後、GGBSとFAの割合を変更した配(調)合やアルカリ成分を供給可能な産業副産物の使用など、早期強度を改善するための検討を計画している。

3.3 乾燥収縮試験

C4の乾燥収縮試験の結果を図-3に示す。本報告では、2ヶ月間時点までの結果を示している。既往の結果¹⁵⁾と比較することで、6ヶ月での乾燥収縮ひずみを予測する。

なお、グラフの既往（簡易法、JIS法）については、既往の結果¹⁵⁾をトレースしたものである。この図のように、2ヶ月時点で 400×10^{-6} 程度であり、既往の結果に近いグラフとなっていることから、6ヶ月でのC4の乾燥収縮ひずみは $400 \sim 500 \times 10^{-6}$ 程度と考えられる。また、測定環境について、百瀬らは相対湿度60%であるのに対して、相対湿度が約40%とより乾燥した屋内空間であった。ここで大野ら²³⁾によると、湿度が小さく乾燥した空間であるほど収縮が大きくなることが知られている。そのため、相対湿度60%の空間であれば図の予想値よりも収縮率が小さくなると考えられ、乾燥収縮ひずみの一般的な目標値として挙げられる $650 \sim 800 \times 10^{-6}$ ^{24),25)}を下回ると予想される。そのため、C4の乾燥収縮ひずみは十分に小さいと考えられる。今後の方針としては、C4はW/Bが小さく結合材の使用量が多いことから、自己収縮ひずみが大きい可能性があるため確認する必要がある。

3.4 藻場ブロックの設置

作製した藻場ブロックは酒田港に運ばれた後、写真-6のようにクレーンによって海中に沈められた。この時、パイプの蓋を開けた状態で沈めることでブロック内部の空気を抜いた。その後ダイバーが写真-7に示すように液体肥料が200 mL入ったシリンジを持って潜り、ブロックのパイプから内部に液体肥料を流し込んだ後蓋を閉めて、写真-8のように海中への設置を完了した。

東北地方では、昆布やワカメなどの海藻は秋に胞子を放出し、その後冬から春にかけて生長する。このため生長期である冬に栄養塩や鉄が供給できれば良い。クエン酸と液体肥料は1回の設置・供給で約1年分持たせることが可能であり、材料の追加もパイプを通じて行えるため、この先長期間にわたって藻場ブロックとしての役割を果たすことが期待される。今後はモニタリングを通じて、ブロックの状態や藻場の状況等を調べていく。

3.5 CO₂排出量の試算

CO₂排出量の計算結果を表-4に示す。本配（調）合での比較では、CO₂排出量をNに対してC4は約85.5%、GPは約79.6%削減することができた。また、ブルーイ

表-4 各ブロックのCO₂排出量

シリーズ	kgCO ₂ /m ³	カーボンニュートラルに必要な年数
N	266.8	約13.3年
C4	38.8	約1.94年
GP	54.5	約2.73年

ンフラへの適用を考える場合、1年でブロック1個当たりCO₂を約20 kg吸収すると試算されているため¹²⁾、ブロック作製分のカーボンニュートラル達成のためには、Nが約13.3年、C4が約1.94年、GPが約2.73年必要である。すなわち、C4やGPのような低炭素コンクリートを使用することで、Nよりも10年以上早くカーボンニュートラルを達成し、大気中のCO₂量を削減できるようになると考えられる。なお、ブロックに生えた藻場はそのまま放置して良いため、必要な作業は1年に1回液体肥料とクエン酸を補給するのみと少なく、効率よくCO₂を吸収できると考えられる。

4. 結論

国土交通省のプロジェクトに参加し、ブルーインフラの構築に向けて低炭素コンクリートを用いた藻場ブロックを作製・設置した。また同時に、基本性状の確認をすることで、将来的に改善できることを明確にした。以下に本報告のまとめおよび今後の展望について示す。

- 1) 3種類のコンクリート(N, C4, GP)で藻場ブロックを計4体作製し、酒田港の海中に設置したことで、ブルーインフラ実証実験の第一弾を実施した。
- 2) ブルーインフラの構築によって大気中のCO₂を削減させるためには少なくとも2年必要であり、これは低炭素コンクリートでなければ達成できないことを確認した。1年後の藻場の量から再びCO₂固定量を計算し、効果の程や改善点などを明確にしていく。
- 3) 低炭素コンクリートについて、可使時間の確保や初期強度・強度増進の改善が課題として確認された。さらに、将来地上構造物への適用に向けて、自己収縮や



写真-6 ブロックを海中に沈める様子



写真-7 液体肥料の入ったシリンジ



写真-8 藻場ブロックの現状

凍結融解など耐久性に関する試験を実施していく必要があると考えられる。

今後、実証が進められるにつれて、ブルーインフラの構築によるカーボンニュートラル達成に大きな影響を及ぼすとともに、筆者らのコンクリートがその影響に貢献できることを期待する。

