

Title	廃棄物をリサイクルする持続可能なコンクリート素材の可能性と付加価値の探求
Sub Title	Exploring the potential and added-value of sustainable concrete materials through recycling of waste resources
Author	笹川, 陽子(Sasagawa, Yoko) Waldman, Matthew
Publisher	慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科
Publication year	2023
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2023年度メディアデザイン学 第1012号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002023-1012

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

修士論文 2023年度

廃棄物をリサイクルする持続可能な
コンクリート素材の可能性と付加価値の探求



慶應義塾大学
大学院メディアデザイン研究科

笹川 陽子

本論文は慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科に
修士(メディアデザイン学)授与の要件として提出した修士論文である。

笹川 陽子

研究指導委員会：

マッシュ ウォルドマン 教授 (主指導教員)

山岡 潤一 専任講師 (副指導教員)

論文審査委員会：

マッシュ ウォルドマン 教授 (主査)

山岡 潤一 専任講師 (副査)

杉浦 一徳 教授 (副査)

修士論文 2023年度

廃棄物をリサイクルする持続可能な コンクリート素材の可能性と付加価値の探求

カテゴリ：デザイン

論文要旨

コンクリートの原料である砂不足とセメントの製造時の環境負荷が喫緊の課題になっている。この課題に対応するため、大量に排出される産業廃棄物を代替材料として活用するリサイクルが進んでいる。本研究は、大量に排出される高炉スラグと身近な廃棄物をコンクリート素材にリサイクルすることで環境負荷を減らし、新たな経済的価値を持つ素材として活用する可能性を探る。身近な廃棄物には、17種類の廃棄物を使用。物理的特性の強化が見込まれるいくつかの素材について耐衝撃性、曲げ強度、寸法安定性の物性試験を行った。また、既存の研究が主に物理的性質として素材の機能や性能に焦点を当てる一方で、本研究はその他の特性が付加価値になる可能性に着目する。意匠性のほか、持続可能性に関わる素材の性質なども踏まえて、開発した素材それぞれについて、どのような要素が建築家に付加価値として認識されるかを評価した。

キーワード：

コンクリート, 素材のデザイン, サーキュラーデザイン, リサイクル, 廃棄物

慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

笹川 陽子

Abstract of Master's Thesis of Academic Year 2023

Exploring the Potential and Added-Value of Sustainable Concrete Materials through Recycling of Waste Resources

Category: Design

Summary

The scarcity of sand and the environmental impact of cement production are urgent issues. Recycling industrial waste as alternative materials has been progressing to address this challenge. This research explores the potential of recycling blast furnace slag and local waste as concrete materials to reduce environmental impact and create materials with new economic value. Seventeen types of local waste were used, and physical tests for impact resistance, flexural strength, and dimensional stability were conducted on selected materials. While previous studies focus on the functional aspects of materials, this research highlights the potential value of other characteristics. Considering factors such as design aesthetics and sustainability, the evaluation assessed which elements of the developed materials are recognized by architects as added value.

Keywords:

concrete, material design, circular design, recycle, waste

Keio University Graduate School of Media Design

Yoko Sasagawa

目 次

第1章 序論	1
1.1. はじめに	1
1.2. コンクリートの持続可能性と課題	1
1.3. 廃棄物の未活用	2
1.3.1 高炉スラグ	2
1.3.2 身近な廃棄物	3
1.4. 本研究の目的	4
1.5. 本研究の構成	4
第2章 関連研究	6
2.1. サーキュラーデザインとコンクリート	6
2.1.1 サーキュラーエコノミーの原則と戦略の実践	6
2.1.2 廃棄物の活用	8
2.1.3 ニーズとウォンツ	9
2.2. 身近な廃棄物をリサイクルする建材	9
2.3. 本研究の位置付け	11
第3章 デザイン	13
3.1. コンセプト	13
3.1.1 身近な廃棄物を用いるコンクリート素材	13
3.1.2 想定用途	15
3.2. デザインプロセス	15
3.2.1 化学メーカーへのヒアリング	15
3.2.2 身近な廃棄物を選ぶ	16

3.2.3	廃棄物のリサーチと収集	17
3.2.4	廃棄物の加工	21
3.2.5	素材サンプルの制作	23
3.2.6	もろいプロトタイプ	34
3.2.7	配合比率のインフォグラフィック	34
第4章	検証	41
4.1.	素材サンプルの物性評価	41
4.1.1	物性評価の目的と概要	41
4.1.2	試験用ボードの作成	41
4.1.3	試験内容	46
4.1.4	試験結果	47
4.2.	素材サンプルの付加価値の評価	53
4.2.1	調査目的	53
4.2.2	ターゲット	53
4.2.3	調査概要	53
4.2.4	調査結果	65
第5章	結論	73
5.1.	まとめ	73
5.2.	考察と展望	79
	謝辞	81
	参考文献	82

目次

2.1	コンクリート製品に関するサーキュラーエコノミー戦略のヒエラルキー	7
2.2	(1) 材料の削減にかかわる戦略の具体例	7
3.1	コンセプト図	13
3.2	制作したサンプル	14
3.3	アイデア出しの過程	16
3.4	小型の粉碎機	22
3.5	タバコ1本の分解	22
3.6	タバコ素材の分解後	23
3.7	プレス機	23
3.8	フライアッシュサンプル	25
3.9	ガラスくずサンプル	26
3.10	陶器くずサンプル	26
3.11	木くずサンプル	27
3.12	繊維くずサンプル	27
3.13	ジーンズくずサンプル	28
3.14	卵殻サンプル	28
3.15	牡蠣殻サンプル	29
3.16	カニ殻サンプル	29
3.17	米の粃殻サンプル	30
3.18	ピーナッツ殻サンプル	30
3.19	レシートサンプル	31

3.20	海洋プラスチック片サンプル	31
3.21	髪の毛サンプル	32
3.22	漁網サンプル	32
3.23	使い捨てカイロサンプル	33
3.24	タバコの吸い殻サンプル	33
3.25	水の配合比率が高い木くずと廃棄物の配合比率が50%以上の卵殻 サンプル	34
3.26	割れた毛髪・卵殻サンプル	35
3.27	NEW ENERGY TOKYO の展示ブース	36
3.28	ジーンズくずを用いたコンクリート製の植木鉢	36
3.29	インフォグラフィックスの見方	37
3.30	インフォグラフィックスの見方	38
3.31	インフォグラフィックスの見方	39
3.32	インフォグラフィックスの見方	40
4.1	アイリッヒミキサー	42
4.2	プレス成形機	42
4.3	脱水成形の様子	43
4.4	プレス成形直後	43
4.5	乾燥養生棚	43
4.6	脱版工程後の様子	44
4.7	パレットに積替える様子	44
4.8	2次養生室内	45
4.9	シャルピー試験機	46
4.10	試験片の位置（赤丸部分）	47
4.11	寸法変化率の測定の様子	47
5.1	各サンプルごとのまとめ	75

表 目 次

3.1	廃棄物の分類	17
3.2	素材サンプル材料の配合比率（重量比）	24
3.3	卵殻混合サンプル材料の配合比率（重量比）	25
4.1	試験用ボードの材料配合比率	45
4.2	強度にかかわる 3 つの試験結果（普通セメントとの比較）	51
4.3	強度にかかわる 3 つの試験結果（高炉セメント B 種との比較）	52

第 1 章 序

論

1.1. はじめに

コンクリートは、セメント、水、及び骨材を混合した広く利用される建築材料であり、住宅、ビル、橋、道路などのインフラ構築に不可欠だ。歴史的には、ローマのパンテオンのような有名な建築物でも使用されたと言われており、その経済性、耐久性、技術的実用性、独特なデザイン性により人々から好まれてきた。近年は資源の枯渇と環境問題の関心の高まりにより、リサイクル素材を使用する事例が増えている。本論文は、化学メーカーや建材メーカーと協力し、リサイクル素材を活用した新しいコンクリートの可能性を探る。具体的には、産業廃棄物の高炉スラグと、そのほか身近な廃棄物を資源として活用し、経済的付加価値を生む可能性を探求している。素材会社や建材メーカーと一般消費者の間に立って研究を進めるうち、既存の研究で活用されてきた機能性の向上のみでなく、意匠的な側面や施工の容易さなど、評価項目は多様であることに気づいた。そこで本研究では、廃棄物をリサイクルするコンクリート素材の耐久性を測定する工学的側面からの評価に加え、廃棄物を使用する素材ならではの付加価値を一般消費者や建築家がどう捉えるか、という点について、いくつかの側面から統合的に評価する。

1.2. コンクリートの持続可能性と課題

セメント、水、骨材から成るコンクリートは、現代社会と切っても切り離せない素材である。2018年時点での世界のセメントの年間生産量は39.9億トンに達しており [1]、コンクリートの消費量は過去50年において、鉄鋼に比べて2倍、木

材や木材製品に比べては人口当たりでおよそ6倍と、他の素材と比べても急激な消費量の伸びを見せている [2]。しかし今日、コンクリートの原料となる砂が世界的に不足していることや、同じく原料であるセメント製造に大量のCO₂排出が伴うことが課題視されており、持続可能なコンクリートの開発が建設業界における重要なテーマになっている。

ビルや道路などの建設に欠かせない建設・産業用の砂不足は2000年代初期から始まっている。ヴァンズ・バイザーの『砂と人類 [3]』によると、2009年にサウジアラビア国内での砂不足を理由に湾岸諸国への建設用砂の販売を一時的に禁止されたほか、中国が2007年に砂の輸出を停止したり、一部の国や地域では砂の採取自体が制限されている。国内では、首都圏の主な採取地である千葉県君津市や富津市の砕石場での資源の枯渇を背景に、不足分を北海道などの遠隔地から仕入れている状況だとされている [4]。このように世界的に良質な砂を確保することが難しくなっているほか、過不足分を補うための輸送コストや輸送時の環境負荷も課題視されている。さらに、セメント製造時のCO₂排出も課題である。主成分である石灰石 (CaCO₃) を石灰化させる加熱過程と燃料の燃焼による排出量が特に大きい。IEAの報告によると、[5]「セメント生産の直接的な二酸化炭素強度は、2015年から2021年までの間に年間約1.5%増加した [6]」一方で「2050年までのネットゼロ排出シナリオに合致するためには、2030年までに年間3%の減少 [6]」が必要とされている。

1.3. 廃棄物の未活用

1.3.1 高炉スラグ

セメントにおける石灰石の使用やコンクリートにおける砂の比率を低減する代替廃棄物の1つが、高炉スラグである。高炉スラグは、製鉄で生じる副産物だ。インベントリ分析で製品の製造工程を廃棄に至るまでのCO₂排出量の原単位を示した論文 [7]によると、ポルトランドセメントは「757.9kg-CO₂/単位量」に対し、高炉セメントB種は「458.7kg-CO₂/単位量」と大幅に数値が減少するデータもあ

り、ポルトランドセメントの製造時の石灰石使用量を削減し、脱炭酸や焼成用エネルギーに起因するCO₂を削減できる資源として活用されている。

この資源は、供給も安定している。鉄鋼スラグ協会の「鉄鋼スラグ統計年報(2021年度版) [8]」によると、高炉スラグの生産量は21,815千トンと非常に安定した量が生産されており、前年度比で14.7%も増加している。この多くがセメントに活用されているが、セメント全体の生産量の変化を見ると、普通ポルトランドセメントは38,338千トンと前年比より2.6%増加しているのに対し、高炉セメントは10,380千トンと4.2%減少しており、全体の生産量に占める割合は前年度比で減少していることが分かる。また、国内での販売量は4割を下回り、輸送のコストをかけて6割を超える量が輸出されている現状もうかがえる。国内で生じる廃棄物を、十分に活用できていないと言えるだろう。

本研究では、国内で安定的に生成される産業廃棄物、高炉スラグの活用を推進するため、セメント系製品に普通ポルトランドセメントの代替として高炉セメントB種を採用する。日本工業規格 JIS R5211 [9] で規定される高炉セメントB種は、高炉スラグを30%~60%配合したセメントで、最も多く利用されている代表的な高炉セメントだ。一般的に、高炉セメントは普通セメントに比べて「塩化物遮蔽性や化学抵抗性が大きいため、塩害やアルカリ骨材反応等の化学的な耐久性に優れる [10]」ため、土木工事や海や港の近くで用いられる。初期強度が小さいことが課題とされるが、長期強度は普通セメントと同程度だ。そのため、早期に強度が必要とされる構造物には適さず、養生期間を長く確保できる用途に適している。

