

炭素固定性を有する海洋生物殻砕砂コンクリート製品の屋外曝露による美観影響と劣化要因の分析

DA21100 河野 琢磨

1. はじめに

海洋生物殻であるほたて貝殻は加工方法によって、主に真菌類（カビ）に対する抗菌作用等の清浄効果が確保でき、これを PCa コンクリート部材（以下、PCa 部材）に使用することで、汚れが付着しづらいという効果が実証できれば、製品の付加価値につながる。既往の研究^{1)~4)}では、ほたて貝殻を破碎したほたて貝殻砂を用いてコンクリートを製作し、基礎物性を確認した。本研究では、前述の防汚効果と PCa 部材の汚れ改善対策を検討するため、屋外曝露試験体における仕上げ角の影響による汚れ特性を評価する。また、生物汚れ^{5)~7)}に影響する真菌類や緑藻類の発生量を、生物の代謝エネルギー量を示す ATP（アデノシン三リン酸）量を測定することで確認し、汚れの予防保全評価の可能性を検討する。また、カーテンウォールでの用途を目的としているため、模擬光沢骨材試験体による拡散光の反射照度の評価によりテクスチャー評価を行い、さらに、仕上げ方法の異なるタカセ貝殻砂コンクリートの試験体を用いて輝度を評価し、意匠的価値があるのか検討する。

2. 研究概要

2.1. 目的

工学院大学八王子キャンパスの屋外曝露場にて、貝殻砂置換率、シリカフェーム（以下、Sp）の添加率が異なる試験体を長期間曝露し、色彩を測定して、初期値と比較することで貝殻砂コンクリートにどれほど汚れが付着しづらい効果があるのかを検証する。また、曝露試験体におけるカビ類などの生物的汚れを、ATP 測定にて確認する。ATP 測定では、汚れを目に見える形で数値化し、貝殻砂を使用することで、抗菌作用等により PCa 部材の汚れが目立たなくなる、防汚効果が期待できるかを検証する。さらに、コンクリートを調合する上でタカセ貝殻砂の混入体積割合に対する放射照度・輝度の相関があるのかを模擬光沢骨材試験体により検証し、仕上げ方法の異なるタカセ貝殻砂コンクリート板にて光沢度が屋外曝露による紫外線、汚れ等の影響により変化するか基準となる初期値を評価する。

2.2. 使用材料及び研究方法

表 1 に使用材料を、表 2 にコンクリート調合（研究 1・2）を、表 3 にコンクリート調合（研究 3）を、表 4 に屋外曝露試験体における各面の設定を、表 5 に試験の要因

表 1 使用材料

	材料	記号	名称	密度(g/cm3)
研究 1・2	水	W	上水道水	1.00
	セメント	C	早強ポルトランドセメント	3.14
	混和材	Sp	シリカフェーム	2.20
	細骨材	Ls	高知県鳥形山石灰石砕砂	2.65(表乾)
		Hs	ほたて貝殻砂	2.62(表乾)
	粗骨材	Lg	高知県鳥形山石灰石砕石	2.65(表乾)
	化学混和剤	Ad	高性能減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物
研究 3		AE	AE 剤	天然樹脂酸塩
	水	W1	工場地下水	1.00
	セメント	C	ホワイトセメント	3.05
	細骨材	S1	鳥形山石灰石砕砂	2.65(表乾)
		Hbs	ほたて貝殻砂	2.57(表乾)
		S2	タカセ貝殻砂	2.75(表乾)
	粗骨材	G	鳥形山石灰石砕石	2.70(表乾)
	混和材	Ad	高性能減水剤	-
		AE	AE 剤	-

表 2 コンクリート調合（研究 1・2）

置換率 CHs/Sp	単位量(kg/m3)							
	C	W	Ls	Hs	Lg	Sp	Ad(C×%)	AE(C×%)
C0/0	356	160	849	0	976	0	1.07(0.3%)	1.07(0.3%)
C30/0	356	160	594	252	976	0	1.07(0.3%)	1.07(0.3%)
C50/0	356	160	425	420	976	0	2.14(0.6%)	0.71(0.2%)
C50/5	356	168	403	399	976	18	2.14(0.6%)	0.71(0.2%)
C70/0	356	160	255	588	976	0	1.78(0.5%)	0.71(0.2%)
C70/20	356	192	204	470	976	71	2.49(0.7%)	0.71(0.2%)

