

ブルーカーボン・インフラ ―地域に根ざす海洋生物殻資源の再生拠点の提案―

DB20294 細田 夏花

1. はじめに

2020 年 10 月、日本政府は 2050 年までにカーボンニュートラル社会の実現を目指すことを宣言した。これにより建築業界では、カーボンニュートラル資源活用への関心が高まっている。図 1 に、近年、グリーンカーボン、ホワイトカーボンに次ぐ第三のカーボンニュートラル資源として注目を集めるブルーカーボンの概念図を示す。ブルーカーボンとは、海洋生物の働きによって海洋環境に吸収・貯留されている炭素のことで、2009 年の国連環境計画（UNEP）の報告書「BLUE CARBON」によって定義されている⁴⁾。日本の主力魚種製品であるホタテの貝殻もブルーカーボン資源の一つであり、未利用のまま眠っている地域が数多くある。

2. 設計・研究概要

表 1 に本設計・研究の概要を示す。本設計では、未利用のまま蓄積されるホタテ貝殻の活用を促進し、ブルーカーボン資源を広く世の中に浸透させるため、廃棄された貝殻を貝殻砂へ加工し、新たな付加価値を持った再生資源として社会に発信する拠点＝ブルーカーボン・インフラを計画する。また、ブルーカーボン資源を原料とした環境配慮型建材の開発を行い、実際に建築物に使用するところまでを提案する。従来の処理施設がもつ静脈機能のみならず、再生資源から新たに生み出される多面的価値の発信拠点として動脈機能も併せ持つような、新しいインフラのカタチを提示する。

3. 設計の流れと概要

表 2 に本設計の流れと概要を示す。まず、ブルーカーボン・インフラを設計するにあたって、原料となるホタテ貝殻の発生状況や加工フローに関する現場調査を行う。次に、実際に持ち帰ったホタテ貝殻砂を用いて、3D プリンター用ホタテ貝殻微粒分モルタルの開発を行い、基礎性状評価を行う。最後に、以上の調査・実験結果を踏まえ、ブルーカーボン・インフラの設計を行う。実際に開発した 3D プリンター用ホタテ貝殻微粒分モルタルの特性を生かして、新たな建材の設計を行い、建物の一部に使用する。

表 1 研究・設計概要

	項目	概要
研究	ホタテ貝殻微粒分を用いた 3DP 用モルタルの仕上げ材開発	ホタテ貝殻微粒分の粒形特性を活かした 3DP 用モルタルの開発を行い、仕上げ建材の設計を行う。
設計	ブルーカーボン・インフラの設計提案	ホタテ貝殻を貝殻砂へ加工し、ブルーカーボン資源として社会に発信する拠点を計画する。

表 2 設計の流れと概要

	項目	概要
研究	調査	原料調査 ↓ ホタテ貝殻資源に関する現状調査と加工現場調査を行う。
	実験 1	基礎性状評価試験 ↓ ホタテ貝殻微粒分モルタルの試験体について、フレッシュ性状、各強度の評価試験を行う。
	実験 2	施工試験 ↓ ホタテ貝殻微粒分モルタルを使用した 3DP の積層試験を行う。
設計	制作	設計提案 雄武町を拠点としたブルーカーボン・インフラの設計提案を行う。

4. ホタテ貝殻微粒分モルタルの 3DP 仕上げ材開発

4.1 原料調査

1) ホタテ貝殻の発生状況

図 2 に、ホタテ貝の年間養殖量と漁獲量の割合を示す。養殖量は北海道と青森県で全体の 90%を、漁獲量は北海道がほぼ 100%を占める。加えて、図 3a)b)c)に北海道 12 地域と青森県におけるホタテ収穫量 M_0 ・貝殻発生量 M_1 ・貝殻未利用量 M_2 とその分布を示す。特にホタテ貝の収穫量が多い北海道オホーツク海沿岸部では、貝殻の発生量・未利用量が多いことが分かる。同地域にブルーカーボン・インフラを設置することで、資源の地産地消が実現し、貝殻を運搬する際の CO_2 発生量を抑制することができるとともに、地域の新たなブランド創出につながると考えられる。なお、ホタテ貝全体に占める平均貝殻比率は 52%より、 M_2 は式(1)より求めた。