謝辞

本報告の実施にあたり、土木地質株式会社、株式会社ダイイチ、東栄コンクリート工業株式会社に材料の手配やブロックの作製・運搬等においてご助力いただいた。ここに記し深謝する。

参考文献

- 1) 公益社団法人、日本水産資源保護協会、第11巻、第4号 参照：<https://www.fish-jfrc.jp/02/pdf/kihou/no558.pdf> (閲覧日：2023年12月20日)
- 2) 環境省、第4回自然環境保全基礎調査 海域生物環境調査報告書第2巻 参照：<https://www.biodic.go.jp/reports/4-12/r00a.html> (閲覧日：2023年12月20日)
- 3) 環境省、第5回自然環境保全基礎調査 海辺調査総合報告書 参照：<https://www.biodic.go.jp/reports/umibe/umibe.pdf> (閲覧日：2023年12月20日)
- 4) 環境省、藻場分布調査 参照：<https://www.env.go.jp/content/900517893.pdf> (閲覧日：2023年12月20日)
- 5) 国土交通省、ジャパンプルーエコノミー (JBE) 技術研究組合の設立、参照：<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001354352.pdf> (閲覧日：2023年12月20日)
- 6) 桑江朝比呂ほか：浅海生態系における年間二酸化炭素吸収量の全国推計、土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 75, No. 1, pp. 10-20, 2019
- 7) 鹿島建設、「海のゆりかご」アマモ場を再生する技術 参照：https://www.kajima.co.jp/news/digest/jun_2023/feature/01/index.html (閲覧日：2023年12月20日)
- 8) 日建工学株式会社、環境活性コンクリート 参照：<https://www.nikken-kogaku.co.jp/products/detail/519/> (閲覧日：2023年12月20日)
- 9) 日建工学株式会社、『カーボンリサイクル・コンクリート』を用いた根固めブロックの製造 参照：<https://www.nikken-kogaku.co.jp/news/detail/7015/> (閲覧日：2023年12月20日)
- 10) 北辻政文：漁礁ブロックを用いた藻場再生の取り組み、農業農村工学会誌, Vol. 89, No. 11, pp. 37-40, 2021
- 11) 北辻政文：コンクリート藻場ブロックの開発、セメントコンクリート研究討論会論文報告集, Vol. 47, pp. 23-26, 2022
- 12) 宮城大学、ブルーカーボンのための藻場の創出 参照：<http://www.gareki-shori.com/pdf/documents/bluecarbon.pdf> (閲覧日：2023年12月20日)
- 13) 国土交通省、命を育むみなのブルーインフラ拡大プロジェクト 参照：<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001580987.pdf> (閲覧日：2023年12月20日)
- 14) 鈴木南都、小林紀行、小林知大、西脇智哉：CO₂ 排出量削減を実現するセメントコンクリートの開発と評価、コンクリート工学年次論文集, Vol. 45, No. 1, pp. 1054-1059, 2023
- 15) 百瀬晴基、閑田徹志、今本啓一、三橋博三：乾燥収縮迅速評価システムの開発、コンクリート工学, Vol. 47, No. 10, pp. 22-29, 2009
- 16) 社団法人土木学会：コンクリートの環境負荷評価、コンクリート技術シリーズ, No. 62, pp. 39, 2004
- 17) 斉藤敬志ら：炭素固定性を有する海洋生物殻廃棄物を用いた PCa コンクリート部材の開発 その3 材料・製品の製造段階の炭素量計量, 2021年度日本建築学会 関東支部研究報告集, 2022
- 18) Portail open data de l'ADEME, Base carbone® 参照：<https://data.ademe.fr/datasets/base-carboner> (閲覧日：2023年12月20日)
- 19) 現状把握に基づく課題の整理、表-II-1-10 薬品のエネルギー原単位と CO₂ 排出係数 参照：<https://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/kenkou/suido/jouhou/kankyoudl/090729-1f.pdf> (閲覧日：2023年12月20日)
- 20) 天野耕二、宮川征樹：産業廃棄物の再資源化・有効利用による環境負荷削減ポテンシャルの評価、土木学会論文集 G, Vol. 64, No. 1, pp. 26-45, 2008
- 21) 環境省、温室効果ガス排出量の算定方法 ver. 4.8, pp. 29-33 参照：<https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/manual> (閲覧日：2023年12月20日)
- 22) エコリーフ、安藤ハザマ低炭素型 PCa 製品、参照：https://ecoleaf-label.jp/pdf_view.php?uuid=38e799d3-19d7-4493-8996-13c1edf0fcd1.pdf&filename=JR-BH-22005E_JPN.pdf (閲覧日：2023年12月20日)
- 23) 大野吉昭、榊田佳寛、鹿毛忠継：環境条件と使用材料の影響によるコンクリート乾燥収縮ひずみに関する実験研究、セメント・コンクリート論文集, No. 64, pp. 190-195, 2011
- 24) 日本建築学会、鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針 (案)・同解説, pp. 47-48, 2006年
- 25) 日本建築学会、建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, pp. 214-216, 2022年