

# BIO INDUSTRY

第41巻 第4号 通巻481号  
2024年 4月 12日発行 (毎月12日発行)

4 Apr., 2024

工業化をめざすバイオ専門情報誌  
バイオインダストリー

## 特集 日持ち向上剤の最新技術

食品添加物による食品の腐敗防止

ベジミート用日持ち向上剤 「e-GIMAX」

糖アルコールによる保存性向上

結晶セルロース製品 「セオラス™」について

茹で緑色野菜用日持向上剤 フレッシュロン・もえぎ

粉末油脂を活用した食品の食感維持による日持ち向上

粉末化醸造酢の日持ち効果

### BIO REVIEW

ブルーカーボン・アクト&インフラの構築に資する海洋生物殻コンクリート  
建材の開発

### BIO PRODUCTS

アシル化ペプチド

アゼライン酸

# ブルーカーボン・アクト&インフラの構築に資する 海洋生物殻コンクリート建材の開発

Development of Concrete Materials Using Marine Shells to Build Blue Carbon Act and  
Blue Carbon Infrastructure

田村雅紀<sup>\*1</sup>, 細田夏花<sup>\*2</sup>, 井口菊乃<sup>\*3</sup>

## 1 はじめに

国連環境計画（UNEP）では、2009年に浅場の海洋生態系に取り込まれた炭素固定成分をブルーカーボン（Blue Carbon）として炭素吸収源に位置付けた。本研究室では、かねてより建設資材の完全リサイクル化を実証すべく、資源循環が前提とした様々な建材開発を実施<sup>1~8)</sup>してきたが、この世界的動向を受けて、2010年より国内・北海道を中心とした主要な漁獲資源であるホタテ貝殻に着眼し、海洋中の二酸化炭素を、数年の間で生物殻として、広義の意味でのブルーカーボンの吸収固定をし、食産利用の際に固化物として廃棄される炭酸カルシウム生物殻（CaCO<sub>3</sub>）をコンクリート用骨材に有効利用する研究を実施してきた<sup>9~31)</sup>。

本稿では、これらの研究の概要を示すとともに、広義によるブルーカーボンとしてコンクリート建材に固定・蓄積する基礎技術とその運用システムに関わる行為・活動の全体（ブルーカーボンアクト）と、それにより実現する設計提案や実製品の製造・施工展開（ブルーカーボン・インフラ）への展望を考える。

## 2 ブルーカーボン・アクトとブルーカーボン・インフラ（Blue Carbon Act. & Infra.）

国連環境計画などで広く伝えられたブルーカーボンは、主に藻類などの光合成により生成蓄積した水産資源を指すが、本研究のホタテ貝殻は、北海道のオホーツク海を中心に2~4年をかけて生長した天然・養殖漁業産物であるホタテ貝の食部を除く炭酸カルシウム骨格の生長固化物（CaCO<sub>3</sub>）で構成されており、前述した定義に基づくブルーカーボンとは今はいえないものの、その成分には約44%のCO<sub>2</sub>が海水中から吸収され、含まれることになる。仮に、これらのほたて貝殻を、廃棄処理や短期的用途に供するのではなく、コンクリート用細骨材として長期にわたり有効利用できた場合、例えば、単位量あたりの投入重量が100kg程度であれば、わずか数年で海水中から固定した約44kgに相当するCO<sub>2</sub>を、長期に渡りコンクリート製品の一部として固定化する状況が実現される。なお、その具体的な用途としては、ビル建物等の外壁PCaコンクリート部材や、建築仕上用の3Dプリンティング材料などが計画されているが、その一連の技術的取組みは

\*1 Masaki Tamura 工学院大学 建築学部 建築学科 教授

\*2 Natsuka Hosoda 工学院大学 建築学部 建築学科 4年

\*3 Kikuno Iguchi 工学院大学 建築学部 建築学科 4年



図1 製造したホタテ貝殻砂とブルーカーボン・アクト&インフラの地域性・概念図<sup>31)</sup>

多岐にわたり、サプライチェーンの上・下流までのシステム全体を捉えた場合、ホタテ貝殻をブルーカーボンリサイクル用の副産物として採取する漁業行為の処理作業にはじまり、水産加工所での貝殻の脱離処理、中間処理場への運搬・破碎処理などが含まれ、これらは「ブルーカーボン・アクト：Blue Carbon Act.」として位置づけることができる。そして、本研究で開発を進める建築外壁となるPCaコンクリート製品のような耐久消費財の場合、建物の外装をはじめ都市景観にも大きな影響を与えられることから、そのような性質を有する構築物は、「ブルーカーボン・インフラ：Blue Carbon Infra.」として位置づけることができる。この二つの概念は、ブルーカーボンリサイクルを推進する上で重要な役割を担う。

これらの海洋生物殻を原料とした取り組みは、UNEPで推進する光合成同化産物である有機物の藻類等のブルーカーボンとは厳密には区別されるものであろう。今後、促進生育が目標とされる藻類自身は、新たに導入したその生育母材（例えば、人工漁礁）は、同一の漁業活動の一連のシステムに含まれるため、繁茂した藻類においても、そのCO<sub>2</sub>吸収固定量は、人工漁礁の設置や劣化時の補修や解体に関わる排出CO<sub>2</sub>は増加分として適切に計上される必要がある。なお、ホタテ貝に関しても、ホタテが生物として生長する過程で生じる甲殻部の組織原料となるタンパク質の外套膜内に、海水中のカルシウムイオンと炭酸イオンが過飽和となり折出する基礎的な仕組みにより、重量あたりどの程度の海水中のCO<sub>2</sub>を吸収して

いるのかどうかの確認は厳密には必要であろう。現在、ホタテ貝殻をコンクリート骨材として使用した場合のブルーカーボン量をクレジットとして運用する準備を検討し始めているが、その評価対象となるシステム境界に関しては、例えば北海道のホタテ貝殻の場合、国内外での売上が見込まれる漁獲水産物であるため、その流通経路（例：海洋漁獲～卸売市場～水産加工～貝殻中間処理～製品工場原料化などの漁場・地域の空間範囲、生育・管理条件等の時間範囲）を明確にしたうえで、「受益者支払いの原則」「汚染者負担の原則」を前提としたサプライチェーン上でのCO<sub>2</sub>カウンティングシステムを明示することが今後の課題となる。