表 3 コンクリート調合（研究 3）

色と S2 割合 (色-S2%)	W1/C (%)	単位量(kg/m3)						
		W1	セメント		細骨材		粗骨材	
			C	S1	Hbs	S2		
白-S2 5%	44.9	160	356	356	747	40	971	

表 4 屋外曝露試験体における各面の設定

面	仕様
①135Bd	雨水流量：小 表面状態：サンドブラスト有（切断後） 日当たり：悪（北側） 色差測定：モルタル面 ATP 測定：モルタル面
②90Nw	雨水流量：大 表面状態：サンドブラスト無 日当たり：中（西側）
③90Bw	雨水流量：大 表面状態：サンドブラスト有 日当たり：中（東側）
④180Bw	雨水流量：小 表面状態：サンドブラスト有 日当たり：良（上面）
⑤45Bw	雨水流量：中 表面状態：サンドブラスト有（切断後） 日当たり：良（南側） 色差測定：モルタル面 ATP 測定：粗骨材面（⑤）、モルタル面（⑥）



写真 1 屋外曝露試験体の設置状況

表5 試験の要因と水準

要因	水準
セメント種類	早強ポルトランドセメント（一定）
水結合材比	45%（一定）
細骨材中の貝殻置換率(%)	0, 30, 50, 70%
セメントに対するSp割合	0, 5, 20%
サンドブラスト処理	B（ブラスト有）, N（ブラスト無）
雨掛かり条件	w（雨掛かり有）, d（雨掛かり無）
模擬壁面角度	45°, 90°, 135°, 180°
曝露試験体設置場所	東京都八王子市 工学院大学の屋外曝露場
屋外曝露期間	2022～2032年（10年間）

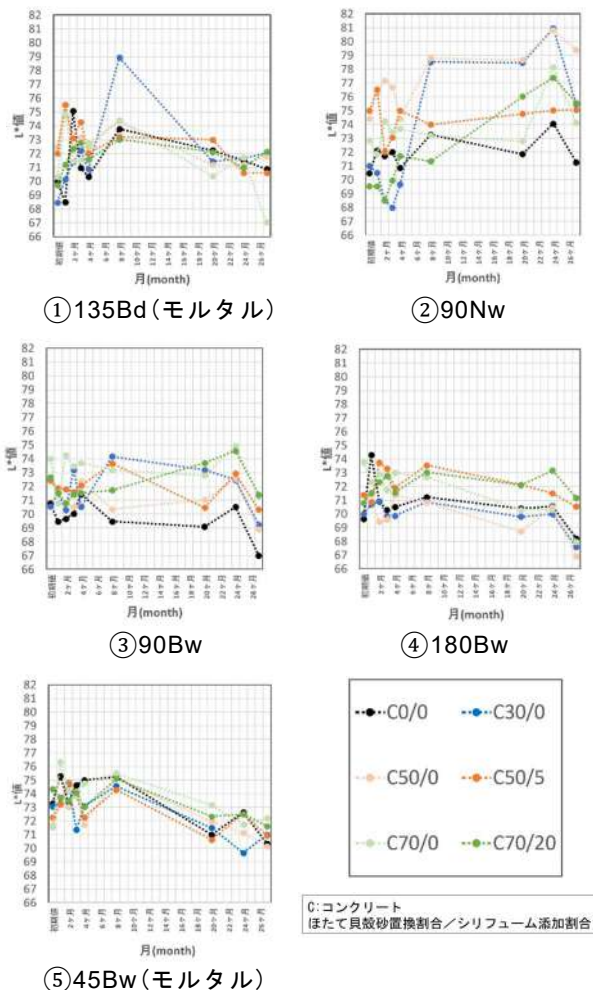


図1 屋外曝露試験体のL*値の推移

と水準を、表6に試験項目と設置方法及び試験内容を示す。表4の①～⑤に示した曝露試験体の5面について、研究1・2では各面3か所ずつ色差を定期的に測定し、結果の平均値から評価を行い、ATP測定は曝露期間21か月目、27か月目に測定を行った。