$$M_2=0.52\times M_0-M_1 \cdots \text{式(1)}$$

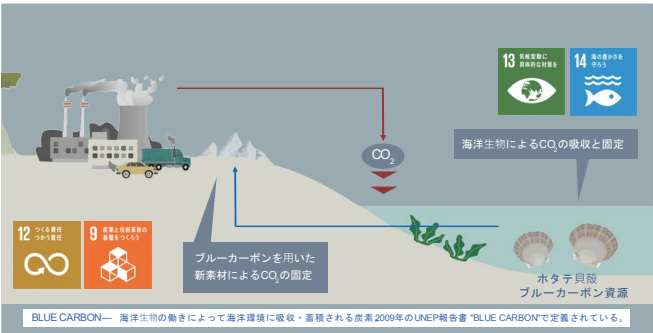


図 1 ブルーカーボン概念図

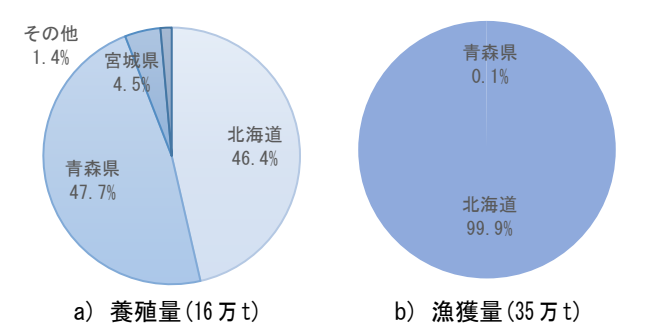
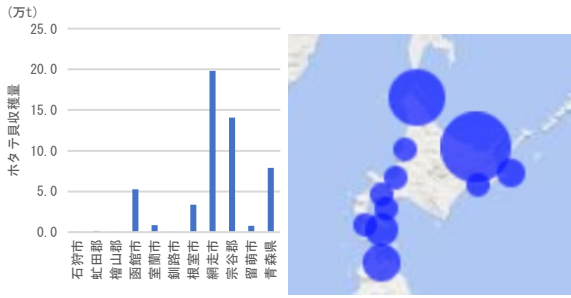
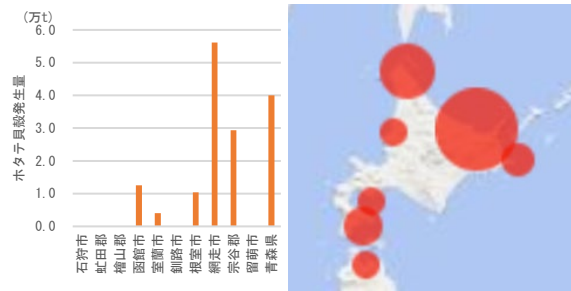


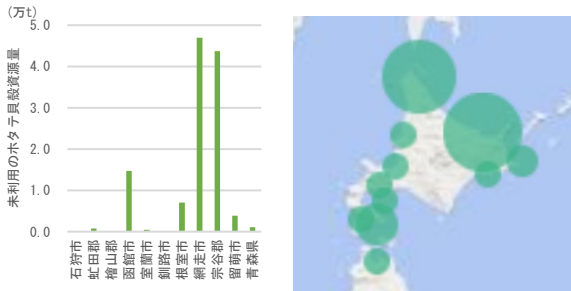
図 2 ホタテ貝の年間養殖量・漁獲量割合 (2021 年)



a) ホタテ収穫量 M_0 と分布図



b) ホタテ貝殻発生量 M_1 と分布図



c) 未利用のホタテ貝殻資源量 M_2 と分布図

図3 北海道と青森県における
ホタテ貝・ブルーカーボンストック情報

2) ホタテ貝殻加工現場ヒアリング調査

図4に2023年3月に北海道の標津郡に位置するホタテ貝殻加工工場の実態調査を行った際の様子を、図5に同工場におけるホタテ貝殻砂の加工フローを示す。ブルーカーボン・インフラの設計において、このフローをベースにプラントの計画を行う。原料となるホタテ貝殻は、工場近くの水産加工場から出たものを水産系未利用資源として有償で仕入れて使用している。中間処理業者がホタテ貝殻を受け入れる際、以前は廃掃法の取扱いに従い産業廃棄物として回収していたが、現在は水産系未利用資源として有償で生産者から買い取るしくみがとられており、今後は、加工された製品の需要を高めることが課題といえる。また、貝殻を加工する一次・二次破碎設備に加えて、効率の良い分級工程を施設する必要があるが、現状の道内には、これらを備える中間処理施設が少ない。今後、ホタテ貝殻砂の生産性向上を目指す場合、炭素循環促進に関わる補助金等を利用した社会資本設備の整備が必要といえる。