### 3 北海道におけるホタテ貝殻の発生状況

日本は、世界で有数のほたて貝の漁獲生産高があり、北海道の主要産地12地域と青森県におけるホタテ貝の年間生産量（養殖量、漁獲量）は、養殖量が北海道と青森県で全体の90%、二枚貝の海洋漁獲量は北海道がほぼ100%を占めている<sup>32)</sup>。その北海道では、年間で総量約40万トン程度のほたて貝が水揚げされ、その量は全世界の1/4程度を占めるが、国外に2枚貝で冷凍し輸出される量もあるため、結果として年間約11万トンの貝殻が国内で廃棄物として発生している。北海道ではこれらのほたて貝殻粉碎物を、耕作地用のアルカリ化肥料をはじめ、チヨーク原料、凍結

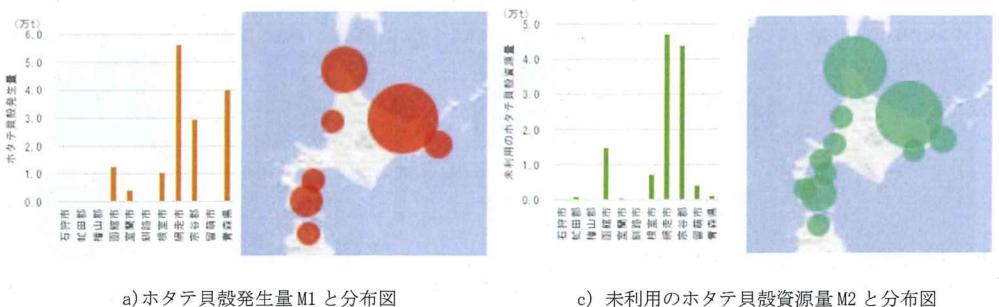


図2 北海道と青森県におけるホタテ貝・ブルーカーボンストック情報<sup>26~27)</sup>

防止路床材など、道指定のグリーン購入法特定調達品目類として、合理的な資源循環の用途となる好事例はあるが、多くは加工場内の一次保管場などで長期保管されるか、用途転換して処理されているのが現況である。

図2に、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として、ホタテ貝殻発生量M1と貝殻未利用量M2の分布を示す。ホタテ貝全体に占める平均貝殻重量比は52%程度であるため、現在のホタテ貝殻発生量M1に、貝殻未利用漁獲量M0を用いて、現在は未利用であるが今後の貝殻利用資源量M2を式(1)より求めた。

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

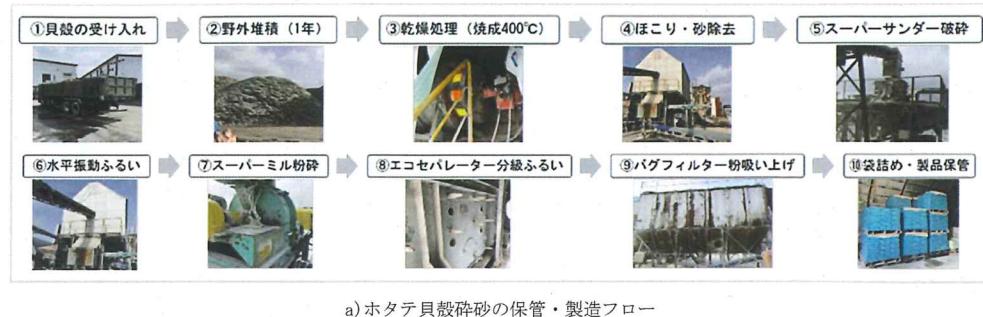
これらを可視化したマップ図より、特に天然ホタテ貝の漁獲収穫量が多い北海道オホーツク海沿岸部では、現在の貝殻発生量と将来の未利用資源量が多いといえ、オホーツク海沿岸での加工処理に関わる技術・システムが大きく展開する余地があるといえる。同地域にブルーカーボン・アクトの拠点とインフラが設置されれば、ホタテ貝漁獲資源における本来の地産地消の仕組みづくりに資する可能性は大きいにあり、その結果、現在生じているような道東・道南地域へのホタテ貝の長距離運搬によるCO<sub>2</sub>排出を抑制し、カーボンクレジット利用を含めたオホーツク地方における新たな地域ブランド創出にもつながる可能性があるといえる。

## 4 広義のブルーカーボンを固定したコンクリートの基礎物性

### 4.1 ほたて貝殻砂の製造

図3にホタテ貝殻砂の製造システムおよび基礎的性状を示す。現在北海道では、ほたて貝殻は未利用資源として循環資源の枠組みで扱われていることから、水産加工場等では、産業廃棄物として処理をするのではなく、可能な範囲で中間処理業を通じた循環利用することが推奨されている。従って、ほたて貝殻砂の中間処理が可能な実機製造工場においても、安価ではあるが有価での原料買取りを行い、最終的に下記のような破碎処理プロセスを経て、粒径0.6~2.5 mmのほたて貝殻砂等を中心とした製品を製造・販売をしている。なお、製造上の課題として、⑧エコセパレーターは時間を要し篩をかけるため、分級が不十分であると0.3~0.15 mm以下の微粉分の除去が難しくなる。本研究を通じて、実際のコンクリート用細骨材としては、ホタテ貝殻砂70%と石灰砕砂30%程度の混合量であれば、粒度分布やモルタル等の練り性状を保持する条件を満足するが、その場合においても、0.3 mm以下の微粉末が、貝殻砂に最大12%程度含まれることが分かった。

なお、ほたて貝殻の特徴<sup>33)</sup>として、生体内鉱質形成作用により、カルシウム組織とキチン類の糖類が層状に重なった構造を有しており、コンクリート骨材としての力学的な影響や長期的な使用において、ホタテ貝殻の層形状に起因する有効な



a) ホタテ貝殻碎砂の保管・製造フロー

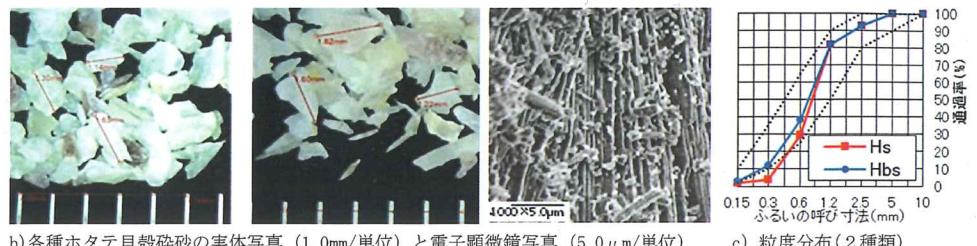


図3 ホタテ貝殻砂の製造システムおよび基礎的性状<sup>9~20)</sup>

効果などは十分に考えられる。一方、ホタテ貝殻の層間内の微細組織である糖類のアルカリ変性の影響なども検討する余地はあり、それらは今後、研究を通じて評価を行う必要がある。