1.3.2 身近な廃棄物

私たちの日常生活で出る身近なゴミも、使い道がなくて処分されてしまうケースがある。環境省の調査によると、最終処分場の使える年数はわずか21.4年であり [11]、このまま廃棄物を埋め立てし続けることを避けるために、ゴミを有効に活用する方法を広げることが求められている。

たとえば、産業廃棄物のガラスや陶器の破片や木くずは、最終処分場に埋める量が合計7000千トン以上になっており [12]、リサイクル率の向上が期待される。

また、漁業関連の廃棄物や海洋に影響を与えるプラスチック片やタバコの吸い殻なども、適切に処理されずに環境問題を引き起こす原因となっている。また、工場やレストランから出る食糧廃棄物など肥料や飼料として再利用できる廃棄物も、その処理コストから経済的な利益が少ない場合がある。そのため、廃棄物を高い価値を持つ「資源」として捉え、リサイクル率を向上させることが重要である。

1.4. 本研究の目的

本研究は、様々な廃棄物を「資源」としてリサイクルし、持続可能なコンクリート素材の可能性と付加価値を探求することを目的とする。研究の問いは、以下の3点だ。

- コンクリート素材の開発において、いかに様々な廃棄物を「資源」として活用できるのか？
- 開発した素材は、従来のコンクリートと比較してどのような強度特性を持つか？
- 開発した素材は、強度や耐久性などの物理的特性の他にどのような価値を持つか？

これらの研究の問いにこたえるため、高炉スラグと廃棄物を用い、石灰石や砂の配合比率を減らす素材をいくつかデザインする。それらの検証として、素材の建材としての強度を検証する物性試験と、意匠性やそのほかの付加価値について建築家にたずねるインタビュー調査を行う。一定以上の養生期間が必要な高炉セメントの特徴を鑑み、構造体に用いるコンクリート素材ではなく、セメントボード等の建材製品の開発を想定している。

1.5. 本研究の構成

本論文は全5章で構成される。第2章では、廃棄物をリサイクルするコンクリート素材に関連する先行研究や製品について述べる。第3章では、デザインコンセ

プトを詳しく説明し、17種類の廃棄物を用いた試作品の制作過程について述べる。第4章では、素材の評価を行い、試作品の実用可能性を検証する。耐衝撃性、曲げ強度、寸法安定性の物性試験に加え、建築家への付加価値のインタビュー評価を行う。第5章では、今後の展望について述べる。

第 2 章

関 連 研 究

2.1. サークュラーデザインとコンクリート

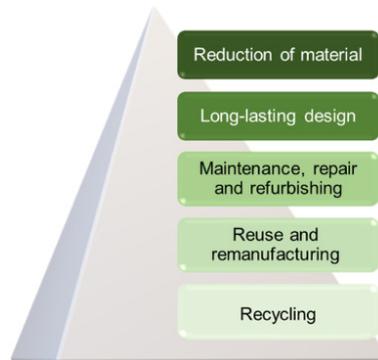
2.1.1 サークュラーエコノミーの原則と戦略の実践

廃棄物をリサイクルするコンクリート素材に関連する概念の1つが、サーキュラーデザインである。「サーキュラーデザイン『持続可能な社会をつくる製品・サービス・ビジネス』[13]」によると、サーキュラーデザインは「サーキュラーエコノミーを実現するためのデザインであり、地球環境を維持しつつ経済活動を発展させ、社会をより豊かにしていく」ための概念である。ここで説明されるサーキュラーエコノミーは「持続可能な社会の実現に向けて2015年にEUで採択、提唱された経済活動に関する概念」であり、「経済活動のあらゆる段階（設計、製造、消費、使用、廃棄、再資源化など）で循環系を構築し、全体としてモノやエネルギーの消費を低減すると同時に新たな経済的価値を成立させること」を基本とする。大きな市場を築き、環境負荷が課題とされるコンクリートにとっても、サーキュラーエコノミーの原則を理解し、それを実践するデザインの必要があるだろう。

サーキュラーエコノミーの原則をコンクリート製品や産業に適用するための現状と課題をまとめた論文 [14] では、サーキュラーエコノミーの原則に関するフレームワークを採用し、それを戦略として実行するための5つの要素を挙げている2.1。以下に、それぞれの要素に含まれる具体例について、簡潔にまとめて示す。

- (1) 材料の削減 (Reduction of material)
- (2) 長寿命化 (Long-lating design)

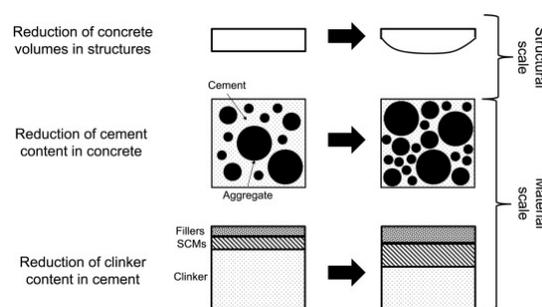
- (3) メンテナンス・修理・改装 (Maintenance, repair and refurbishing)
- (4) 再利用と再製造 (Reuse and remanufacturing)
- (5) リサイクリング (Recycling)



Alastair らの論文 [14] より引用

図 2.1 コンクリート製品に関するサーキュラーエコノミー戦略のヒエラルキー

(1) 材料の削減は、使用する材料自体を減らす戦略で、おそらく最も広く実施されてきたものである。コンクリートを使用する構造物において無駄な部分を省くことや、コンクリートのセメント量を削減すること、セメントにおけるクリンカの量を削減することが挙げられる。



Alastair らの論文 [14] より引用

図 2.2 (1) 材料の削減にかかわる戦略の具体例

(2) 長寿命化は、部品や製品の技術的寿命を延ばすことによって、資源の利用の流れを遅らせるための設計段階の戦略である。コンクリート製品においては、特定の使用環境に対して適切な耐久性があることを調べたり、劣化のメカニズムを理解して効果的に保護する必要があるとされる。

(3) メンテナンス・修理・改装は、製品や部品の技術的寿命を延ばすことによって、資源の流れを遅らせるための戦略である。コンクリート製品においては、構造物の維持管理や、特定の環境下での保護コーティング、一部部品の損傷の修復や新しい部品の全面的な交換や大規模な修繕などが挙げられる。

(4) 再利用と再製造は、使用が終了した製品からまだ機能的なコンポーネントを新製品に利用することによって資源の流れを遅らせる戦略である。コンクリート製品と産業においては、解体したコンクリート構造物の一部を新しい建築物に再利用することが挙げられる。

(5) リサイクルは、資源の流れを使い捨ての直線からループ状に閉じるための戦略である。材料を再処理して別の製品に使用することで廃棄物の発生と新たな原料を採掘することを避ける。リサイクルはコンクリートにおいて最も広く適用されている2番目のサーキュラーエコノミー戦略と言われている。具体的には、解体されたコンクリート構造物をリサイクルコンクリートの骨材として利用する事例 [15] が元のコンクリートよりも価値や機能が下がる「ダウンサイクリング」と述べられていたり、セメント窯塵 [16]、天然の粗骨材生産から生成される微粉末 [17] を活用したりする例が挙げられる。

2.1.2 廃棄物の活用

2.1.1で述べた(5)リサイクルは、構造物などに使用されていたコンクリートを砕き、別用途でリサイクル骨材として活用する事例 [15] など、コンクリート製造時のライフサイクル内で生じる廃棄物を、新たなコンクリートの製造に用いることを指していた。一方で、コンクリート以外の産業から排出される廃棄物をコンクリートに活用する研究も進んでいる。これは、2.1.1に挙げた(1)材料の削減のうち、セメントにおけるクリンカの量を削減することと関連する事例である。一例として挙げられるのは、繊維強化ポリマー [18] 混合プラスチック廃棄物 [19] や

ゴム [20] などで、製品が寿命を迎えた後、より高い価値の応用が見つからない場合に、素材の最終的な応用系として提案されている。その他、セメントの一部を廃棄物に置き換えて石灰石使用への依存を減らす既存研究には、牡蠣の殻 [21]、アサリの殻 [22]、貝殻 [23]、卵殻 [24] などが挙げられる。さらに、フライアッシュ [25]、スラグ [26]、パームオイル燃料灰 [27]、米ヌカ灰 [28]、廃セラミックパウダー [29] などの産業副産物も、補助的なセメント資材として使用されている。そのほか、瓦礫のリサイクルに木くずを用いる技術 [30] も存在する。これらの研究は主に材料科学や素材工学的な視点から評価がされており、ポルトランドセメントを用いたコンクリートと比較して優れた物理的特性を示すことが多い。

2.1.3 ニーズとウォンツ

しかし、リサイクル素材を用いた結果として物理的特性が優れるコンクリート素材であれば、必ずしもその素材の需要が増えるとは限らない。人間のニーズとウォンツは常に複雑で、ひとつの建物や構造物を建てるためには、技術的・経済的な目に見えるハードな側面だけでなく、文化的・社会的なソフトの側面も含まれることも指摘されている [14]。既存研究では、中国の企業メーカーが一般大衆がリサイクル材料や再利用材料を使用した建物を利用する意欲に疑問を呈した事例 [31] もある。文化や社会的な枠組みは、地域性によっても差があると考えられており、建造物に関わる建築主や施工主などの「クライアントのサーキュラーエコノミーのイノベーションに対する認識 [14]」は、サーキュラーエコノミーの実現をするために理解すべき側面だと述べている。

2.2. 身近な廃棄物をリサイクルする建材

廃棄物をリサイクルする建材は既に市場にいくつか存在する。いずれも建築主や施工主のニーズやウォンツを捉えた先行事例として、本章では3つの製品を挙げる。いずれもコーヒーかすや繊維くず、食品廃棄などの身近な廃棄物を使用しており、廃棄物による素材の色味やテクスチャーの違いがひと目で分かる意匠性

が共通の特徴である。その他、配合比率や加工しやすさ、香りなど、様々な要素が特徴として挙げられている。

1. Kemyu のコーヒーを用いた内装ボード 「SOLIDO typeF coffee [32]」

「SOLIDO typeF coffee」はコーヒーかすと火力発電で発生するごみをリサイクルする内装用のセメントボードである。コーヒーを廃棄物として捉えるのではなく素材として捉え、他のコンクリート素材の違いを強調している。以下に、商品説明のコンセプト文を引用し、読み取れる特徴6点をまとめる。

- 素材の色味：「素材本来の風合い」を活かした「セメント素材独特の白華と使用済みコーヒー豆の色合い」
- 高いリサイクル材料の配合比率：「火力発電所で発生する石炭灰の他、コーヒーショップで使用済みのコーヒー豆など多岐にわたる廃棄物を利用し、原料に占める再生材料比率約60%」を占める。

2. 廃棄繊維を用いたリサイクルボード 「PANECO [33]」

「PANECO」は、衣服の廃棄を利用した内装やプロダクトに使用できるマテリアルボードである。「布だけではなく合成皮革など廃棄衣料品に含まれるさまざまな繊維」を使用しており、8%の接着剤と0.5%のワックスも配合されている。以下に、商品説明を引用し、読み取れる特徴6点をまとめる。

- 色味：衣類繊維の加工時の粒度を「3トーンの色味(色の濃さ)」と「2種類の繊維粒サイズをラインナップとして展開」している。
- 高いリサイクル材料の含有率：最大90%の「繊維含有率」としている。
- 硬度：「硬度を確保しながら独特の素材感」があり、ビス打ちや曲げ加工もできる。
- 加工のたやすさ：「木質ボードのように優れた加工性」を持つファイバーボードとして特許を登録している。
- 再リサイクル：「使用後のボードを回収して、新しいボードに再生可能」できる。