a) 貝殻砂の触手確認 b) セパレータの視察
図4 ホタテ貝殻加工工場の実態調査の様子



図5 ホタテ貝殻砂加工フロー

4.2 3DP用モルタルの基礎性状評価

1) 実験の方針

本研究では、ホタテ貝殻微粒分モルタルの3DP施工への応用を目的とした基礎性状評価試験を行う。生産工場が異なる二種類のホタテ貝殻微粒分についてそれぞれモルタル試験体を用意し、圧縮、せん断、曲げの三種類の強度試験を行う。従来のモルタルとホタテ貝殻微粒分モルタルの性状を比較し、3DP施工試験に向けた課題の検討を行う。

2) 使用材料および実験内容

図6にホタテ貝殻微粒分及び貝殻砂を、表3にホタテ貝殻微粒分モルタルの使用材料一覧を、表4にモルタルの調合を、表5に試験項目と内容を示す。ホタテ貝殻微粒分は、北海道の異なる工場で製造された二種類を使用し、モルタル試験体H1~H3、B1~B3を用意する。この他に普通調合のモルタル試験体N1~N3を用意し、計9体で基礎性状評価試験を行う。



図6 粒径別ホタテ貝殻微粒分(左:微粒分、右:砂)

表 3 使用材料

材料	記号	名称	内容
水	W	上水道水	—
結合材	C	普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm ³
	Ad1	3DP 用無機混和材 1	密度 2.3g/cm ³
	Ad2	3DP 用無機混和材 2	密度 2.2g/cm ³
微粒分	S	3DP 用微粒細骨材	2.63g/cm ³
	SH	ぼたて貝殻粉末 (0.2~0.5 mm)	2.62g/cm ³
	SB	ぼたて貝殻粉末 (0.25~0.6 mm)	2.62g/cm ³
化学混和剤	F	PP 繊維 (A 種 I 類 15 mm未満)	JIS A 6208
	M	高性能減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物

備考) 微粒分の密度は、表乾密度を示す。

表 4 3DP 用モルタルの割合 (kg/m³)

記号	W	C+Ad1+Ad2	S	SH	SB	F	M (C×%)
N	365	1143	796	—	—	2	0.3
H	365	1143	239	557	—	2	0.5+0.5
B	365	1143	239	—	557	2	0.7+0.2

表 5 試験項目と内容

試験項目	方法および内容
圧縮強さ (N/mm ²)	角柱試験体 (40mm×40mm×160mm) 材齢 28 日
せん断強さ (N/mm ²)	角柱試験体 (40mm×40mm×160mm) 材齢 28 日
曲げ強さ (N/mm ²)	角柱試験体 (40mm×40mm×160mm) 材齢 28 日

3) ホタテ貝殻微粒分モルタルのフレッシュ性状

図 7a)b)c) にホタテ貝殻微粒分モルタルのフレッシュ性状とスランプとモルタルフローを示す。3DP 用の普通調合モルタル N と比較して、H、B とともに一定のスランプ範囲内であることから、ホタテ貝殻微粒分粒形の特徴¹⁾⁻³⁾により、ホタテ貝殻微粒分モルタルは、3DP 用モルタルに必要な自律安定性を保持しているといえる。また、15 打フローでモルタルが大きく流下していないことから、普通調合 N と同様のレオロジー特性(粘性、降伏値)を保持していると想定される。

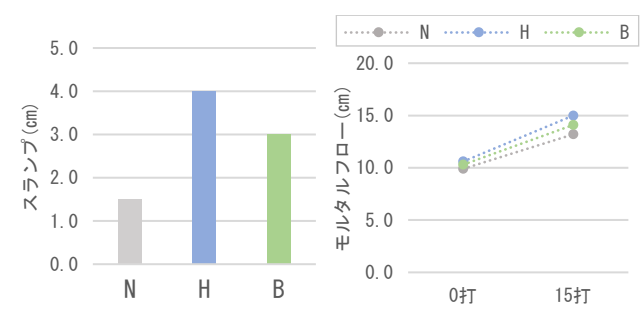
よって、3DP 用モルタルとして普通調合 N と同等に扱うことができる範囲のフレッシュ性状を有していると考えられた。