#### 4.2 ホタテ貝殻砂を用いたコンクリートのフレッシュ性状

図4にホタテ貝殻砂を用いたコンクリートのフレッシュ性状を示す。コンクリートの調合は、ホタテ貝殻砂の混合率を所定量以下に設定すれば、通常の碎石・碎砂コンクリートと同様に計画調合が設定できるため、JIS A 5308のレディミクストコンクリートに定める目標スランプを満足するようなコンクリートのフレッシュ性状を確保できる。空気量は、各種混和材（シリカヒューム等）を使用することで、普通コンクリートの標準値である4.5±1.5%以内の空気量を確保することは可能であり、ホタテ貝殻砂の扁平な形状の影響を調合で補うことが可能である。

なお、ホタテ貝殻砂の混和に比例して細骨材周辺の粗大空隙は増える傾向にあるため、コンクリートの単位容積質量は減少する傾向にある。従って、混和材使用量と単位水量を調整しながら

余剰ペースト量が増加するような調合上の調整を行ない、所定のワーカビリティーを確保する技術的な配慮が必要になる。最終的にW/C=0.3~0.6までの多種の計画調合を実機製造レベルで使用することは可能であり、W/C=0.6の場合のブリーディング試験結果からも、初期～凝結前までのブリーディングは十分に抑えられ、ホタテ混和による特別な影響は生じない。骨材形状に起因する所定のワーカビリティーを得るための調合上の配慮を行った場合でも、フレッシュ性状には大きく影響しないといえる。

#### 4.3 モルタルレベルの力学的性質への影響

図5にホタテ貝殻砂の物性影響が生じやすいモルタルレベルの力学特性と韌性改善効果を示す。a) 圧縮強さに示されるように、標準（黒）のホタテ貝殻砂を含まない調合に、ホタテ混和量を7割まで増加させると、一定の強度低下が生じ、骨材界面周辺の微小空隙の増加に伴う単位容積質量の減少の影響が生じる可能性があるが、ホタテ貝殻置換率を50%とし、シリカヒュームを5~10%混和することで改善することが確認された。一方で、b) 曲げたわみ曲線とc) 曲げ破壊

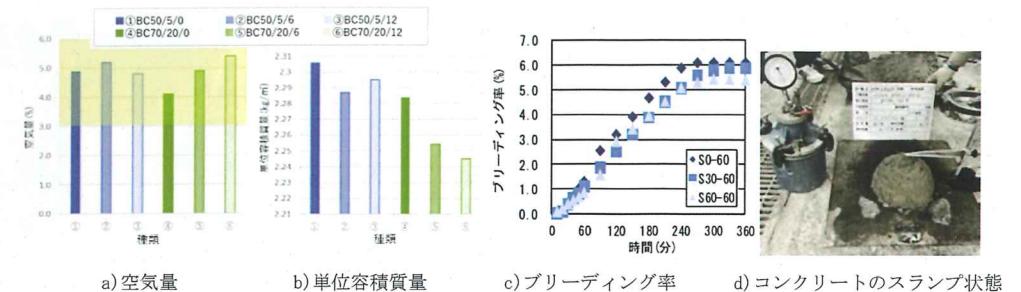


図4 ほたて貝殻砂を用いたコンクリートのフレッシュ性状<sup>9~20)</sup>

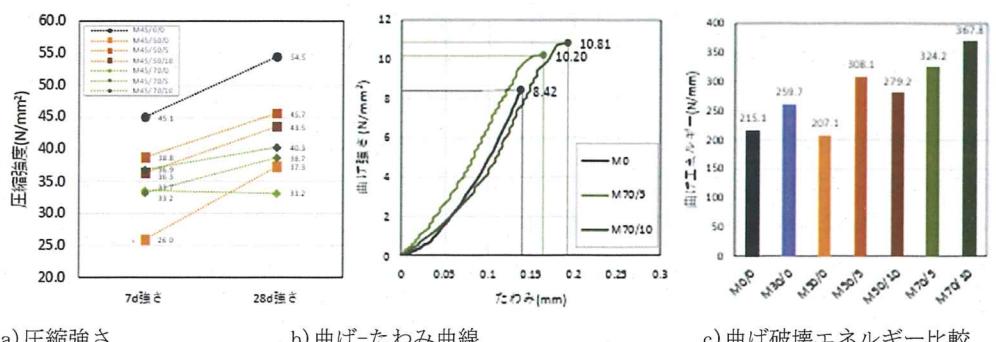


図5 ホタテ貝殻砂の物性影響が生じやすいモルタルレベルの力学特性と韌性改善効果<sup>13~18)</sup>

エネルギーの結果より、ホタテ貝殻砂にシリカヒュームを加えて組織の緻密化を図ることで、曲げ強さとたわみ変形量が改善し、曲げ破壊エネルギーに関しては、最大150%程度向上する結果となった。これらの結果は、PCaパネル部材への適用を想定すれば、平時における季節特有の熱的影響に伴う変形性状を始め、外部からの風圧・地震外力に対する頑強性と冗長性に対して効果を発揮する可能性が高いことに繋がり、更には軽量化と韌性向上性を踏まえた比強度換算した場合の品質が150%程度向上する性質は、モルタルレベル製品としての多くの要求品質を満たしやすい条件を有しているといえる。

#### 4.4 コンクリートレベルの力学的性質への影響<sup>13~28)</sup>

図6にホタテ貝殻砂の混和によるコンクリートレベルでの力学特性への影響を示す。ホタテ貝殻砂の細骨材置換による最大混和量は70%程度

であるが、粗骨材に代替できるホタテ貝殻骨材は存在しないことから、一般的には粗骨材は碎石骨材が利用される。従って、コンクリート物性を評価する際は、ホタテ貝殻砂による品質改善効果が最大化されるモルタル物性を踏まえ、粗骨材が加わることでその影響度がどの程度低減・緩和されるのかを判断する必要がある。a) 圧縮荷重～変形曲線より、無混入である標準（黒）と比較して、ホタテ貝殻砂を混入したコンクリートは、若干強度低下する傾向にあり、その下限値は約80%程度で、静弾性係数についても同様である。これは、ホタテ貝殻砂の扁平形状により、力学的影響が生じる硬化体組織が粗になり易いこと、ホタテ貝殻砂自体の硬度が標準の碎砂に比べて低い可能性があるためといえる。一方、シリカヒューム混和（5~20%）により、ホタテ貝殻砂の置換率が70%程度になった場合でも、品質改善が図られる傾向にあり、最大荷重までのひずみ進展は最大140%程度となるが、圧縮破壊エネルギー