研究3では、25種類の模擬光沢骨材試験体の分光反射率（放射照度）を測定し、暗室では5種類の試験体（黒色）の輝度を測定し、評価を行った。また、タカセ貝殻砂コンクリート板の屋外曝露前の基準となる輝度の初期値を測定し、結果の平均値から評価を行った。

2.3. ATP 測定の仕組み

図4にATP（アデノシン三リン酸）化学式を示す。ATP

表6 試験項目と設置方法及び試験内容

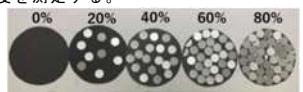
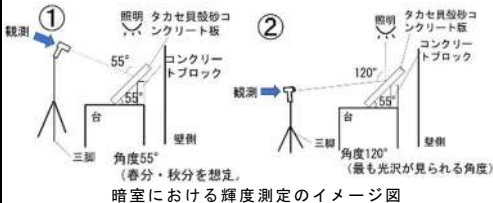
試験項目		方法及び内容
研究1	色彩差測定	JIS Z 8781: 色差計を用いて、L*値・a*値・b*値を計測。初期値と比較して ΔL^* ・ Δa^* ・ Δb^* と、それらを用いて算出した彩度差 ΔC^* 、色差 ΔE を用いて評価 定義式 $\Delta C^* = \sqrt{(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$ $\Delta E = \sqrt{(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 + (\Delta L^*)^2}$
	屋外曝露試験体 ATP 測定	ATP 測定装置と酵素入り専用湿潤綿棒を使用し、屋外曝露試験体6体の36面について下記の手順でATP量を測定する 1) 冷蔵保存(2～8℃)した湿潤綿棒ホルダーを室温に戻す。 2) 手を触れないよう注意して、ホルダーから綿棒を抜く。 3) 綿棒をしならせるように検査対象を拭き取る。縦横10往復綿棒を回転させながら行う。 4) 綿棒をホルダーに戻し、完全に押し込む。 5) 綿棒の本体を持って振り下ろし、ホルダー内で酵素液と基準液を混ぜる。 6) ATP測定装置に湿潤綿棒を入れ、測定を行う。  検査対象と使用機材  6)の様子
研究2	放射照度測定	機材：分光光度計（UPRtek） 使用する試験体：模擬光沢骨材試験体（黒色、グレー（濃）、グレー（薄）、白）の5種類、銀色シール面積率0.20.40.60.80%の5種類の計25種類 1) 試験体真上の500mmの距離から測定する。 2) 室内の白色蛍光灯（昼間想定）で照らした場合と真横からオレンジライト（夕方想定）で照らした場合で行う。 3) 分光光度計により、分光スペクトルを測定し、それぞれ放射照度を比較する。
	輝度測定	機材：ミノルタ輝度計 nt-1° 使用する試験体：模擬光沢骨材試験体（黒色）、面積率0.20.40.60.80%の計5種類 1) 室内を暗室とし、昼光を想定した光源（D65）で真上から垂直に試験体を照らす。机上の30°の角度からの距離を1000mmとする。（計：5通り） 2) JIS C 7614：照明の場における輝度測定方法に準じ、試験体の輝度を測定する。  面積率・色の異なる模擬光沢骨材試験体（黒色色紙の場合）
研究3	仕上げ方法	記号 仕上げの流れ 表面保護材の塗布 サンドブラスト（弱） 酸洗い I II III
	タカセ貝殻砂コンクリート板 輝度測定	測定機材：ミノルタ輝度計 nt-1° 試験体記号：I、II、III 1) 室内を暗室とし、昼光を想定した光源（D65）で試験体を照らす。試験体は春分・秋分を想定した角度55°に立て掛ける。試験体と輝度の距離は1000mmに設定する。 2) 測定は光源と輝度計で測定する面の角度を下記の図のように、①PCを垂直に見た場合の角度：55°と②PCを見上げた際に最も光沢が見える角度：120°の2通り行う。試験体ごとに3箇所ずつ、I.タカセ貝殻砂骨材を1個だけ含んだ面と、II.タカセ貝殻砂が無く、石灰砂砂などが特長的に見えていない面を測定する（計：36通り）。 3) JIS C 7614：照明の場における輝度測定方法に準じ、試験体の輝度を測定する。  暗室における輝度測定のイメージ図