- 見た目と素材の触感のギャップ：「天然石に近い見目をしているが、繊維特有の温かみを持つ不思議な素材感」がある。

3. 食品ロスを用いた食べられるコンクリート「fabula [34]」

「fabula」は、規格外の野菜や端材などの食品廃棄物を加工した素材だ。コーヒーかすや茶殻、みかんの皮からコンビニ弁当まで幅広い廃棄物を扱っている。ヴェネチアビエンナーレ国際建築展 2023 にてパスタやコーヒーかすを活用したオブジェのジョイントや床材が展示された。以下に、商品説明を引用し、読み取れる特徴6点をまとめる。

- 高い曲げ強度：白菜の廃棄物で作る素材が「コンクリートの曲げ強度の約4倍」をほこるため引っ張りに強く、将来的には建材などへの使用も期待ができる。
- 熱圧縮技術：「食品廃棄物を乾燥させ、粉末状にし、その粉末を金型に入れて熱圧縮」するシンプルな技術で、乾燥加工した素材に幅広く対応できる。
- ランダムなデザイン：「100%天然素材なので1つとして同じものはなく、1点ずつ異なる風合い」がある。
- 色味：「完全植物由来の新素材のため、原料の野菜や果物の色」を残す。
- 香り：原材料となる食品廃棄物によって、材料由来の様々な「香り」を楽しめる。
- 可食コンクリートのストーリー：「将来的には『食べる』ことも視野に入れて研究を進めており、例えば調味料を混ぜ合わせて味付けを楽しむこともできるかもしれない」としている。

2.3. 本研究の位置付け

サーキュラーエコノミーの基本である「経済活動のあらゆる段階（設計、製造、消費、使用、廃棄、再資源化など）で循環系を構築し、全体としてモノやエネルギー

ギーの消費を低減すると同時に新たな経済的価値を成立させること」が社会全体に求められる大きな達成目標である。本研究は、廃棄処分されてしまう廃棄物の循環系をつくり、コンクリート骨材として活用することで、コンクリート素材の経済的価値が生まれる可能性を評価する。2.1.1 で示した (1) 材料の削減のため、高炉スラグやその他の廃棄物を活用し、コンクリートにおけるセメント・クリンカ、ひいては砂の比率を低減することを条件に、廃棄物をリサイクルするコンクリート建材をデザインする。

既存の研究が主に物理的性質として主に素材の化学組成や耐久性の向上に焦点を当てて一方、本研究はその他の特性がにとって付加価値になる可能性にも着目する。特に、2.2 で示したような廃棄物ならではの風合いや表情などの意匠性が、建築主や施工主などの「クライアント」の認識や価値判断にとって重要であるという仮説を立てた。デザインした素材サンプルの耐久性に関するデータのほか、意匠性や、施工や素材調達容易さなどの持続可能性に関わる要素もふまえ、どのような要素が付加価値として認識されるかを統合的に評価する。

第 3 章 デザイン

3.1. コンセプト

3.1.1 身近な廃棄物を用いるコンクリート素材

本章では、廃棄物を資源としてリサイクルするコンクリート素材を制作について述べる。

具体的には、デザインのコンセプトと、17種類の廃棄物を用いたコンクリート素材のプロトタイプ制作の過程を、図表を用いて説明する。本研究の身近な廃棄物を用いるコンクリート素材は、以下の2点が特徴である。

- セメントや砂の代替として廃棄物を用いて、石灰石や砂の比率を低減する。
- 日本工業規格 JIS R5211 に定められる高炉セメント B種を用いることで、一般的に普及しているポルトランドセメントと比較して、ライフサイクル内の CO₂ 排出量を低減する。

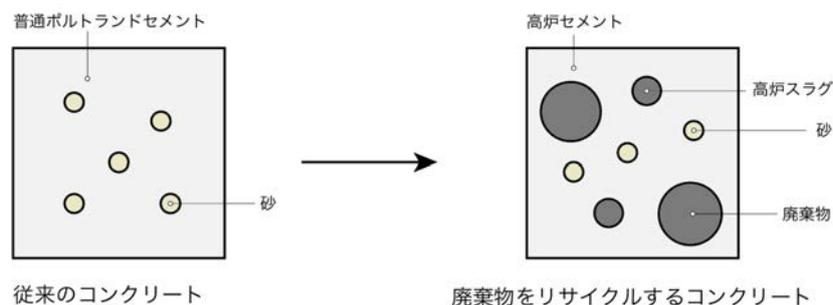


図 3.1 コンセプト図

それぞれの素材を持続可能な製品として訴求するために、以下の条件を考慮する。

- 長寿命化 (long-lasting design) : 適切な耐久性の検証など、長く使える製品デザインで廃棄に至るまでの時間を遅らせる。
- メンテナンス・修理・改装 (Maintenance, repair and refurbishing) : 腐食を防ぐ塗装がある、部品の交換しやすい。
- 素材の供給安定性 : 廃棄素材の発生量があり、供給が安定している。
- 愛着と親しみやすさ : 長く使い続けたいと思える意匠性がある。

3.2 に、制作した素材の一覧を示す。

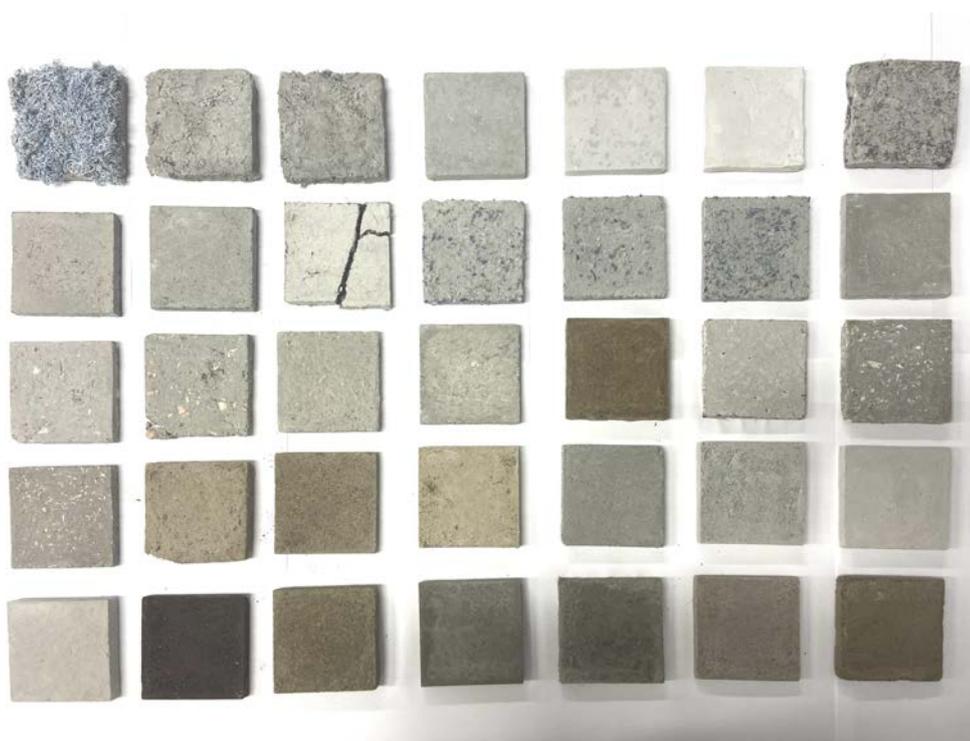


図 3.2 制作したサンプル

3.1.2 想定用途

本研究のコンクリート素材は、セメントボードとして壁材や天板、屋根の瓦などに使用されることを想定する。高炉セメントは初期強度が小さく、中和性速度が速いため、建物の柱や梁、や床板、建築躯体などの早期に強度を必要とする構造物には適さないため、長い養生期間を確保できる製品に適している。

3.2. デザインプロセス

3.2.1 化学メーカーへのヒアリング

素材の制作にあたって、日本大手の化学メーカーである株式会社クラレの担当者にオンラインのヒアリングを行った。企業の抱える課題と持っている知識を把握することが目的である。ヒアリング内容のサマリーを以下に述べる。

セメント産業はGHG（グリーンハウスガス）の排出量が多く、世界的にも課題となっている。この課題を解決できる可能性を持つのが、まだ十分に活用されていない高炉スラグだ。これはセメント代替としてよく使用される廃棄物である。現在、日本の炭素税はEUと比較して低いため、炭素排出量が多いが、価格が安い海外製のセメントが流通している。これが、年間10,380千トンもの大量の高炉スラグセメントがありながら、国内での活用が進んでいない状況を生んでいる。建材としての高炉セメントの使用を促進し、普通ポルトランドセメントの使用に置き換えることができれば、産業単位のCO₂排出量を低減することができる。市場を創出するためには、消費者に、高炉セメントを用いた建材に付加価値を感じてもらふ必要がある。そこで、例えばkemyu社の「SOLIDO」のコーヒーかすを使用した内装ボードのように、身近な廃棄物を利用することで素材の外観を変え、消費者に訴求する戦略を模索している。慶應義塾大学SAMCARAには、身近な廃棄物を用いた実験をし、意匠性の高い素材を複数プロトタイプすることや、廃棄素材の適切な配合比率を実験すること、建築家や一般消費者にとってどのような素材が求められるかを探ることを求めている。

3.2.2 身近な廃棄物を選ぶ

3.2.1でヒアリングした内容をもとに、高炉セメントB種を選んだ。普通ポルトランドセメントはセメントに占める高炉スラグの分量が5%なのに対し、本研究で使用する高炉セメントB種は高炉スラグの分量が30%から60%を占める [35]。そこに加えて混ぜる身近な廃棄物を思いつくままに挙げて分類することでリスト化した。そのうち廃棄物の供給量を調べて選択肢を絞り、国内で調達可能かつ碎機で加工しやすいものを17種類選択した。

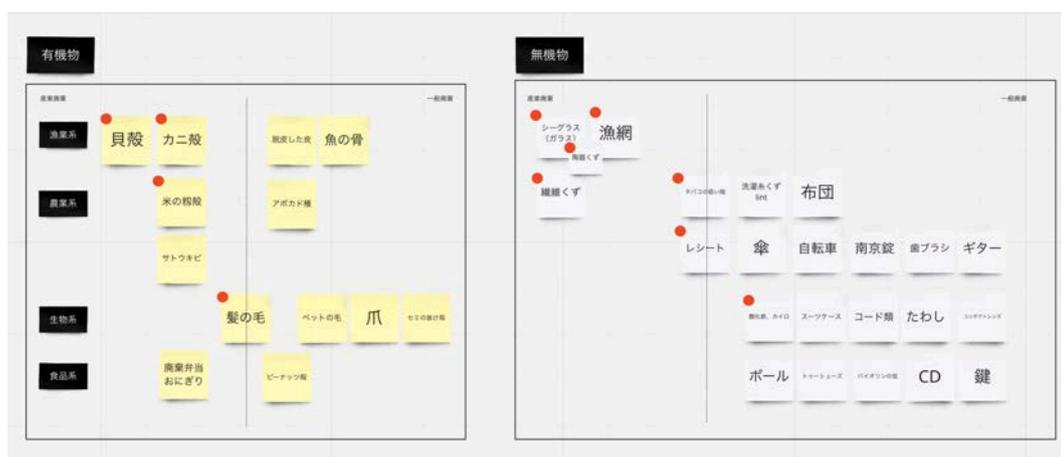


図 3.3 アイデア出しの過程

選択した廃棄物の内訳としては、東京都環境局の廃棄物分類 [36] において「産業廃棄物：事業活動で発生したもののうち、法令で定める 20 種類」から 6 種類、「事業系一般廃棄物：事業活動で発生した、産業廃棄物以外のもの」から 7 種類、「家庭廃棄物：一般家庭の日常生活から発生したもの」から 3 種類となる。ただし、同じタバコの吸い殻でも、オフィス等で廃棄されるものは「事業系一般廃棄物」に、家庭で廃棄されるものは「家庭廃棄物」と、明確な区別は難しい。本研究では、都内の喫煙所から収集したタバコの吸い殻は「事業系一般廃棄物」に、廃プラスチックのうち家庭のゴミが海に流れ着いた海洋プラスチックは「家庭廃棄物」に分類することとした。各廃棄物の分類は [図 3.1] に示す。