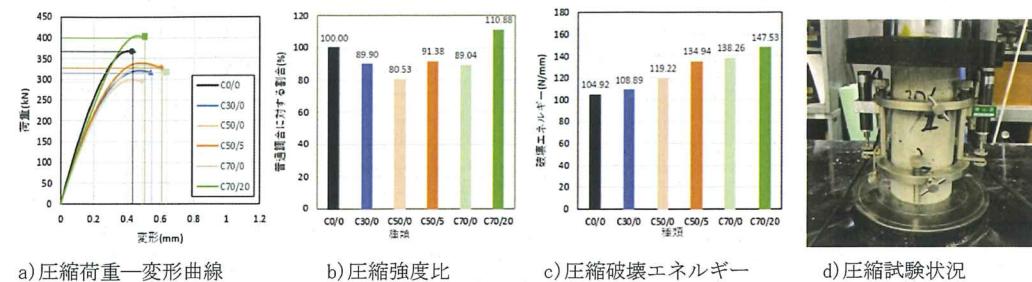


図6 ホタテ貝殻砂の混和によるコンクリートレベルの力学特性への影響<sup>13~20)</sup>

ギーがホタテ混和量に比例して増大し、破壊靱性が大きく向上することが特徴として示される。

#### 4.5 ほたて貝殻砂を用いたコンクリートの中性化抵抗性<sup>21~30)</sup>

図7にはほたて貝殻砂コンクリートにおける中性化抵抗性を示す。ここでは、ホタテ貝殻砂の置換量を最大70%，フレッシュおよび力学性状での物性改善のためシリカヒュームを最大20%程度、セメントの外割置換で混和している。その結果、温度20°C、湿度60%，CO<sub>2</sub>濃度5.0%環境における促進中性化暴露環境下において、BC70/20シリーズはBC50/5シリーズに比べて、1.5~2倍程度中性化しやすく、ホタテ混和量の最大化により透気性が増し、耐久性面での品質影響が生じる可能性がある。なお、BC50/5シリーズでは、貝殻砂中の微粉末が多く含まれた場合、含まない場合と比べて中性化深さが若干小さくなり、石灰系微粉末による組織の緻密化の効果が生じて、中性化抵抗性がやや改善する傾向にある。既往研究と同様に、本質的には粒形の良い石灰岩碎砂と異なり、扁平形状を持つほたて貝殻砂の置換率の増減は、中性化抵抗性に差を生じさせるため、その影響を踏まえた耐久性さらには耐用年数の設定の観点からホタテ貝殻砂の混和率を決定する必要がある。なお、PCaカーテンウォール部材の実機製造・施工は中心課題の一つであるため、部材内の配筋条件や配合計画に際しては、日本建築学会のプレキャスト鉄筋コンクリート工事標準仕様書などを参考した場合、耐久性上、有効

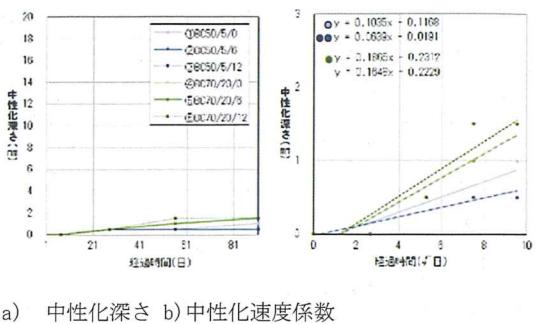


図7 ほたて貝殻砂を用いたコンクリートの中性化抵抗性<sup>21~30)</sup>

な仕上げのない非構造部材の最小かぶり厚さは30 mm程度であることから、本研究のほたて貝殻砂コンクリートにおける中性化深さは使用上問題のない範囲といえる。

#### 4.6 ほたて貝殻砂を用いたコンクリートの長さ変化

図8にはほたて貝殻砂を用いたコンクリートの乾燥収縮性状を示す。ここでは、ホタテ貝殻砂の置換量を最大70%，フレッシュおよび力学性状での物性改善のためシリカヒュームを最大20%程度、セメントの外割置換で混和している。一般に、コンクリートの空隙には、径の小さいものからゲル空隙、毛細管空隙、小径エントラップドエア、大径エントラップドエア等に区別され、内部水分の乾燥・蒸発により空隙孔全体に収縮力を与えるものから、水分蒸発に伴う質量変化のみが生じ体積変化には影響しないものまである。例え

ば、BC50/5シリーズでは、微粉末を含まない場合、最も収縮量が小さく、逆に、微粉末混入量の増加により収縮量が増大する。シリカヒュームと微粉末混入の影響で、組織の緻密化、つまり小径のエントラップドエアよりも毛細管空隙レベルによる多孔分布が卓越し、乾燥収縮に影響しやすい空隙構成が生じたことが考えられる。なお、BC70/20シリーズは、微粉末が少ない場合の収縮量が大きい。これは、ホタテ混和量が大きい場合におけるシリカヒュームを混和した修正調合により、既に十分なコンシステンシーと力学的性質が得られる状態となっていたため、エントラップドエア以下の毛細管空隙の体積変化に伴う乾燥収縮が生じやすくなつたためといえる。最終的には、PCaカーテンウォール部材を想定し、その同等の品質基準となる日本建築学会JASS5鉄筋コンクリート工事での各基準に準じ、計画供用期間の級が長期および超長期のコンクリートを想定した場合のコンクリートの乾燥収縮率として、800 μ以下で抑えられる物性となっており、外壁

として使用上問題のない品質を有している。なお、c) 長さ変化率と質量減少率の相関より、一定乾燥時間経過後の質量減少に伴う長さ変化が大きく生じる段階が確認される。これは、乾燥初期における小径エントラップドエアからの水分蒸発と毛細管空隙の水分蒸発に伴う、質量減少と乾燥収縮が同時に発生した後、更に乾燥期間が進むことで、毛細管空隙を主とした乾燥収縮が進行したと考えられる。貝殻砂の置換率とシリカヒューム添加率、微粉末混入率の影響で生じた空隙分布の違いは、質量減少や時間変化に伴う収縮率の増加につながる場合があるため、留意する必要がある。