図2 屋外曝露試験体 イメージ図

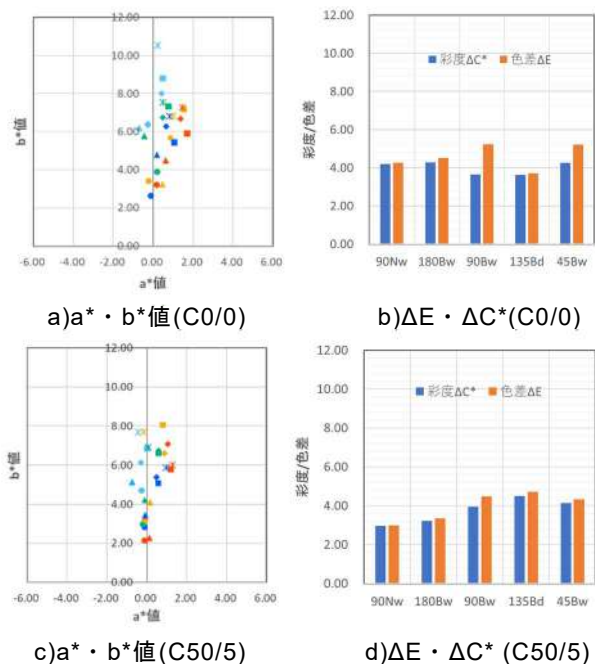


図 3 色差と彩度差の推移

(初期値, 9 か月, 21 か月, 24 か月, 27 か月)

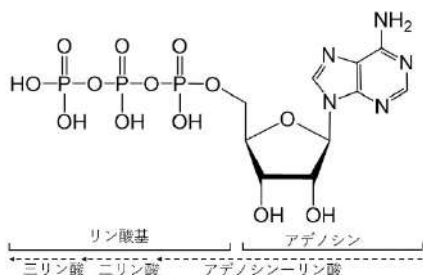


図 4 ATP (アデノシン三リン酸) 化学式

測定とは、すべての生物の細胞内に存在する ATP を酵素などと組み合わせて発光させ、その発光量を測定することで、測定箇所の生物的汚れを確認する方法である。発光量は、ATP、ADP、AMP の総量に対して直接比例する相対発光量 (RLU 値) として検出されるため、RLU 値が高いほど生物的汚れが多いことを示す。

3. 試験結果と考察

3.1. L*値の測定結果

図 1 に屋外曝露試験体の L*値の推移を示す。初期値 (プラスト後) では、ほたて貝殻砂置換率が増えるほど L*値は大きく、Sp の添加で L*値は小さくなる傾向が見られた。屋外曝露により、全ての面において L*値が小さくなる傾向が見られた。