表 3.1 廃棄物の分類

産業廃棄物	事業系一般廃棄物	家庭廃棄物
ガラスくず	毛髪	海洋プラスチック片
陶器くず	卵殻	使い捨てカイロ
木くず	牡蠣殻	レシート
繊維くず	カニ殻	タバコの吸い殻
ジーンズくず	米の籾殻	
漁網	ピーナッツ殻	
フライアッシュ		

3.2.3 廃棄物のリサーチと収集

廃棄物を選んだ後に、収集する工程に移る。プロトタイプ用の廃棄物は2022年11月～12月の約1ヶ月の間に様々な場所に足を運んで収集した。各廃棄物ごとに、特徴や廃棄課題を述べ、収集した場所を以下に詳細に記載する。

(1) フライアッシュ

石炭を燃料とする火力発電所で燃焼時に発生する灰を指す。よって、産業廃棄物であるが、コンクリートの骨材として耐久性や、工性、流動性を向上させる性能があり [37] 骨材として一般的に利用されている。

(2) ガラスくず・陶器くず

「産業廃棄物の排出及び処理状況（令和3年度速報値）[12]」によると、ガラスくず、コンクリートくず及び陶磁器くずの排出割合は2.0%。わずかに感じるが、排出量は7562千トンにも及ぶ。うち、最終処分の割合は16%と、産業廃棄物の中で第4位であることから、リサイクル率向上の余地が残されている廃棄物といえる。ガラスくずは、ガラスを主原料とした産業廃棄物の中で、建物の解体時のガラス破片や、ガラス製造業における不良品や割れたガラス製品、蛍光灯のガラスなどが一例だ。陶器くずには、土器や陶器、磁器などが含まれる。本研究では、ガラスくず、陶器くずどちらも、廃棄物として適切に処理されず、神奈川県のコスモスに流れ着いたものを使用する。

(3) 木くず

木くずの排出割合は2.0%、排出量は7491千トンに及ぶ [12]。再生利用量が85%、減量化量が12%、最終処分量が3%とリサイクル量も多い。建設業関係の建物の廃木材、製品製造業関係の会社で生じるおがくず、梱包材くず、廃チップなどが一例である。本研究では、おがくずを使用する。

(4) 繊維くず

繊維くずの排出量は84000トンに及ぶ [12]。発生量は他の産業廃棄物と比べて少ないが、再生利用率は54%、減量化率は33%、最終処分率は12.8%と、排気量全体に占めるリサイクル率の向上の余地が残されている。なお、ナイロンやアクリル繊維などの合成繊維である場合は、業種に関わらず産業廃棄物の廃プラスチック類として廃棄できる。本研究では、愛知県の伝統工芸有松絞りをつくる際の産業廃棄物を使用した。

(5) ジーンズくず

繊維くずに含まれるが、糸の太さの特性上、上記の繊維くずと分けて表記する。日本における洋服を製造する際に工場から排出される端材の量は、実に年間約45,000トンとも言われている [38]。本研究では、一般社団法人GOMITAJIの大手デニム工場から排出される端材を使用した。

(6) 毛髪

事業系一般廃棄物に分類される毛髪は、美容院等で大量に処分される場合、家庭ゴミのステーションに捨てられず、処理にコストがかかることがある。窒素を大量に含むことから、中国、インドやアメリカでは肥料としても利用されてきた [39]。その他の活用法として、インド洋のモーリシャス沖で日本の貨物船から大量の重油が流出した事故で油の吸収剤として活用された事例もある [40]。本研究では、都内の美容室で廃棄予定であったカラー剤やパーマ剤を用いた髪の毛を使用した。

(7) 卵殻

家庭や工場から出る卵殻は年間26万トンにも上り、大半はゴミとして捨てられている [41]。日本有数の卵関連製品のメーカーであるキューピーは、カルシウムを多く含む卵殻を、カルシウム強化食品や土壌改良剤、肥料として

活用している [42]。本研究では、工場から廃棄される卵殻を細かく砕いたものを使用した。

(8) 牡蠣殻

カキ殻は漁業系廃棄物である。全国におけるカキの生産量は平成 10 年度で約 20 万トンであり、このうち約 8 割がカキ殻として発生するため、カキ殻の推定発生量は約 16 万トンである [43]。環境省が定めるガイドライン [44] では、養殖過程の牡蠣殻は廃棄物処理法に基づき処分することが求められており、各産地では廃棄方法が課題となっている。主成分が炭酸カルシウムであるため、セメントとの相性がよく採用した。本研究では、都内にあるオイスターバーで廃棄予定であった牡蠣から煮沸乾燥させて使用した。そのため産業廃棄物ではなく、一般事業系廃棄物の分類としている。

(9) カニ殻

漁業系廃棄物の一種で、水産加工製品の製造過程で生じる残さの取り扱いが大きな問題となっている。本研究では事業に関連する廃棄物を手に入れることができなかつたため、一般家庭にて廃棄予定であったカニの殻を使用した。

(10) 米の粃殻

粃殻は国内で年間約 200 万トン、世界中では年間約 1 億トン以上も排出されており [45]、世界中で安定的かつ大量に発生する [46]。焼却時に発生する煙や悪臭のため焼却処分が禁止されている地域も多い。国内においては粃殻の大半が堆肥原料、家畜の敷料、土壌改良材などに利用されている [47] [48]。しかしながら家畜の減少などに伴い粃殻の用途も減少し [49]、2014 年時点では粃殻の約 2 割が廃棄され、約 3 分の 1 が有効利用されていないと推計されている [47]。本研究では、農家で廃棄予定であった米のもみ殻を使用した。

(11) ピーナッツ殻

落花生は身近で一般的な食べ物であるが、加工時に多量に排出される殻のほとんどは産業廃棄物として処理されている。本研究では、一般家庭にて廃棄予定であったピーナッツの殻を使用した。

(12) レシート

レシートには通常、感熱紙という特殊な紙が使用されている。そのため紫外線や熱に弱い特徴があり、表面の特殊なインクが熱反応するため「リサイクルに不向きな禁忌品」とされている [50]。本研究では、都内のコンビニエンスストアやレストランにて集められる廃棄予定のレシートを使用した。

(13) 海洋プラスチック片

不適正な管理によって海洋に流出する海洋プラスチックごみが世界的な課題になっている。環境省の資料 [51] によると、海洋プラスチックごみの量は極めて膨大で、世界全体で毎年約 800 万トンのプラスチックごみが海洋に流出しているとの報告がある。その結果、死んだ海鳥の胃の中から誤って食べたプラスチックが多く見つかったり、魚の胃の中から細かいプラスチックが発見されるなど、生態系への影響が議論されている。2050 年には海洋中のプラスチックごみの重量が魚の重量を超えるとの試算もあり、海洋プラスチックごみ汚染や生物多様性の損失を防ぐことが喫緊の課題である。本研究では、廃棄物として適切に処理されず、神奈川県のコスモス海岸に流れ着いたプラスチック片を使用した。

(14) 漁網

環境省の「漁業系廃棄物のガイドライン [44]」によると、漁網は廃プラスチック類に分類される。本研究で用いたのは、クラレ社のビニロン繊維が配合された廃棄漁網である。本研究で使用した漁網には、予め廃棄物にビニロン繊維が含まれている。コンクリートの曲げ強度の補強をできる可能性があり、採用した。

(15) 使い捨てカイロ

使い捨てカイロは、寒い冬に大量に消費される生活用品である。カイロの原料は、鉄粉、活性炭、バーミキュライト、水、塩で、外袋から取り出した際に中に含まれる鉄粉が酸化反応を起こす。酸化鉄は、セメントの原料にも使用されることがあり、焼成過程で原料同士の化学的結合を促進する溶融材としても用いられることから採用した。主な本研究では、一般家庭で廃棄予定

であった使用済みカイロの中身を使用している。

(16) タバコの吸い殻

たばこのフィルターは、アセチルセルロースという半合成ポリマーでできており [52]、自然界で生物に分解されることはほとんどない。そのため、たばこのポイ捨てによって長い間環境中に残り続けてしまうことが、課題視されている。WHO の発表によると [53]、2012 年には 6 兆 2500 億本のタバコが消費され、フィルターの重さに換算すると、75 万トン以上になる [54]。本研究では、都内の喫煙所 4ヶ所と街中にポイ捨てされていたタバコの吸い殻を使用した。

3.2.4 廃棄物の加工

集めた廃棄物はセメントと混ぜ合わせられる形に加工する。ガラスくず・陶器くず、牡蠣殻、カニ殻、米のもみ殻、ピーナッツ殻、海洋プラスチック片、漁網、使い捨てカイロは小型の粉砕機 [図 3.4] を用いて粉砕した。うち、ガラスくず・陶器くずは非常に硬い物質のため、刃が欠けることがあった。卵殻とジーンズは、アップサイクル事業関連会社の持つ粉砕技術を用いて細かく粉砕したものを利用している。また、タバコはフィルターと葉と巻き紙を手作業で分解したのち [図 3.5][図 3.6]、フィルターを粉砕機にかけた。例外的に、レシートはシュレッダーに、細かい繊維である髪の毛はハサミでカットしている。



図 3.4 小型の粉碎機



図 3.5 タバコ1本の分解



図 3.6 タバコ素材の分解後

3.2.5 素材サンプルの制作

制作した素材のサンプルは、大きさはそれぞれ7.5cm×7.5cmである。全てプレス成形法を用いており、[図3.7]の写真に示した機材を用いた。工程は非常にシンプルで、材料を混ぜて金型に流し、加圧して水分を抜き、24時間以上自然養生する簡易的な方法である。セメント・水・砂・廃棄物の配合比率は、各素材につき1～3パターンを試している。配合比率は、以下[表3.2][表3.3]の表に示す。



図 3.7 プレス機

表 3.2 素材サンプル材料の配合比率（重量比）

	高炉セメント	水	砂	廃棄物	ビニロン繊維
フライアッシュ	59.6	37.5	47.2	9.29	1.37
ガラスくず	59.6	37.5	47.2	56.97	1.37
ガラスくず	78.5	37.5		84.0	
陶器くず	59.6	37.5	47.2	56.49	1.37
木くず	59.6	37.5	77.5	9.29	1.37
木くず	59.6	47.5	47.5	6.01	
繊維くず	59.6	37.5	51.6	6.3	1.37
繊維くず	59.6	37.5	51.6	2.5	1.37
繊維くず	59.6	37.5	51.6	2.5	
ジーンズくず	59.6	57.5	47.2	9.29	3.63
ジーンズくず	59.6	47.5	47.2	9.29	1.80
ジーンズくず	59.6	47.5	47.2	9.29	3.30
卵殻	59.6	57.5		56.5	
卵殻	59.6	57.5		84.0	
牡蠣殻（細）	59.6	37.5	47.2	9.29	1.37
牡蠣殻（粗）	59.6	37.5	47.2	9.29	1.37
カニ殻	59.6	37.5	47.2	9.29	1.37
米の粃殻	59.6	47.5	47.2	15.0	
ピーナッツ殻	59.6	47.5	47.2	16.0	
レシート	59.6	37.5	47.2	3.1	1.37
レシート	59.6	37.5	47.2	4.47	
海洋プラスチック片	59.6	37.5	47.2	9.29	1.37
漁網	42.78	51.1		2.0	1.37
漁網	56.9	37.5	47.2	1.8	1.37
髪の毛	59.6	47.5	47.2	9.29	1.37
髪の毛	59.6	37.5	47.2	5.37	
髪の毛	59.6	37.5	47.2	5.37	
カイロ	56.9	37.5	47.2	9.29	1.37
カイロ	48.5	57.5		84.0	
カイロ	28.5	47.5		84.0	
タバコのフィルター	59.6	37.5	47.2	2.0	1.37
タバコのフィルター	59.6	37.5	47.2	3.37	
タバコの葉	59.6	42.5	47.2	9.29	1.37

表 3.3 卵殻混合サンプル材料の配合比率（重量比）

	高炉セメント	水	砂	ビニロン繊維	廃棄物
卵殻・ガラス	42.75	77.5	47.2	37.16	1.37
卵殻・木くず	42.75	61.1	47.2	63.7	1.37
卵殻・ジーンズくず	42.75	61.1	47.2	63.7	1.37
卵殻・海洋プラスチック片	42.75	51.1	47.2	70.99	1.37
卵殻・髪の毛	28.5	51.1		65.07	