#### 4.7 ほたて貝殻砂を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性

図9にはほたて貝殻砂コンクリートにおける凍結融解抵抗性を示す。ここでは、ホタテ貝殻砂の置換量を最大70%，フレッシュおよび力学性状での物性改善のためシリカヒュームを最大20%

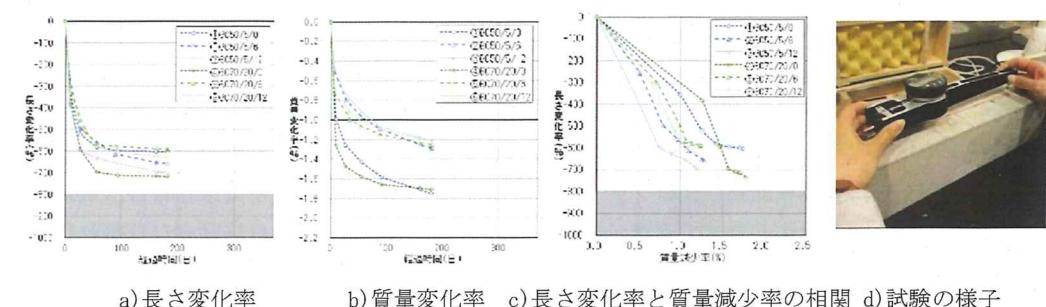


図8 ほたて貝殻砂を用いたコンクリートの乾燥収縮性状<sup>21~30)</sup>

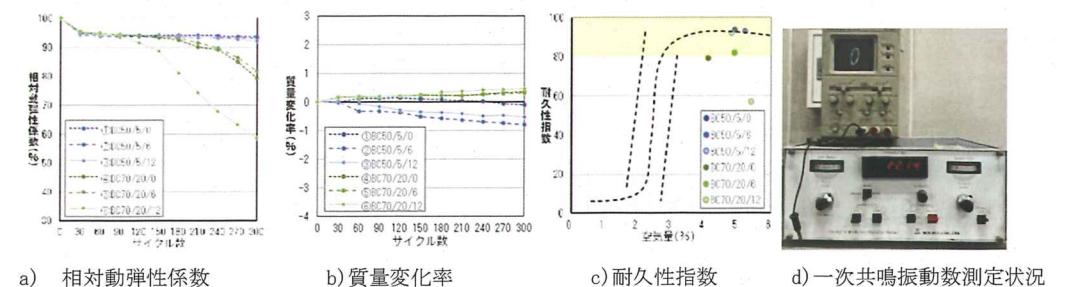


図9 ほたて貝殻砂を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性<sup>21~30)</sup>

程度、セメントの外割置換で混和している。凍結融解抵抗性は、国内であれば東北以北や甲信越地方など、冬季に氷点下を大幅に下回るような気象環境の地域で暴露されるコンクリートを想定した試験となり、コンクリート内部にある自由水が、氷点下の気温で凍結し、氷と水分移動による内部膨張圧を生じさせた後、気温上昇に伴う融解作用による応力緩和の繰返しに対して十分に抵抗し得るできる力学的性質を有する必要がある。a) 相対動弾性係数は、凍結融解作用300サイクルを終えても十分な剛性を保持しているか確認される指標であり、その保持率が90%以上を保つ種類があるのに対し、ホタテ混和量に比例して低下する場合もある。JASS5では、激しい凍結融解作用を受ける箇所に使用されるコンクリート(300サイクル時)の相対動弾性係数は85%以上とする必要があるため、ホタテ混和量BC70/20シリーズに関しては、寒冷地における十分な耐凍害性を有していない可能性があるため、調合上の対策が必要となる。

#### 4.8 ほたて貝殻砂を用いたコンクリートの鉄筋腐食ひび割れの進展抑制効果

建造物に多用される鉄筋コンクリート部材は、コンクリートの中性化、塩害暴露などにより、内部鉄筋から錆が発生して体積膨張し、コンクリートかぶり部に引張ひずみを生じさせて剥離・剥落現象が生じる。ここでは、中性化による鉄筋腐食が、塩害の場合と異なり全面腐食となることが多いことから、均一に腐食する鉄筋の促進電食試験

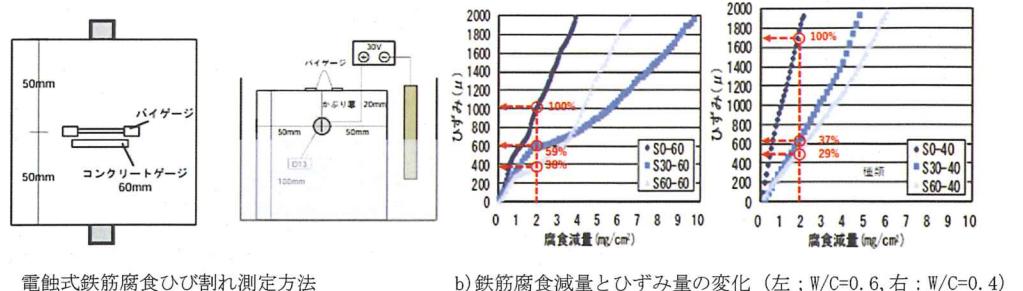


図10 ほたて貝殻砂を用いたコンクリートの鉄筋腐食ひびわれ抵抗性<sup>11~12)</sup>

により検討を行った。試験は、内部鉄筋はD13、かぶり厚さは20mmとし、ひずみ測定面を上面として、内部鉄筋が直接5.0%NaCl溶液に触れないように水槽内に設置し、鉄筋を陽極、銅板を陰極に接続し、直流安定化電源で30V一定の通電により、内部鉄筋を腐食させた。露出鉄筋部はエポキシでシールを行い、かぶり上面は腐食ひずみを測定するパイゲージ(計測区間50mm)を設置した。鉄筋の腐食減量は、10%クエン酸二アンモニウム水溶液に浸漬し、錆を十分に除去して、試験前後の鉄筋の重量変化を測定した。