3.2. a*値・b*値の結果と ΔE・ΔC*の比較

調査 C0/0、C50/5 について、図 3 に色差と彩度差の推移 (初期値, 9 か月, 20 か月, 24 か月, 27 か月) を示す。初

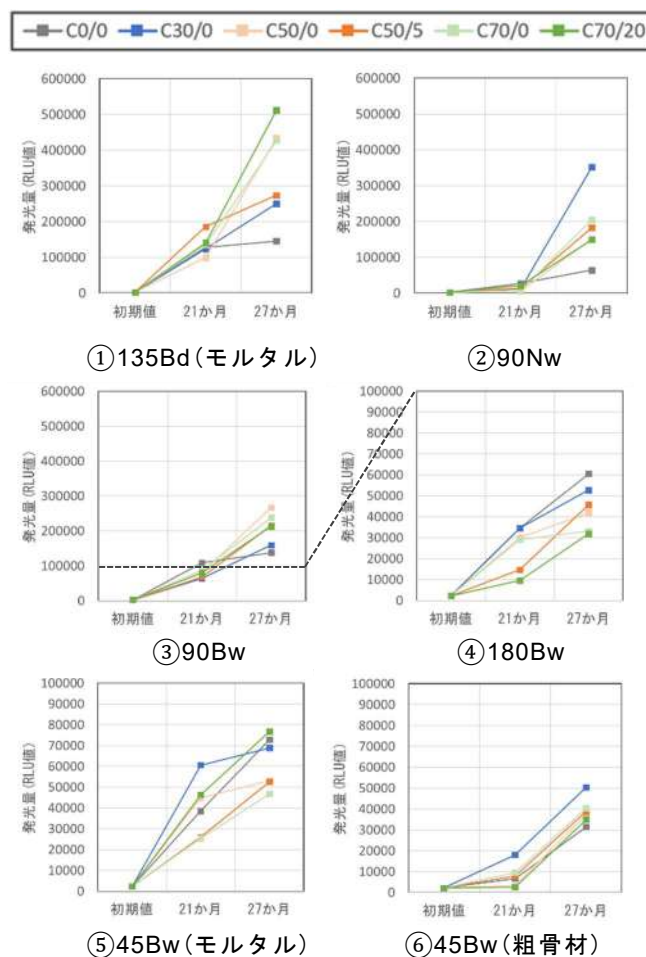


図 5 ATP 測定による RLU 値 (初期値, 21 か月, 27 か月)

期値 (プラスト後) において、C50/5 は Sp を添加しているためか、C0/0 と比較して寒色を示す傾向が見られた。さらに、いずれの面も a*値、特に b*値がプラス方向に大きくなり、暖色に近づいた。

3.3. ATP 測定結果

図 4 に ATP 測定による RLU 値 (初期値, 21 か月, 27 か月) を示す。初期値は同じ材齢で、室内にて保管していた円柱供試体の全ての面で ATP 測定を行い、汚れ量はその結果の平均値である 2300RLU 値としている。⑤、⑥から、屋外曝露により粗骨材部分には汚れが付きづらいことが分かった。またグラフ①～③では、日当たりの悪い 135Bd で汚れの量が多く、次いで 90Nw、90Bw において RLU 値が急増しているのに対し、④～⑥の日当たりの良い 180Bw、45Bw (モルタル)、45Bw (粗骨材) では、緩やかに増加した。

3.4. 色差と ATP 測定結果からの考察

図 1・3・5 より C50/5 と C0/0 において、ΔE の変化量に対して ΔC* の変化量が占める割合が大きいため、主に藻類・地衣類・コケ類の増殖が生物的汚れの原因でないかと予測される。C50/5 は C0/0 と比べ、日当たりの良い面では RLU 値が抑えられる傾向が見られたが、その他の面では有意的な傾向が見られなかったため、現状では、

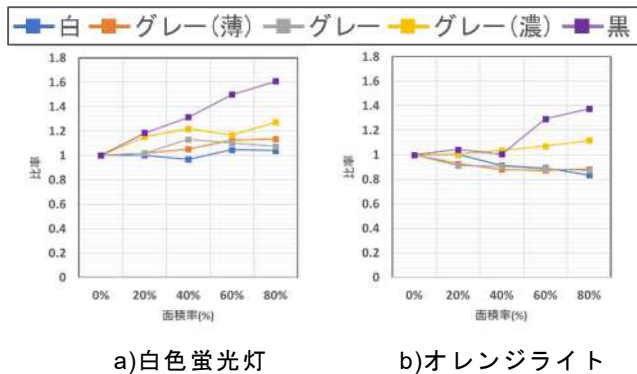


図 6 単位面積当たりの放射照度の比率

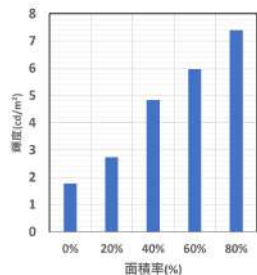
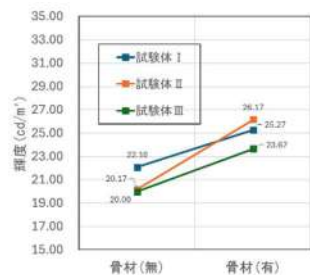