廃棄物を用いた素材サンプルは、素材との対応が分かるように記録した。以下に、プロトタイプの写真を示す。

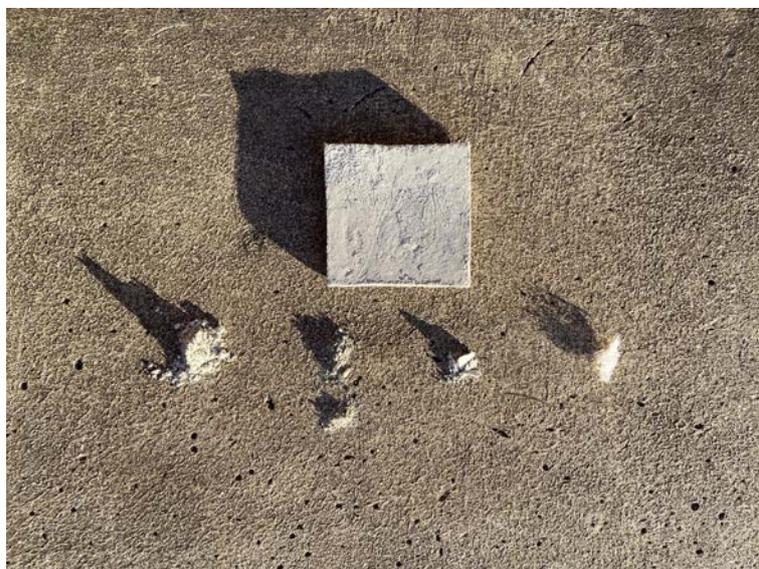


図 3.8 フライアッシュサンプル



図 3.9 ガラスくずサンプル



図 3.10 陶器くずサンプル



図 3.11 木くずサンプル



図 3.12 繊維くずサンプル



図 3.13 ジーンズくずサンプル



図 3.14 卵殻サンプル

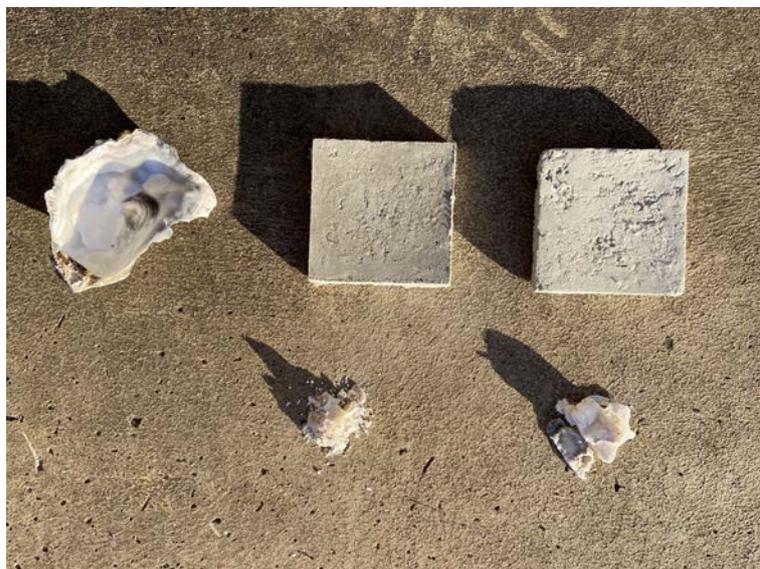


図 3.15 牡蠣殻サンプル



図 3.16 カニ殻サンプル



図 3.17 米の籾殻サンプル



図 3.18 ピーナッツ殻サンプル



図 3.19 レシートサンプル



図 3.20 海洋プラスチック片サンプル



図 3.21 髪の毛サンプル



図 3.22 漁網サンプル



図 3.23 使い捨てカイロサンプル



図 3.24 タバコの吸い殻サンプル

3.2.6 もろいプロトタイプ

素材サンプルのうち、いくつかは移動中や地面に落とした際に割れてしまうことがあった。以下の写真の木くずは非常に軽い素材で、コンクリートに占める木くずの割合が重量比で13%、水の割合が74%と高かったため、もろい素材になったと考えられる。また卵殻は、非常に粒子が細かく、コンクリートに占める卵殻の割合が重量比で約50%の素材は割れてしまった。毛髪はアルカリ性のセメントとの相性が悪い可能性や繊維の細さが原因だと考えられる。



図 3.25 水の配合比率が高い木くずと廃棄物の配合比率が50%以上の卵殻サンプル

3.2.7 配合比率のインフォグラフィック

これらの素材サンプルは、2月25日～28日までNEW ENERGY TOKYO 2023¹にて4日間展示された。制作したプロトタイプ素材のほか、ジーンズくずを用い

1 NEW ENERGY TOKYO <https://new-energy.ooo>



図 3.26 割れた毛髪・卵殻サンプル

たコンクリート製の植木鉢を展示用に制作し、素材が立体的に活用された際のイメージを伝えた。建築家や施工会社など建材の専門家のみでなく、一般消費者をターゲットに内容を伝える機会に素材サンプルの魅力を伝えるコミュニケーションの一部として、素材の配合比率を伝えるインフォグラフィックスをデザインした。以下に示すように、素材の識別番号と廃棄物の名称、配合した材料とその配合比率を全プロトタイプ用に表したものである。



図 3.27 NEW ENERGY TOKYO の展示ブース



図 3.28 ジーンズくずを用いたコンクリート製の植木鉢

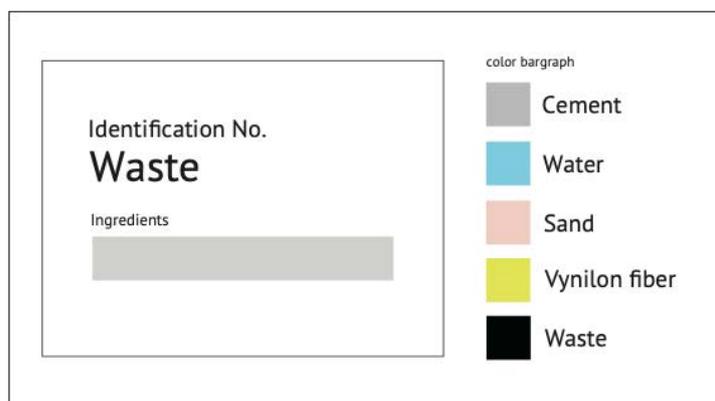


図 3.29 インフォグラフィックスの見方



図 3.30 インフォグラフィックスの見方



図 3.31 インフォグラフィックスの見方

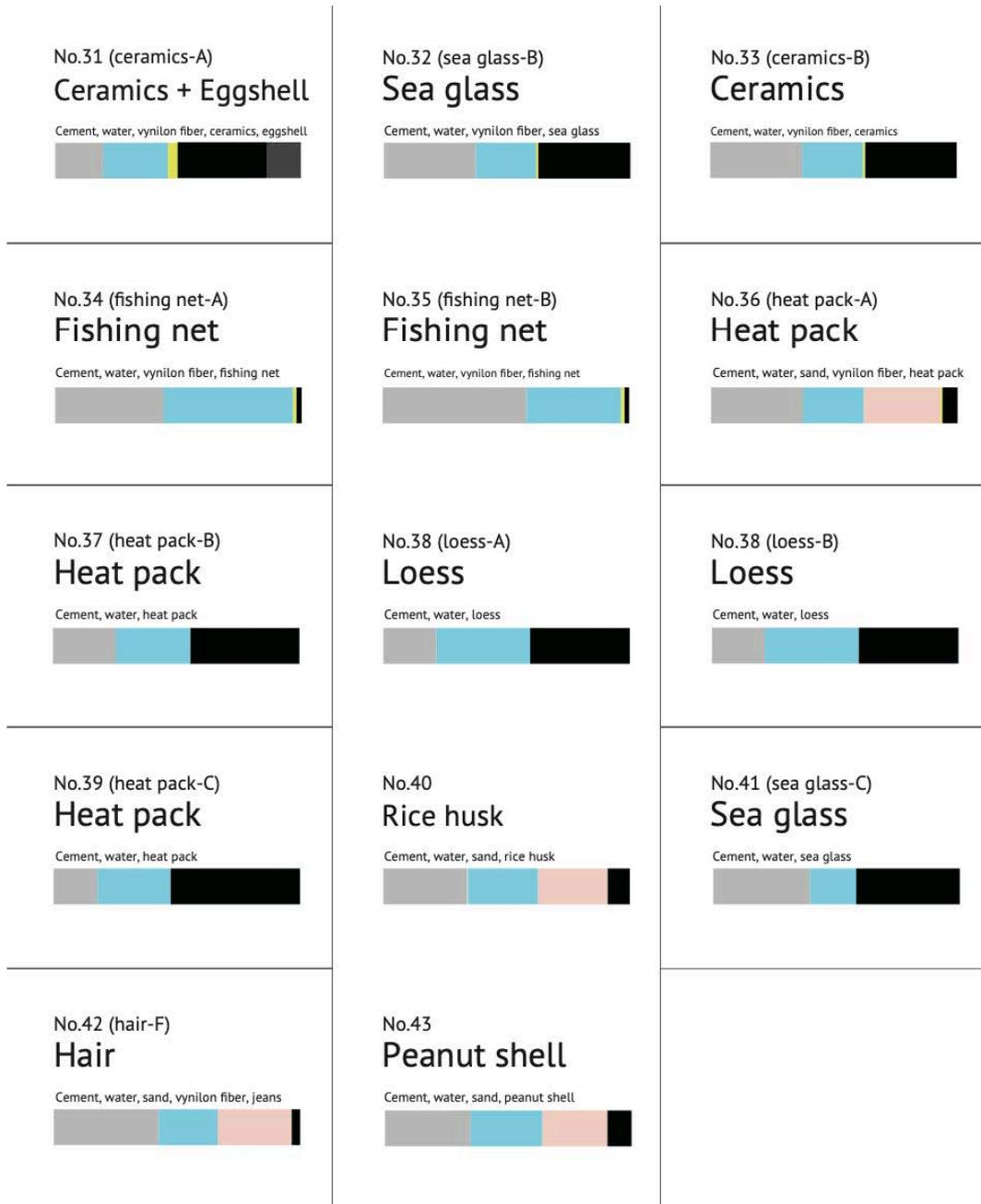


図 3.32 インフォグラフィックスの見方

第 4 章

検 証

4.1. 素材サンプルの物性評価

4.1.1 物性評価の目的と概要

建材の耐久性は、人の命や建物の持続可能性に関わる重要な要素である。本章では、開発した素材が、従来のコンクリートと比較してどのような強度特性を持つかを明らかにするため、2023年2月22日から2023年4月7日にかけて、試験用ボードの作成と物性試験を行った。JIS A1408 [55] に準じて「曲げ強度及び衝撃試験」を、JIS A5430:2018 [56] に準じて「吸水による長さ変化率」を測定した。なお、試験片サンプル作成の時間的な制約があり、前章で実験した19種類の廃棄物のうち、卵殻粉碎品、陶器粉碎品、ガラス粉碎品、牡蠣粉碎品、カイロ酸化鉄の5種類に絞り実験を行っている。普通ポルトランドセメントを用いた試験片と高炉スラグB種を用いた試験片の値を基準値として、5種類の廃棄物を用いた試験片の値と比較する。

4.1.2 試験用ボードの作成

試験に使用するサンプルボードは、2023年2月22日から5日間かけて作成した。はじめに材料を配合し、金型を用いて成形した後、1次養生と2次養生を行う。それぞれの工程で使用した機材や室温条件などの詳細は、以下に段階的に示す。

〈配合〉2月22日・試験室で配合及びミキシング・実施室温 16℃

アイリッヒミキサーを使用し、材料を練り混ぜる。練り時間は、

粉体状態で約 30 秒と水投入後に約 4 分の合計 4 分 30 秒ほどであった。



図 4.1 アイリッヒミキサー

〈成形〉 2月 22 日・第 2 工場 №10 プレス機で成形・気温 12 °C
プレス成形機を使用して 100 t 圧で約 20 秒加圧した後、脱水して成形を行う。試験用ボードは 400mm × 200mm サイズの金型で作成した。