図10にはたて貝殻砂を用いたコンクリートの鉄筋腐食ひびわれ抵抗性を示す。パイゲージひずみ量は、電蝕による内部鉄筋の腐食量に伴い増大しており、普通強度である場合はさらに顕著となっている。普通・高強度ともにホタテ貝殻砂が無混入の供試体における腐食減量2.0mg/cm<sup>2</sup>時の膨張ひずみ量は1000μを越える値となり、その双方がひび割れ発生リスクが高まった状態(100%)とした。それらに対し、ホタテ貝殻砂を30%、60%混和した種類双方のひずみ量を比較した結果、ほたて貝殻砂混入が増える程、かぶり部のひずみ量は50%程度以下に抑制されるようになり、ホタテ貝殻砂特有の立体拘束効果や、曲げ破壊強度が増大する効果などが、最終的にコンクリートかぶり部の鉄筋腐食ひび割れに伴うひずみ進展抑制に効果を発揮している可能性が確認できた。

## 5 ブルーカーボン固定したコンクリートの社会実装計画

### 5.1 材料調達・製品製造段階における炭素排出量の評価

図11にホタテ貝殻砂コンクリートのシステム境界を、図12にモデル建物のPCa部材製造によるCO<sub>2</sub>排出総量の比較を示す。ホタテ貝殻砂コンクリートは、広義のブルーカーボン固定という環境改善効果を、建物全体のライフサイクルにおける資材投入・使用のプロセスを通じて効果的に発揮する必要がある。換言すれば、資材投入の量的に環境改善効果を発揮するというより、建築仕上材など、建物に占める表面積が大きく確保され、長期利用に供する部位に積極使用されるのが望ましい。本研究では、PCaカーテンウォール資材を主用途として設定し、資材特有のサプライチェーンを踏まえ、資材調達段階(Scope3上流)、PCaCW工場製造の段階(Scope1,2)におけるCO<sub>2</sub>排出量を評価した。結果、基本調合からホタテ貝殻砂70%置換調合に変えた場合、材料の製造・輸送時のCO<sub>2</sub>排出量と、PCaCW部材製造に関わるCO<sub>2</sub>排出量は増加するが、炭酸カルシウムを含有する貝殻砂のCO<sub>2</sub>固定量を差し引くことで、基本調合より最大36%以上削減できることが確認された。

### 5.2 生物起源特性を考慮した炭素排出量の評価

図13に生物起源特性を踏まえた炭素排出量の評価を示す。一般にホタテ貝は、稚貝より成長し、その重量の半分程度が海洋中のCO<sub>2</sub>を吸収固定された炭酸カルシウムの貝殻骨格となり出荷されるまでに2~4年程度の歳月を重ねる。また、植物組織の葉緑体による、いわゆる光合成の炭素同化作用により大気中のCO<sub>2</sub>を吸収・蓄積して生長する自然林は、生成期間が30年程になると、住宅用木材の用材として市場供給される。一方、セメント原料で主成分が炭酸カルシウムである石灰石は、その賦存期間は、古生代からの数億年にも及ぶ歳月を要することから、炭素固

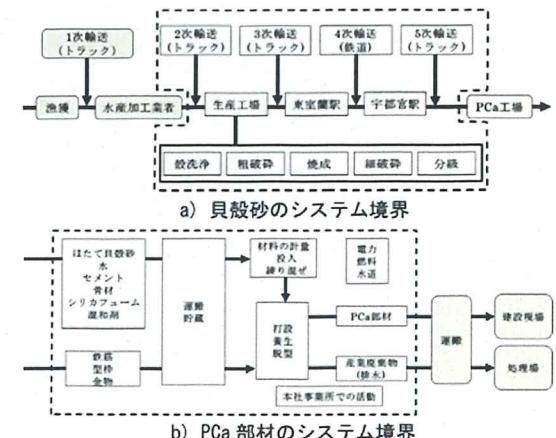


図11 ホタテ貝殻砂コンクリートのシステム境界<sup>18)</sup>

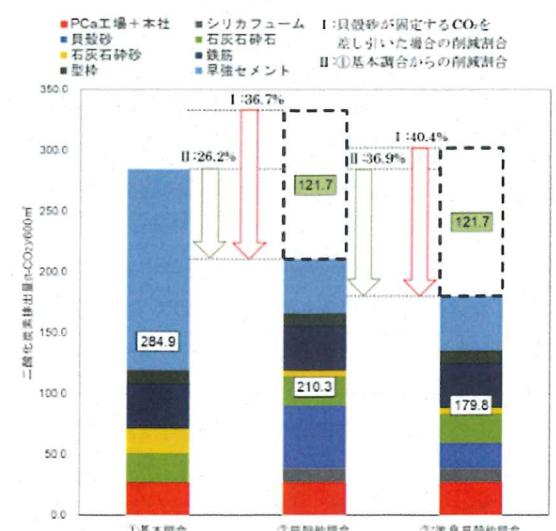


図12 PCaコンクリート部材製造のCO<sub>2</sub>排出総量比較<sup>16~18)</sup>

定期間に長大化するものの、海洋・大気中に炭素を放出しないため、炭素濃度の上昇を留めることは出来る。しかし、年当たり換算した場合の炭素固定量は極めて小さくなる。従って、単位重量あたりの炭素固定量が同じ材料の場合、生長期間が短期で、炭素固定製品としての使用期間が長期である評価を受けた場合、炭素固定性能が優れることになる。ここで、Y' : 炭素固定製品の蓄積期間(年)をY:生成期間(年)で除したE:炭素