4) ホタテ貝殻微粒分モルタルの力学性状

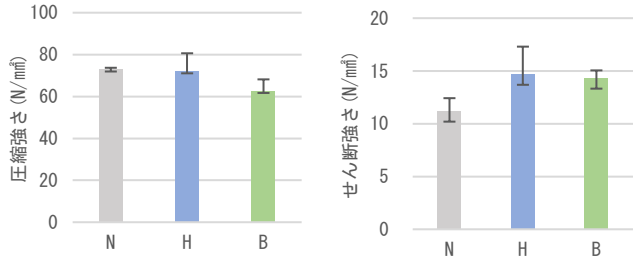
図 8a)b)c)d) に各強度試験の結果・密度とその標準偏差を示す。圧縮強さは、B が N の強度を多少下回ったものの、H については N と同等の強度が得られた。また、せん断と曲げ強さは、H、B とともに、N の強度を上回る結果が得られた。これは、ホタテ微粒分の形状が左官砂の微粒分と比較して、扁平で鋭角形状のため、セメント硬化体との機械的かみ合わせが確保されやすいため¹⁾⁻³⁾といえる。一方、密度は両者ともに N を下回り、強度向上のためにはさらなる改善が必要である。

	スランプ (cm)	0打	15打	単位容積質量 (kg/m ³)	空気量 (%)	ブリージングの有無	温度 (°C)	塩化物 (kg/m ³)	練り時間 (s)
N	1.5	9.9	13.2	2150	—	無	20	0.02	60+30
H	4.0	10.6	15.0	2109	1.67	無	20	0.07	60+60
B	3.0	10.3	14.1	2093	2.40	無	20	0.08	60+60+30

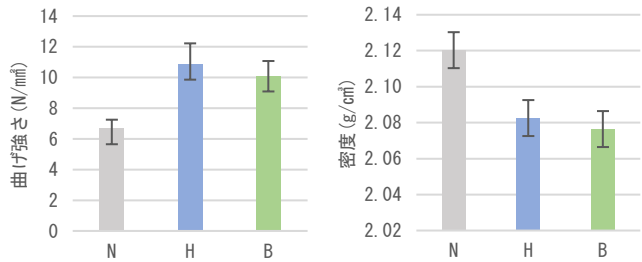
a) フレッシュ性状



b) モルタルスランプ c) モルタルフロー
図 7 ホタテ貝殻微粒分モルタルのフレッシュ性状



a) 圧縮強さ b) せん断強さ



c) 曲げ強さ d) 密度

図 8 各モルタルの力学特性と密度

5. ブルーカーボン・インフラの設計提案
5.1 計画概要

表 6 に本設計の計画概要を示す。敷地は、日本のホタテ貝一大漁場である北海道オホーツク海沿岸部の雄武町を選定した。雄武町には、未利用のホタテ貝殻資源が山積みになっている現状がある。この大量の貝殻資源を環境に対して、また、まちに対して有効活用するため、ホタテの貝殻を再生資源化する拠点”ブルーカーボン・インフラ”を計画した。構成要素は、ホタテ貝殻を貝殻砂として再資源化するホタテ貝殻砂製造プラントと製造した貝殻砂を用いて、ものをつくったり、消費したりしながら資源の循環を実体験するナレッジプラントの二つとした。施設には、ホタテ貝殻砂モルタルの 3DP 造形アトリエやホタテ貝殻肥料で栽培した有機作物を提供する食堂などが入り、ブルーカーボン・インフラから生まれる新たな雄武ブランドを発信する原点となる。

5.2 ブルーカーボン・インフラとまちの関係

図9に、ブルーカーボン・インフラと雄武町の関係図を示す。地産地消フローによってブルーカーボン・インフラに運び込まれたホタテ貝殻は貝殻砂に加工され、肥料や土木・建築材料としてインフラ内で活用されるだけでなく、雄武町さらには町外へ出荷される。出荷先では、貝殻砂肥料を使った野菜や貝殻砂のテクスチャが残る建材として生まれ変わり、新たな雄武ブランドを創出する。