図 4.2 プレス成形機

〈1 次養生〉 2月 22 日～24 日にかけて、密室状態の室内で養生・室温約 20 °C
～25 °C前後
プレス成形直後、密閉室内の乾燥養生棚にて自然養生を行う。



図 4.3 脱水成形の様子



図 4.4 プレス成形直後



図 4.5 乾燥養生棚

〈2次養生〉2月24日～2月27日にかけて、密室状態の室内で養生・室温70℃

2月24日に脱板工程 [写真] の後、パレットに積替え、2次養生室へ搬送保管した。2次養生室の室温を、蒸気で4時間かけて70℃まで上げた後、70℃の室温を2時間キープした。3日後の2月27日、2次養生室からサンプルを取り出した。



図 4.6 脱版工程後の様子



図 4.7 パレットに積替える様子

試験用ボードの材料の配合比率は以下の表に示す。すべての材料の合計が2100gとなるよう、AとBとCの配合パターンを作成している。



図 4.8 2次養生室内

表 4.1 試験用ボードの材料配合比率

	高炉セメント	砂	ビニロン繊維	廃棄物	水 36%(W/C)
ガラスくず A	1302	651	19	128	470
ガラスくず B	903	483	19	695	325
陶器くず A	1302	651	19	128	470
卵殻 A	1302	651	19	128	470
卵殻 B	903	483	19	695	325
牡蠣殻 A	1302	651	19	128	470
牡蠣殻 B	903	483	19	695	325
カイロ A	1302	651	19	128	470
カイロ B	903	483	19	695	325
カイロ C	483	483	19	1115	173

4.1.3 試験内容

異なる廃棄物を含む各サンプルにつき、曲げ強度、耐衝撃性、寸法変化率の3点を試験する。

〈曲げ強度〉 JIS A1408 [55] に準じて、素材の曲げ強度を測る。

乾燥条件下では40℃で72時間、湿った条件下では20℃の水中で浸漬して72時間保管した後、スパン中央の試験体表面に1線荷重を加えて最大荷重を測定する。試験体を支持するスパンは14.6cmとし、3点曲げで測定した。曲げ強さの単位は、N/mm²である。

〈耐衝撃性〉 振り子式のシャルピー衝撃試験機を用いて、試験片にハンマーで高速で衝撃を与えることで、素材の耐衝撃性を測定する。[図]の赤丸部分に試験片を置き、振り子を振り下ろす。スタートの角度は振り子の軌道の最下点から測って150度、振り子がぶつかる時点のスピードは2.9m/秒とし、J/cm²を単位として、試験片の破壊に費やされるエネルギーを測定した。



図 4.9 シャルピー試験機

〈寸法変化率〉 JIS A5430:2018 [56] の「吸水に長さ変化率試験」に準じて測る。試験片を60℃で24時間乾燥させた後、デシケータにて室温を20℃まで冷却し、乾燥時の長さ(L1)を測定。その後、20℃水中(水



図 4.10 試験片の位置（赤丸部分）

面下 3cm) で 24 時間浸漬させた後、試験片の余剰水を軽く拭き取り、吸水後の長さ (L2) を測定。寸法変化率 (%) = $(L2-L1)/L1 \times 100$ とした。



図 4.11 寸法変化率の測定の様子

4.1.4 試験結果

各サンプルの試験結果は以下の [図][図] に示す。

結果からは、以下のことが読み取れる。

- ビニロン繊維ありの場合、普通セメント・高炉セメント B 種ともに曲げ強度と耐衝撃性が向上する。

4. 検証

4.1. 素材サンプルの物性評価

試験配合	①	wt%	②	wt%	③	wt%	④	wt%	⑤-A	wt%	⑤-B	wt%	⑥-A	wt%
	ビニロン	0.90	普通セメント	62.00	ビニロン	0.90	高伊セメントB種	62.00	高伊セメントB種	0.90	高伊セメントB種	43.00	高伊セメントB種	0.90
	普通セメント	62.00	普通セメント	62.00	高伊セメントB種	62.00	高伊セメントB種	62.00	高伊セメントB種	62.00	高伊セメントB種	43.00	高伊セメントB種	62.00
	粗砂	18.55	粗砂	19.00	粗砂	18.55	粗砂	19.00	粗砂	15.50	粗砂	11.50	粗砂	15.50
	細砂	18.55	細砂	19.00	細砂	18.55	細砂	19.00	細砂	15.50	細砂	11.50	細砂	15.50
									珪酸粉砕品	6.10	珪酸粉砕品	33.10	珪酸粉砕品	6.10
Dry条件測定														
	厚さ (mm)	12.7		12.1		13.0		12.3		12.7		13.7		12.9
	弾比率 (g/cm³)	2.14		2.17		2.05		2.13		2.05		1.91		2.05
	曲げ強度 (N/mm²)	13.9		10.2		12.2		11.0		13.5		10.1		8.9
	タワミ (mm)	0.59		0.15		0.59		0.18		0.48		0.59		0.29
	曲げ試験時含水率 (%)	3.3		3.6		3.3		4.9		4.8		2.7		4.4
	寸法変化率 (%)	0.09		0.09		0.07		0.06		0.06		0.09		0.08
	シャルピー (J/cm²)	6.4		2.4		4.1		1.8		4.2		4.3		4.3

試験配合	①	wt%	②	wt%	③	wt%	④	wt%	⑤-A	wt%	⑤-B	wt%	⑥-A	wt%
	ビニロン	0.90	普通セメント	62.00	ビニロン	0.90	高伊セメントB種	62.00	高伊セメントB種	0.90	高伊セメントB種	43.00	高伊セメントB種	0.90
	普通セメント	62.00	普通セメント	62.00	高伊セメントB種	62.00	高伊セメントB種	62.00	高伊セメントB種	62.00	高伊セメントB種	43.00	高伊セメントB種	62.00
	粗砂	18.55	粗砂	19.00	粗砂	18.55	粗砂	19.00	粗砂	15.50	粗砂	11.50	粗砂	15.50
	細砂	18.55	細砂	19.00	細砂	18.55	細砂	19.00	粗砂	15.50	粗砂	11.50	粗砂	15.50
									珪酸粉砕品	6.10	珪酸粉砕品	33.10	珪酸粉砕品	6.10
Wet条件測定														
	厚さ (mm)	13.2		12.2		13.1		12.6		12.8		13.7		12.8
	弾比率 (g/cm³)	2.08		2.17		2.09		2.16		2.11		1.93		2.12
	曲げ強度 (N/mm²)	10.7		10.0		10.1		9.8		9.0		9.0		11.0
	タワミ (mm)	0.42		0.15		0.61		0.15		0.20		0.78		0.22
	曲げ試験時含水率 (%)	8.9		8.9		10.2		6.9		8.8		14.0		8.2
	寸法変化率 (%)													
	シャルピー (J/cm²)													

試験配合	①-A	wt%	①-B	wt%	②-A	wt%	②-B	wt%	③-A	wt%	③-B	wt%	④-A	wt%
	ビニロン	0.90	ビニロン	0.90	ビニロン	0.90	ビニロン	0.90	ビニロン	0.90	ビニロン	0.90	ビニロン	0.90
	高伊セメントB種	62.00	高伊セメントB種	43.00	高伊セメントB種	62.00	高伊セメントB種	43.00	高伊セメントB種	62.00	高伊セメントB種	43.00	高伊セメントB種	23.00
	粗砂	15.50	粗砂	11.50	粗砂	15.50	粗砂	11.50	粗砂	15.50	粗砂	11.50	粗砂	11.50
	細砂	15.50	細砂	11.50	細砂	15.50	細砂	11.50	細砂	15.50	細砂	11.50	細砂	11.50
	ガラス粉砕品	6.10	ガラス粉砕品	33.10	珪酸粉砕品	6.10	珪酸粉砕品	33.10	カイド酸化炭	6.10	カイド酸化炭	33.10	カイド酸化炭	53.10
Dry条件測定														
	厚さ (mm)	12.8		12.9		12.7		13.2		12.7		12.6		12.9
	弾比率 (g/cm³)	2.08		2.02		2.09		2.01		2.08		2.08		2.04
	曲げ強度 (N/mm²)	10.2		12.6		14.9		13.7		13.1		16.1		12.6
	タワミ (mm)	0.22		0.37		0.31		0.31		0.35		0.24		0.36
	曲げ試験時含水率 (%)	3.6		3.7		5.1		3.6		4.6		5.7		4.8
	寸法変化率 (%)	0.07		0.05		0.08		0.07		0.08		0.09		0.16
	シャルピー (J/cm²)	6.4		4.3		5.7		4.2		4.4		3.8		3.8

試験配合	①-A	wt%	①-B	wt%	②-A	wt%	②-B	wt%	③-A	wt%	③-B	wt%	④-A	wt%
	ビニロン	0.90	ビニロン	0.90	ビニロン	0.90	RMS702×6	0.90	ビニロン	0.90	ビニロン	0.90	ビニロン	0.90
	高伊セメントB種	62.00	高伊セメントB種	43.00	高伊セメントB種	62.00	高伊セメントB種	43.00	高伊セメントB種	62.00	高伊セメントB種	43.00	高伊セメントB種	23.00
	粗砂	15.50	粗砂	11.50	粗砂	15.50	粗砂	11.50	粗砂	15.50	粗砂	11.50	粗砂	11.50
	細砂	15.50	細砂	11.50	細砂	15.50	細砂	11.50	粗砂	15.50	粗砂	11.50	粗砂	11.50
	ガラス粉砕品	6.10	ガラス粉砕品	33.10	珪酸粉砕品	6.10	珪酸粉砕品	33.10	カイド酸化炭	6.10	カイド酸化炭	33.10	カイド酸化炭	53.10
Wet条件測定														
	厚さ (mm)	12.9		13.2		12.9		13.1		12.9		12.7		12.9
	弾比率 (g/cm³)	2.12		2.05		2.12		2.03		2.13		2.11		2.07
	曲げ強度 (N/mm²)	11.0		9.3		12.1		10.4		10.3		11.4		6.4
	タワミ (mm)	0.33		0.57		0.26		0.25		0.30		0.34		0.35
	曲げ試験時含水率 (%)	8.3		8.2		7.8		9.1		8.5		8.7		14.4
	寸法変化率 (%)													
	シャルピー (J/cm²)													

- 高炉セメント B 種は、普通セメントに比べて耐衝撃性と寸法変化率が下がる。衝撃に弱い、湿度が強くなると考えられる。
- 卵殻粉砕品、陶器粉砕品、ガラス粉砕品、牡蠣粉砕品、カイロ酸化鉄のうち、最も高い曲げ強度を示したのは、カイロ酸化鉄が 33.10wt% の試験片である。続いて、牡蠣殻粉砕品が 6.10wt% の試験片となる。これらは、基準値である普通セメントのみの試験片よりも曲げ強度に優れる。また、廃棄物を適量加えることによって、高炉セメント B 種のみを配合した試験片よりも優れた曲げ強度を示すものもあった。以下 (1)～(6) の順に示す。

(1) 9-B：カイロ酸化鉄が 33.10wt% の試験片 (16.1N/mm²)

(2) 8-A：牡蠣殻粉砕品が 6.10wt% の試験片 (14.9N/mm²)
基準値 普通セメントの試験片 (13.9N/mm²)

(3) 8-B：牡蠣殻粉砕品が 33.10wt% の試験片 (13.7N/mm²)

(4) 5-A：卵殻粉砕品が 6.10wt% の試験片 (13.5N/mm²)

(5) 8-A：カイロ酸化鉄が 6.10wt% の試験片 (13.1N/mm²)

(6) 7-B：ガラス粉砕品が 33.10wt% の試験片 (12.6N/mm²)、9-C：カイロ酸化鉄が 53.10wt% の試験片 (12.6N/mm²)
参考値 高炉セメント B 種の試験片 (12.2N/mm²)