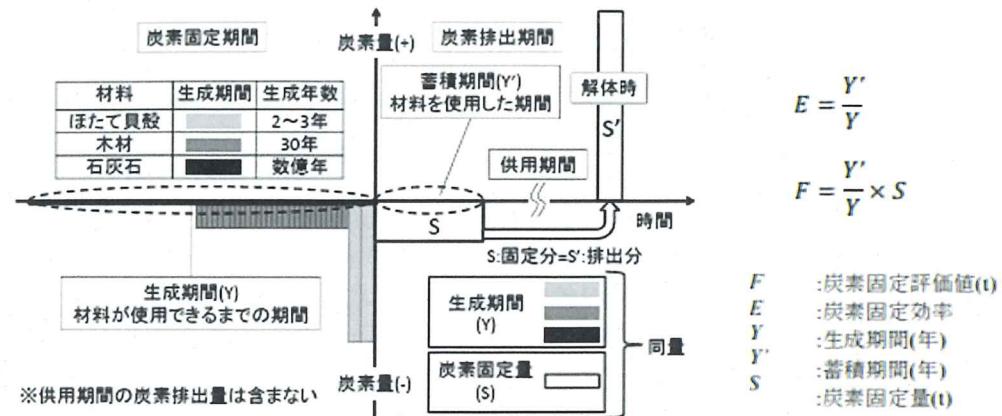


図 13 生物起源特性を踏まえた炭素排出量の評価<sup>11~12)</sup>

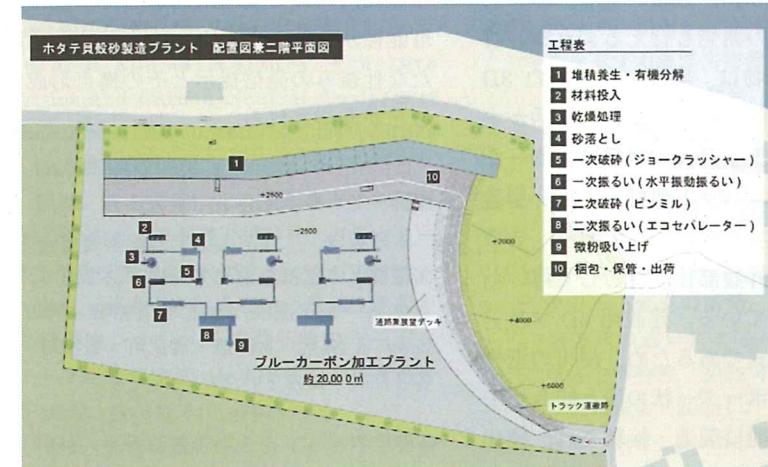
固定効率と、炭素固定製品に含まれる  $S$  : 炭素固定総量 (t) との積を  $F$  : 炭素固定評価値 (t) として定めた場合、炭素固定効率の値が大きいほど炭素固定性に優れることが示される。この炭素固定評価値の大きい順に列挙すると、ホタテ貝殻砂、木材、石灰石となり、ホタテ貝殻砂は炭素固定性能が一番優れる材料となる。実際には、各材料の市場での製造量や使用量に依存するが、ホタテ貝の生成期間は2~4年と極めて短期間であり、海水中の炭素を固定したコンクリート用細骨材として使用されるとともに、PCaコンクリート製品全体は、建物外壁として長期使用される耐久消費財であるため、炭素蓄積期間が長くでき、炭素固定効率を大幅に拡充できる。このような資源採取と製品利用の双方の観点で優れる特性を適切に評価できれば、最終的にはホタテ貝の漁獲量の維持と地域産業の活性化にも繋がり得るような、潜在的で多面的な環境改善効果を有する仕組みを有することになる。

### 5.3 ブルーカーボン・インフラの施設構想・設計提案～地域に根ざす海洋生物殻資源の再生拠点の提案～

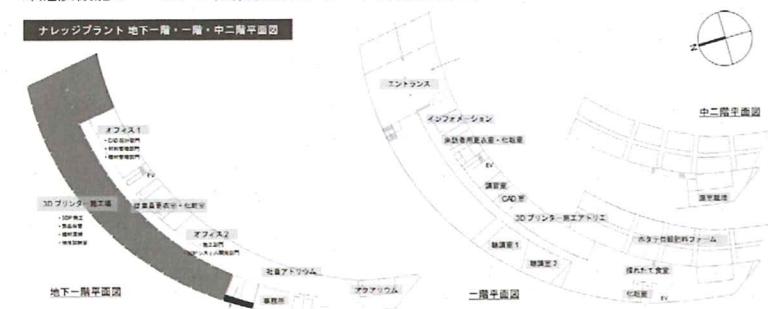
図14にブルーカーボン・インフラの施設構想・設計提案の一部<sup>31)</sup>を示す。本設計提案は、細田により2024年に提案されたものであり、日本のホタテ貝一大漁場である北海道オホーツク海



a) 敷地 ～ 北海道紋別郡雄武町沿岸部工業地域(約 2 万 m<sup>2</sup>)



b) 施設機能 1 ～ ホタテ貝殻砂加工プラント例(約 1 万 m<sup>2</sup>)<sup>31)</sup>



築に関わる財政支援等の適用も視野にいれた社会資本整備を実現する必要があろう。

具体的には、本構想施設では、ホタテ貝殻砂製造プラントと、製造した貝殻砂を使用した製品づくり、知識共有、消費拡大の動機支援を行うナレッジプラントの二つを柱にしており、特に後者については、実際にホタテ貝殻砂を混和したコンクリート製品に加え、3Dプリンター用ホタテ貝殻微粒分モルタル製品の開発も行えるような施設となっている。当該建物は、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を活かす目的を有するため、建築設計者・製品メーカーなどの技術者が、新たなユニット部材の設計・製造も行なわれるような環境も敷設されており、その一例として、実建物の外殻部仕上材として用いた外観イメージを展開している。建設用3Dプリンターは、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と組み格子で、連続体として機械的に製造・接続され、硬化後は、一定の剛性と変形スパンを有する製品となる。微細表面の空隙溝には、人の手で植物の種子を植えられる空間的余裕度があり、時間と共に緑化が成長する外構資材が実現されている。また、みかけの外壁体積に占める製品表面積を大きくとることができるため、暑中期の水分蒸散作用と適度な通風環境を活かした熱環境負荷の低減なども実現できる。

このような市場化展開を見据えた取り組みも拡充していく計画である。

## 6 まとめ

本稿は2009年より継続実施している、ブルーカーボン・アクト&インフラの構築に資する海洋生物殻コンクリート建材の開発について概要を示したものであり、ブルーカーボン・アクトとブルーカーボン・インフラ(Blue Carbon Act. & Infra.)の考え方を整理した後に、国内における主たる漁獲地である北海道におけるホタテ貝殻の発生状況の分析や、産学連携を通じて展開してい

る広義のブルーカーボンを固定したコンクリートの製品開発とその社会実装計画について概要を示した。今後、ブルーカーボン・インフラの構築にあたり重要なことは、食・工のつながりの基盤となる地域産業との連携である。ブルーカーボン・アクトで運び込まれたホタテ貝殻は、やがて土木・建築資材や肥料・食材など地産地消のみならず国内外での流通産品としても価値を生みだす可能性があることから、この社会的活動自体が新たな仕組みの発信提示とその拠点形成となり得ることが期待される。

### 謝辞

本研究は、工学院大学での产学連携研究および関係諸機関との連携を通じて実施されており、高橋カーテンウォール工業(株)、(株)北海道裕雅、(株)ビッシュル、Leave a Nest、北海道・雄武町・豊浦町・森町の関係者各位より協力をいただいた。