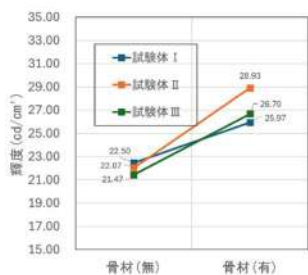
図 7 暗室における面積率の異なる黒色色紙の輝度



写真 2 屋外曝露試験体設置状況（イメージ図）



a)55°



b)120°

図 8 暗室におけるタカセ貝殻砂コンクリート板の輝度

ほたて貝殻砂を用いることで防汚効果が見られるとはいえないと考えられる。

3.5. 放射照度の測定結果

図 6 は単位面積当たりの放射照度の比率を示す。放射照度は白色蛍光灯、オレンジライトのエネルギー量によって値が異なるため、単位面積当たりの放射照度の比率による比較を行った。図 6 a),b)は各色紙の面積率 0% の比率を 1(基準値)とし、その変化率を示したグラフである。白色蛍光灯の放射照度の比率は、全体的に銀色シールの面積率の増加に伴い大きくなり、特に黒色の場合大幅に大きくなる傾向が見られた。また、オレンジライトの放射照度の比率では、白、グレー(薄)、グレーの場合、面積率の増加に伴い少し減少する傾向が見られ、グレー(濃)、特に黒は比率が増加している傾向が見られた。

3.6. 輝度測定結果（模擬光沢骨材試験体）

図 7 は暗室における面積率の異なる黒色色紙の輝度を示す。測定目への照度は 110Lux 程度と同一であることを測定にて確認した。黒色色紙の輝度は銀色シールの面

積率増加に伴い、輝度も大きい値となっていた。

3.7. 輝度測定結果（タカセ貝殻砂コンクリート板）

図 8 に暗室におけるタカセ貝殻砂コンクリート板の輝度を示す。グラフ a),b)より、貝殻砂骨材が含まれている有の面の方が輝度は高くなっており、最も光沢が見られる 120°の角度では 55°より値が少し大きくなっていた。現状では、仕上げ方法による輝度の違いは見られなかったため、今後写真 2 のように屋外曝露を行い、曝露による汚れや紫外線等の影響するのか確認する必要がある。

4. まとめ

- 1) 屋外曝露により試験体の L*値が小さく、b*値が大きくなる傾向が見られた。
- 2) 色差と ATP 測定の結果から、主に藻類・地衣類・コケ類の増殖が生物的汚染の原因と予測される。
- 3) ATP 測定により、生物的汚染は日当たりが大きく関係していると考えられる。
- 4) 現状の結果では、ほたて貝殻砂を用いることで防汚効果が見られるとはいえなかった。
- 5) 模擬光沢骨材の光沢面積が増加すると、放射照度・輝度ともに大きくなった。
- 6) タカセ貝殻砂コンクリート板の輝度(初期値)は、骨材を含む面が含まない面に比べ、大きくなっていた。

謝辞

本研究は、工学院大学と高橋カーテンウォール工業(株)との共同研究であり、多大な協力をいただいた。

参考文献

- 1) 井口、細田ら、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, その 2, 2023 年度日本建築仕上学会論文報告集(2023)
- 2) Komuro and Tamura, Fracture Properties and Carbon Neutral Analysis of Concrete Materials Containing Disposed Sea Shell, 1st ICSU, 2010
- 3) 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, 2012
- 4) 尾関ら、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 7, 2023 年度日本建築学会関東支部研究報告集, 2024, 4
- 5) 仕入ら、コンクリート表面の汚れとその対策, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.27, No.7, 1986
- 6) 市坪ら、コンクリートの景観評価に及ぼす汚染物質の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 18, No.1, 1996
- 7) 市坪ら、コンクリート表面の汚れに及ぼす生態系物質の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.1, 1999
- 8) 河野ら、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 3, 2023 年度日本建築仕上学会論文報告集, 2024.10
- 9) 河野ら、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 8, その 9, 2024 年度日本建築学会関東支部研究報告集, 2025.3