- ガラス粉砕品を除いたほとんどの試験片は、Dry 条件下と比較して、Wet 条件下で曲げ強度が低下する。
- 卵殻粉砕品、陶器粉砕品、ガラス粉砕品、牡蠣粉砕品、カイロ酸化鉄のうち、最も高い耐衝撃性を示したのは、7-A：ガラス粉砕品が 6.10wt% の試験片である。続いて、9-A：カイロ酸化鉄が 6.10wt% の試験片となる。これらは、基準値である普通セメントの試験片よりも耐衝撃性に優れる。また、廃棄物を適量加えることによって、高炉セメント B 種を配合した試験片よりも優れた耐衝撃性を示すものもあった。以下 (1)～(5) の順に示す。

(1) 7-A：ガラス粉砕品が 6.10wt% の試験片 (6.4J/cm²)

- (2) 8-A：牡蠣粉碎品が 6.10wt% の試験片 (5.7J/cm²)
基準値 普通セメントの試験片 (5.4J/cm²)
 - (3) 9-A：カイロ酸化鉄が 6.10wt% の試験片 (4.4J/cm²)
 - (4) 5-B：卵殻粉碎品が 33.10wt% の試験片 (4.3J/cm²)、6-A：陶器粉碎品
が 6.10wt% の試験片 (4.3J/cm²)、7-B：ガラス粉碎品が 33.10wt% の試
験片 (4.3J/cm²)
 - (5) 5-A：卵殻粉碎品が 6.10wt% の試験片 (4.2J/cm²)、8-B：牡蠣殻粉碎品
が 33.10wt% の試験片 (4.2J/cm²)
参考値 高炉セメント B 種の試験片 (4.1J/cm²)
- 卵殻粉碎品、陶器粉碎品、ガラス粉碎品、牡蠣粉碎品、カイロ酸化鉄のう
ち、最も低い寸法変化率を示したのは、7-B：ガラス粉碎品が 33.10wt% の試
験片である。続いて、5-A：ガラス粉碎品が 6.10wt% の試験片と 8-B：牡蠣
殻粉碎品が 33.10wt% の試験片となる。これらは参考値である高炉セメント
B 種を配合した試験片よりも優れた寸法安定性を示す。基準値である普通セ
メントの試験片よりも優れた寸法安定性を示すものもあった。以下に、(1)
～(5) の順に示す。
 - (1) 7-B：ガラス粉碎品が 33.10wt% の試験片 (0.05%)
 - (2) 5-A：卵殻粉碎品が 6.10wt% の試験片 (0.06%)
 - (3) 7-A：ガラス粉碎品が 6.10wt% の試験片 (0.07%)、8-B：牡蠣殻粉碎品
が 33.10wt% の試験片 (0.07%)
参考値 高炉セメント B 種の試験片 (0.07%)
 - (4) 6-A：陶器粉碎品が 6.10wt% の試験片 (0.08%)、8-A：牡蠣殻粉碎品が
6.10wt% の試験片 (0.07%)、9-A：カイロ酸化鉄が 6.10wt% の試験片
(0.08%)
 - (5) 5-B：卵殻粉碎品が 33.10wt% の試験片 (0.09%)、9-B：カイロ酸化鉄が
33.10wt% の試験片 (0.09%)
基準値 普通セメントの試験片 (0.09%)

これら全ての結果を表にまとめる。
 まずは、従来のコンクリートとの比較をするため、基準値である普通セメントの試験片よりも優れた強度があるものは○、そうでない場合は×と表記する。

表 4.2 強度にかかわる3つの試験結果（普通セメントとの比較）

	曲げ強度	耐衝撃性	寸法安定性
高炉スラグのみ	×	×	○
ガラスくず A	×	○	○
ガラスくず B	×	×	○
陶器くず A	×	×	○
卵殻 A	×	×	○
卵殻 B	×	×	○
牡蠣殻 A	○	○	○
牡蠣殻 B	×	×	○
カイロ A	×	×	○
カイロ B	○	×	○
カイロ C	×	×	×

さらに、高炉スラグ以外のそれぞれの廃棄物による強度の変化について示すため、参考値である高炉セメント B 種の試験片よりも優れた強度があるものは○、そうでない場合は×と表記する。

表 4.3 強度にかかわる3つの試験結果（高炉セメントB種との比較）

	曲げ強度	耐衝撃性	寸法安定性
高炉スラグのみ	-	-	-
ガラスくずA	×	○	○
ガラスくずB	○	○	○
陶器くずA	×	○	×
卵殻A	○	○	○
卵殻B	×	○	×
牡蠣殻A	○	○	×
牡蠣殻B	○	○	○
カイロA	○	○	×
カイロB	○	×	×
カイロC	○	×	×

4.2. 素材サンプルの付加価値の評価

4.2.1 調査目的

本章では、廃棄物をリサイクルするコンクリート素材の付加価値や新たな活用方法を探るため、建築家へのインタビュー調査を行う。開発した素材が、4.1 に上げた物理的性質の他にどのような価値を持ちうるかを聞き出す。作成した素材サンプルに関する特徴を伝え、どのような要素が付加価値として認識されるかをインタビュー形式で聞き出していく。廃棄物を活用するコンクリート素材の既存研究では、主に物理的性質としての素材の配合や耐久性など、数値化できる要素を個別に評価する場合が多い。それらも1つの評価軸であるが、2.2で示したような廃棄物ならではの風合いや表情などの意匠性も、リサイクル素材を活用するコンクリートには重要であるという仮説を立てた。本研究では、4.1で示した耐久性もひとつの評価軸として捉え、意匠性やそれ以外の特徴についても評価をしてみよう。

4.2.2 ターゲット

建築家をターゲットにインタビューを行う。建築家は、建築物の設計と実装にかかわる実務家の中でも幅広い知識を持っている。多くの場合、施工主、施主者、建築主を繋ぐ役割を担っており、地震にも耐え命を守る構造設計や、住み心地を考えた周辺や内部環境に関する知識、耐火性や防音などの知識から、施主の求める価格、意匠的な側面まで、さまざまな人の要望をふまえて、良い環境をアレンジする仕事であるためだ。建材に求められる最低条件や付加価値となる要素を理解していると考え、評価のインタビューを依頼した。

4.2.3 調査概要

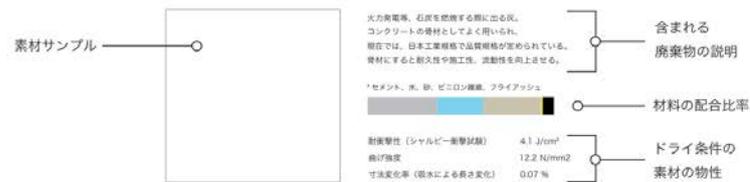
インタビューは、2023年6月13日から6月23日にかけて、5人の建築家に協力を依頼して行った。デザインした素材サンプルを事務所に運んで机の上に並べ、

40分ほど実際に素材を見て触れてもらいながら、質問をした。インタビューは、全員に共通して必ず聞く質問の構造化インタビューと、その他インタビュー内で気になる部分や具体的な事例を掘り下げる非構造化インタビューの2つのセクションから成り立つ半構造化インタビューである。素材の特徴を説明する際には、説明の抜け漏れがないよう、事前に高炉セメントと各サンプルの特徴について説明する資料を作成した。資料内の画像部分には、プロトタイプのタイルをディスプレイした。以下に、質問項目と説明資料を示す。

- 全員に共通する質問
 - － 好ましいサンプルはどれか？
 - － 好ましくないサンプルはどれか？
 - － 上記の理由はなにか？
 - － どんな素材の用途が考えられるか？
 - － 素材の実用可能性を評価する際に重視する要素はなにか？
 - － 素材の持続可能性を評価する際に重視する要素はなにか？

- 自由な質問
 - － 素材はどのように選ぶか？
 - － コンクリートの魅力はなにか？

資料の見方



高炉セメントの特徴



+

水和速度が遅く、コンクリートの温度上昇が小さいため、ひび割れが生じにくい。
長期強度の増進が大きいため、コンクリート構造物の耐久性に優れている。
スラグの特性により、硬化したコンクリートが緻密になるため、水密性が大きい。

-

初期強度が小さく、早期に強度を必要とする構造物（桁、床版、建築躯体等）には適さない。
水和速度が遅いため、低温の影響を受けやすい。
中性化速度が大きいため、かぶりの小さい構造物（桁、床版、建築躯体等）には適さない。

フライアッシュ



火力発電等、石炭を燃焼する際に出る灰。
コンクリートの骨材としてよく用いられ、
現在では、日本工業規格で品質規格が定められている。
骨材にすると耐久性や施工性、流動性を向上させる。

*セメント、水、砂、ピニロン繊維、フライアッシュ



卵の殻



家庭や工場の卵殻は、埋め立てにより環境を汚染する。
その量は年間 26 万トンに上る。近年は土壌改良剤など
としても注目されている。
耐久性や吸水性が落ちることが、研究で指摘されている。

*セメント、水、卵の殻



耐衝撃性	4.3 J/cm ²
曲げ強度	10.1 N/mm ²
寸法変化率	0.09 %

牡蠣の殻



漁業に関わる廃棄物。養殖場や漁港、レストランでの廃棄が多く、推定発生量は約16万トン。養殖過程の牡蠣殻は廃棄物処理法に基づき処分することが求められており、各産地では廃棄方法が課題となっている。コンクリートに加えることで、ひび割れの基点となりやすい空隙が小さくなる。

*セメント、水、砂、ビニロン繊維、牡蠣の殻



耐衝撃性	4.2 J/cm ²
曲げ強度	13.7 N/mm ²
寸法変化率	0.07 %

蟹の殻



漁業系廃棄物の一種。水産加工製品の製造過程で生じる。水産加工製品の製造過程で生じる残さの取り扱いが課題視されている。近年はカニ殻に含まれるキチンを分解した成分が化粧品に使用されるなど、活用が進む。

*セメント、水、砂、ビニロン繊維、カニ殻



米のもみ殻



農業に関わる廃棄物。国内で年間約 200 万トン、世界中では年間約 1 億トン以上排出される。2014 年時点では籾殻の約 2 割が廃棄され、約 3 分の 1 が有効利用されていないと推計されている。もみ殻を焼却した灰を使用すると、曲げ試験と圧縮試験にて、わずかに強度が増すことがわかっている。

*セメント、水、砂、米のもみ殻



繊維くず（有松絞り）



繊維くずの最終処分率は 12.8% と、排気量全体に占めるリサイクル率の向上の余地が残されている。本サンプルは、愛知県の伝統工芸である有松絞りの産業廃棄物を使用している。

*セメント、水、砂、繊維くず

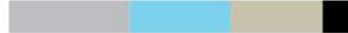


ピーナッツの殻



落花生は身近で一般的な食べ物であるが、加工時に多量に排出される殻のほとんどは産業廃棄物として処理されている。本サンプルには、千葉県の農家にて生産、一般家庭で消費されたものを使用している。

*セメント、水、砂、ビニロン繊維、牡蠣の殻



木くず



産業廃棄物の中でも、排出量は7491千トンと大量だが、リサイクル率は高い。建設業関係の建物の廃木材、製品製造業関係の会社で生じるおがくず、梱包材くず、廃チップなどが一例。

*セメント、水、砂、ビニロン繊維、フライアッシュ



ジーンズ



ファッション・ウェイスト (Fashion Waste) と呼ばれ、製造工場から排出される端材の量は、年間約 45,000 トンとも言われている。本サンプルは、大手デニム工場から排出される端材を使用した。

*セメント、水、砂、牡蠣の殻



タバコ吸い殻（フィルター）



たばこのフィルターは、アセチルセルロースという半合成ポリマーでできていて、自然界で生物に分解されることはほとんどない。そのため、たばこのポイ捨てにより、長い間環境中に残り続けてしまうことが課題。本サンプルは、渋谷区の喫煙所や植木のタバコを回収し分解して使用している。

*セメント、水、砂、ピニロン繊維、フライアッシュ



レシート



感熱紙という特殊な紙が使用されている。
レシートには感熱紙という特殊な紙が使用されており、
表面の特殊なインクが熱反応するため、紫外線や熱に弱い。
リサイクルに不向きな紙と言われる。
本サンプルのレシートは、コンビニやスーパーで収集した。