### 文 献

- 1) 田村, 友澤, 野口, 骨材回収型リサイクル指向コンクリートの開発, セメント・コンクリート論文集, No.51, pp.494-499 (1997)
- 2) 田村, 友澤, 野口, 材料保存を基調としたリサイクルコンクリートの提案と実証, コンクリート工学, Vol.38, No.11, pp.29-35 (2000)
- 3) 田村, テクノロジー最前線, 日本初の施工例となった完全リサイクルコンクリート, 日経エコロジー3月号, pp.53-56 (2001)
- 4) M. Tamura, F. Tomosawa, T. Noguchi and Y. Kitsutaka, Concrete Design toward Complete Recycling, Proceedings of fib international Symposium, Concrete and Environment, Berlin, Vol.1, CD-ROM (2001)
- 5) 田村, 野口, 友澤, セメント回収型完全リサイクルコンクリートの完全リサイクル住宅(SPRH)への実施工検討, 日本建築学会技術報告集, 第21号, pp.27-32 (2005)
- 6) F. Tomosawa, T. Noguchi, M. Tamura, The Way Concrete Recycling Should Be, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.3, No.1, pp.3-17 (2005)
- 7) 田村, リサイクルコンクリートによるカーボンニュートラル化, コンクリート工学, Vol.48, No.9 pp.124-128 (2010)
- 8) M. Tamura and *et.al.*, Prediction of amount of calcium carbonate concrete materials generated from concrete structure stocks in the past and future RILEM Week (2023)
- 9) Komuro, K and M. Tamura, Fracture Properties and Carbon Neutral Analysis of Concrete Materials Containing Disposed Sea Shell, 1st ICSU (2010)
- 10) 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)
- 11) 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)
- 12) 小室, 田村, 生体構造特性を有する海洋生物殻を混入した鉄筋コンクリート仕上げ部の動的劣化特性, pp.187~190, 2012年日本建築工学会研究発表論文集 (2012)
- 13) 高橋, 田村, 佐々木, 斎藤, 尾関, 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: ほたて貝殻使用モルタルのフレッシュ性状・力学特性, 2021年度日本建築学会関東支部研究報告集 (2022)
- 14) 高橋, 田村, 佐々木, 斎藤, 尾関, 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2: ほたて貝殻使用コンクリートのフレッシュ性状・力学特性, 2021年度日本建築学会関東支部研究報告集 (2022)
- 15) 斎藤, 田村, 高橋, 佐々木, 尾関, 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)
- 16) 佐々木, 田村, 斎藤, 尾関, 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: ほたて貝殻使用モルタルのフレッシュ性状・力学特性, 2022年度日本建築学会学術講演梗概集 (2022)
- 17) 斎藤, 田村, 佐々木, 尾関伶太, 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2: ほたて貝殻使用コンクリートの力学特性, 2022年度日本建築学会学術講演梗概集 (2022)
- 18) 尾関, 田村, 佐々木, 斎藤, 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, 2022年度日本建築学会学術講演梗概集 (2022)
- 19) 佐々木, 田村, 佐々木, 斎藤, 尾関, 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4: ほたて貝殻砂使用コンクリートの耐久性評価と外観防汚効果の検討, 2022年度日本建築学会関東支部研究報告集 (2023)
- 20) 斎藤, 田村, 佐々木, 尾関, 佐々木, 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5: ほたて貝殻砂の製造方法の違いによるモルタルのフレッシュ性状・力学特性, 2022年度日本建築学会関東支部研究報告集 (2023)
- 21) 尾関, 田村, 佐々木, 斎藤, 山本, 小関, 井口, 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4: ほたて貝殻砂使用コンクリートの長さ変化率と中性化抵抗性, 2023年度日本建築学会学術講演梗概集 (2023)
- 22) 小関, 田村, 佐々木, 斎藤, 尾関, 山本, 井口, 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5: ほたて貝殻砂の産地・製造方法の違いによるモルタルのフレッシュ性状, 2023年度日本建築学会学術講演梗概集 (2023)
- 23) 山本, 田村, 佐々木, 斎藤, 尾関, 小関, 井口, 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6: ほたて貝殻砂の産地・製造方法の違いによるモルタルの力学特性, 2023年度日本建築学会学術講演梗概集 (2023)
- 24) 井口, 田村, 佐々木, 斎藤, 尾関, 山本, 小関, 炭素固定性を有する海洋生物殻廃棄物を用いたPCaコンクリートの部材の開発 その7: ほたて貝殻砂使用コンクリートの外観防汚効果の検討, 2023年度日本建築学会学術講演梗概集 (2023)
- 25) 田村, ホタテ貝殻廃棄物によるブルーカーボン

- 固定性を活かしたカーボンニュートラルコンクリートの開発、新技術説明会、科学技術振興機構 (2023)
- 26) N. Hosoda, K. Iguchi, M. Tamura, T. Sasaki, T. Saito, R. Ozeki, T. Yamamoto, A. Koseki, Development and basic property evaluation of mortar for 3D printer using sea shells waste with blue carbon fixation properties, The 22nd International Symposium on Advanced Technology (ISAT22) (2023)
- 27) 細田, 井口, 佐々木, 斎藤, 尾関, 山本, 小関, ブルーカーボン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と仕上げ性状の評価 その1 ほたて貝殻砂微粉を用いた3Dプリンター用モルタルの基礎性状, 2023年度日本建築仕上学会論文報告集 (2023)
- 28) 井口, 田村, 佐々木, 斎藤, 尾関, 山本, 小関, ブルーカーボン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と仕上げ性状の評価 その2 ほたて貝殻砂の微粉混入割合の違いによるコンクリートの基礎性状, 2023
- 29) 年度日本建築仕上学会論文報告集 (2023)  
井口, 田村, 佐々木, 斎藤, 山本, 小関, 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6 ほたて貝殻砂使用コンクリートのフレッシュ性状・力学特性, 2023年度日本建築学会関東支部研究報告集 (2024)
- 30) 尾関, 田村, 井口, 佐々木, 斎藤, 山本, 小関, 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7 ほたて貝殻砂使用コンクリートの耐久性評価, 2023年度日本建築学会関東支部研究報告集 (2024)
- 31) 細田夏花, ブルーカーボン・インフラ-風土に根ざす海洋生物殻資源の再生拠点の提案-, 工学院大学卒業制作 (佳作受賞), 2024.1
- 32) 水産系廃棄物発生量等調査 (令和3年度発生分), 北海道水産林務部水産局水産振興課 HP, 2022
- 33) 安江, 遠山, 廃棄貝がらの資源化による循環型社会への挑戦, *Journal of the Society of Inorganic Materials*, 8号 pp.58-68 (2001)