表6 計画概要

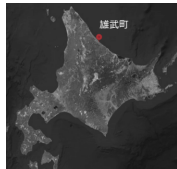
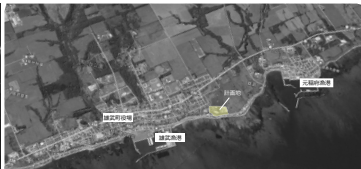
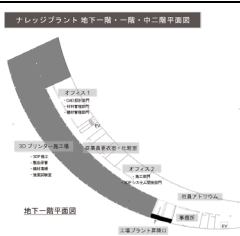
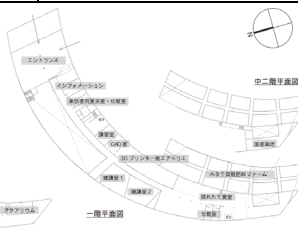
施設分類	ホタテ貝殻再生処理施設																				
敷地	北海道紋別郡雄武町沿岸部工業地域(約2万㎡)																				
施設機能	 																				
	ホタテ貝殻砂加工プラント例(約1万㎡)																				
	 <table><caption>工程表</caption><tr><td>1</td><td>堆積養生・有機分解</td></tr><tr><td>2</td><td>材料投入</td></tr><tr><td>3</td><td>乾燥処理</td></tr><tr><td>4</td><td>砂選とし</td></tr><tr><td>5</td><td>一次破砕(ジョウクラッシャー)</td></tr><tr><td>6</td><td>一次篩る(水平振動篩る)</td></tr><tr><td>7</td><td>二次破砕(ピンミル)</td></tr><tr><td>8</td><td>二次篩る(エッセパレーター)</td></tr><tr><td>9</td><td>微粉砕い上げ</td></tr><tr><td>10</td><td>梱包・保管・出荷</td></tr></table>		1	堆積養生・有機分解	2	材料投入	3	乾燥処理	4	砂選とし	5	一次破砕(ジョウクラッシャー)	6	一次篩る(水平振動篩る)	7	二次破砕(ピンミル)	8	二次篩る(エッセパレーター)	9	微粉砕い上げ	10
1	堆積養生・有機分解																				
2	材料投入																				
3	乾燥処理																				
4	砂選とし																				
5	一次破砕(ジョウクラッシャー)																				
6	一次篩る(水平振動篩る)																				
7	二次破砕(ピンミル)																				
8	二次篩る(エッセパレーター)																				
9	微粉砕い上げ																				
10	梱包・保管・出荷																				
構造種別	3DP 施工プラント(約2000㎡)	ナレッジプラント(約3000㎡)																			
																					



図9 ブルーカーボン・インフラとまちの関係図

5.3 ホタテ貝殻微粒分モルタルを用いた仕上げ材の設計

図10a)b)にナレッジプラントの外殻部の仕上げ材として用いたホタテ貝殻微粒分モルタル建材のイメージと制作模型を示す。建設用3DPは、モルタル積層式であるため、従来の型枠を必要とせず、表層にボーダー状の溝ができることが特徴である。この溝に人の手で植物の種子を植えることで、時間と共に緑化するマテリアルを実現する。



a) 緑化マテリアルによる b) モルタル積層面再現模型
ナレッジプラント外殻部

図10 ホタテ貝殻微粒分モルタルを用いた建材

6. まとめ

本研究で以下の知見が得られた。

- 1) 北海道地域を中心に採取可能なホタテ貝殻廃棄物は、ブルーカーボン固定資材としての資源生産性が見込める。
- 2) ホタテ貝殻モルタルのフレッシュ性状は、3DP用モルタルに必要な一定の自律安定性とレオロジー特性を保持している。
- 3) ホタテ貝殻微粒分モルタルは、微粒分の形状特性がもたらす機械的かみ合わせ^{1)~3)}によって、普通調合と同程度の圧縮強さと普通調合を上回るせん断強さと曲げ強さが得られるようになることが想定される。
- 4) ブルーカーボン・インフラ計画では、未利用のブルーカーボン資源を有効活用するだけでなく、再生資源から新たに生み出される多面的価値を発信する拠点とすることで、まちに新たなブランドを創出し、環境配慮とまちづくりの相乗効果が期待できるといえる。

謝辞

本研究は、高橋カーテンウォール工業株式会社との共同研究であり、(株)北海道裕雅、(株)ビッシェル、(株)Polyuse、あいもり(株)、増尾リサイクル(株)、樋口産業(株)、(株)ウルム及び技術者各位より多大な協力をいただいた。

参考文献

- 1) 小室、田村、炭素固定性を有する海洋生物殻を混入したモルタルの基礎力学特性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 33, No. 1307, 2011. 6
- 2) 小室、田村、炭素固定性を有する海洋生物殻を用いた鉄筋コンクリート造建築物のカーボンニュートラル性の検討、日本建築学会技術報告集、第40号, pp. 841-846, 2012. 10
- 3) 佐々木ら、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1~3, 2022年度日本建築学会学術講演梗概集, 2022. 9
- 4) 国際連合、国連環境計画(UNEP), 添付文書13-k, 2017/07/14