*セメント、水、砂、ビニロン繊維、牡蠣の殻



海洋プラスチック片



不適正な管理によって海洋に流出するプラスチックごみ。
世界全体で毎年約 800 万トンのプラスチックごみが
海洋に流出しており、生態系への影響が議論されている。
本サンプルは、神奈川県海岸に流れ着いた
プラスチック片を収集した。

*セメント、水、ビニロン繊維、プラスチック片、卵の殻



漁網



漁業に関わる廃棄物。廃プラスチック類に分類される。回収されずに海に漂う漁網は、海の生物に絡まるため課題視されている。本サンプルで用いたのは、曲げ強度を補強するビニロン繊維が配合された廃棄漁網である。

*セメント、水、ビニロン繊維、漁網



髪の毛



美容院等で大量に処分される髪の毛は、家庭ゴミのステーションに捨てられず、処理にコストがかかることがある。本サンプルは、都内の美容室で廃棄予定のカラー剤やパーマ剤を用いた髪の毛を使用した。

*セメント、水、砂、髪の毛



ガラスくず



産業廃棄物の中でも、最終処分が多くリサイクル率に課題が残る。建物の解体時のガラス破片や、ガラス製造業における不良品や割れたガラス製品、蛍光灯のガラスなどが含まれる。本サンプルは、神奈川県海岸にて収集した。

*セメント、水、ピニロン繊維、ガラス



耐衝撃性	4.3 J/cm ²
曲げ強度	12.6 N/mm ²
寸法変化率	0.05 %

陶器くず



産業廃棄物の中でも、最終処分が多くリサイクル率に課題が残る。土器や陶器、磁器などが含まれる。本サンプルは、神奈川県海岸にて収集した。

*セメント、水、ピニロン繊維、陶器くず



耐衝撃性	4.3 J/cm ²
曲げ強度	8.9 N/mm ²
寸法変化率	0.08 %

カイロの中身



寒い冬に大量に消費される馴染み深い生活用品。
カイロの原料は、鉄粉、活性炭、パーミキュライト、
水、塩で、外袋から取り出した際に中に含まれる鉄粉
が酸化反応を起こす。酸化鉄は、セメント原料に
使用されることがあり、焼成過程で原料同士の
化学的結合を促進する溶融材として用いられている。
カイロごみを用いた既存研究はなく、新規性がある。
磁石にくっつく。本サンプルでは、一般家庭の廃棄物を使用。

*セメント、水、カイロの中身



耐衝撃性	3.8 J/cm ²
曲げ強度	12.6 N/mm ²
寸法変化率	0.16 %

4.2.4 調査結果

調査内容について、インタビュー内での発言は「」内に示し、以下に具体的に述べる。

〈第1回インタビュー〉

Kakizoe Architects¹ 垣副正樹さん

美術館、アパートからホテルまで国内外の幅広い建築・内装を手がける建築家。

好ましいサンプルはどれか？

サンプルを自由に眺め、触れてもらった直後の質問では、「海洋プラスチックと卵殻なんかは、面白い。柔らかい感じがする。」と、素材の意匠性に好感触を示した。また「有機的なものっていうのは（表情が）すごく左官材みたいな感じ」で、特に牡蠣の殻については「少し石っぽく、左官っぽくも見える」意匠性を評価していた。

好ましくないサンプルはどれか？

上記の質問に関連して聞いたところ、「結構なんかやっぱかなり強度がなさそうだなと思うのは、靱殻と繊維くず」と2つのサンプルをあげ、その理由として「ボロボロしている」「これがどの程度の圧力で押されたかわからないが、押ししても隙間が出てしまう素材」であると、意匠性と関連する耐久性の側面について懸念を示した。

意匠性以外の要素について

一目で見た際の印象で、見た目以外の要素として触感のユニークさの話もあがった。しかし、「埃が出ないように（コンクリートに）防塵塗装をしなきゃいけないので、一気に自然素材感がちょっとなくなったりして、触感とかも変わってきちゃいそう。もうこのザラザラが全部消えちゃうと思うんで。」と、表面に施す塗装の有無によって、触感の面白さが消えてしまう可能性を

1 <https://www.kakizoearchitects.jp/>

示唆している。「そうなると見た目ですよ。」と、塗装を施す場合は、外観の意匠性の方が重要であるとした。

どんな素材の用途が考えられるか？

建築のスケールによって、2つの異なる回答を得た。1つ目は構造体に用いる場合、2つ目は外装や内装の表面材に用いる場合である。構造体に用いる場合は、「おそらく、需要があると思う」が、その需要を生むには、「通常のRC造のコンクリートと同等の性能・強度をまず担保できないといけない。」と述べた。さらに、「開発したてのものは面白いんですけど、実際に作ろうとすると、ものすごい高額なものになってしまって、正直クライアントが払えないことがある」、「結局大量生産しないと価格って落ちてこない」として、開発初期の経済的コストの高さが、素材の実用化に向けた最初の課題になると述べた。2つ目の表面材の場合、「構造的な強度が必要ない左官剤」としての活用も考えられる。左官材には構造的な強度が必要ないので「遥かに応用の幅は広がる」とした上で、「こういうもの（廃棄物）を混ぜることによってここまで実は強度が生まれますとか（機能が増すこと）っていうのはすごくストンと落ちる」が、「結局（見た目の）面白い表面材で終わってしまうと勿体無い。」とし、意匠性と機能性の両方が付加価値になるとした。

素材の実用可能性を評価する際に重視する要素はなにか？

1つは、ユーザー視点で考えた場合の強度やメンテナンスのしやすさである。特に、住宅の設計の場合は「クライアント＝家主さん＝ユーザーである場合が多く、」建材として利用するだけの場合、「その室内の家具だったり壁面だったり床材」について、素材を日常生活に使うときの強度やメンテナンスのしやすさが重要だという。具体的には「経年劣化でメンテナンスが大変なんじゃないかとか、油が跳ねたりしちゃうんじゃないか、フライパンを着ただけ熱に耐えうるか」など、日常で面倒なことが発生しないかということが多い。「もちろんその見た目も素晴らしいっていうのもあるんですけど、やっぱりどれだけ見た目が良くても、跳ねた油の痕だらけってなると（難しい）。見た目もありつつ、優先順位としては、素材を日常生活に使うときの特性、強度やメンテナンスとか、清掃のしやすさ」が先にくると言う。2つ

目に、地域の気候に合わせた機能性も重視するという。「例えば非常に通常寒いような地域だと、もちろん床暖房入れるとかってのもあるんですけど、やっぱり素材自体はもう少しぬくもりのある木がいいとかありますし、ただ何か大きいなどかになると同じ目視をしてもやっぱり湿気を駄目になりやすいとかもあったりただやるので、気候とか立地にもよってまた変わってくるんですよ。」として、その地域の気候を考慮した機能性についてデータがあることも重要とした。3つ目に、廃棄物の量と回収に関わるコストも重要な要素である。「結局量があったとしても、それを回収するコスト」が課題になるとし、「結局そういう廃棄物をどっかの工場も捨てて処理するための輸送費」がかかることは本末転倒だとする。以前担当した案件で、その土地の土や糞を使用した案件を例に、「地産地消が本当は良い」としながら、「大量生産となる資産事情もなかなか難しい」と、地域の素材を使用することと、大量生産でプロダクトを製造することでは、性質が違うものとしている。

素材の持続可能性を評価する際に重要な要素はなにか？

「原材料がどの程度供給できるのか」を長期的な目線で見られることを挙げた。「常にその材料が廃棄されているのか、実はその本来、元々あったものが将来的に何かその技術開発によって廃材でなくなってしまうっていうことは、あるのかなのか」が重要である。

素材はどのように選ぶか？ 素材の決定に関わる要素は、担当する案件やその案件の構造によって、重視しなくてはならない要素の順位が変わる。「お施主さんありきの仕事は、予算も決まっています立地も決まっています。スケジュールも決まっています。」とし、それらの現実的な制約の中で、「その土地の特性とか周辺環境を読み解いて、そこにそこでしかできないものは何だろうって考えて、それに見合ったいっぱいそういうのをコンセプトに立案する」中で、「スタディを色々して、いろんな素材を試し、やっぱり何々事務所はこれやっぱりこれを押すっていう形で提案して、その世界観を理解してもらおうとスムーズに進む」と言う。またインタビューイは、木造鉄骨、RCを手掛けた経験がある。その中でコンクリート素材そのものの魅力を尋ねると、木造にはコスト面で劣るが、コスト感は魅力だとした。しかしコストのみではな

く、お客さんの要望によっては「RCなどの構造体だと、スパンを飛ばせる（柱と柱の間隔を空けられる）」こともあり、空間を広く演出したい場合などは、個別の要望に合わせてと言う。またコストと構造的な利点のどちらを取るかは、クライアントの提示する現実的な制約のほかに、既存のツールとの相性も意思決定に関わってくる。「現実問題、物価が高騰していてもろもろ人件費も高騰してる中で（中略）建設費用が上がってしまい、オリンピック前に元々鉄骨で見てたいたけれど、正直厳しいなと木造に切り替えようとなった時期があった。ただ、やっぱりその凶剤材の特性として、鉄骨だったら4階建てまでいけるが、木造に切り替えた瞬間に3階建てまでしか使えず面積減ってしまう。そうすると、やっぱりそのオフィスだってこれじゃ狭いってなることもある」と述べた。

〈第2回インタビュー〉

Bureau 0-1 株式会社² カズ・T・ヨネダさん

空間・建築・都市デザインなどの領域を、国内外で手掛ける建築家。

好ましいサンプルはどれか？

素材を眺めてもらい好ましいサンプルについて聞いたところ、「好ましいものは、廃棄物を使っているっていうだけじゃなくて、普通のものとは比べてときに効果やパフォーマンスがあるもの」としていた。サンプルの中で、海洋プラスチックは、「セメントボードを何かで仕上げで隠すんじゃなくてそれ自体が空間の表現になる」可能性があるとして、表に見せる建材としての表面の意匠性を評価していた。しかし「廃棄プラスチックが海に出る前に、きちんと回収する方が」環境にとっては望ましく、「海に出てしまうと、そこで問題が起きて、ウミガメがなくなったり」するとして、海洋プラスチック片に限定せず、プラスチックの廃棄量に着目する方がより良いと捉えている。牡蠣の殻と卵殻について「carbon でできているからカーボンキャプチャーにはいいんですよね。実際、日本の昔の漆喰と違って牡蠣を一旦燃や

2 <https://www.bureau0-1.com/projects/index>

して、決してそれを粉々にした状態で圧縮に混ぜると、湿気に強い防湿性がある。そういう意味では、炭素が高い卵とか牡蠣の再利用って意味でもいいし、カーボンキャプチャーっていう意味でもいいし、湿度、湿度を吸収する管理するって思うのにと」と、持続可能な建材としての効果と可能性を評価し、「カイロの中身は見た目がレンガに近い」とのコメントもあった。

好ましくないサンプルはどれか？

「何が可能かわからないという謎」な要素は、髪の毛って切り口自体は面白いと思っても、好ましくなさに繋がるという。「例えば、ガラスくずはわざわざセメントに入れる必要あるのか謎」や、「タバコの吸殻」についても「そのフィルターが持つ何らかしらの機能、例えばその部屋の臭いを吸収してくるような機能があるのかどうか」など、他にもリサイクルや活用できる用途がある場合のセメント素材への活用の必然性や、機能があるべきだとする。さらに、髪の毛は「強度実験した方がいいと思う」強度に謎を残し、「土壁に昔、動物の毛を入れて強度を増していた」こともあったり、「髪の毛の長さとかさ、髪の毛の（配合比）率が50%なのか20%70%なのか、それも全然変わってくる」と適切な配合を数値化することで謎な要素が減ることを示した。また、「美容院で大量に処理される髪の毛だということ以外に何かしらの伝統工法とか、もしくは絡みがいいから施工性が上がるいいとか、もしくは防音性が上がるとかもうちょっとそういうのがあると、説得力がある」とし、付加価値となる具体的な項目を挙げた。

どんな素材の用途が考えられるか？

建材のパネル素材の用途には、それ自体を建築の表現として表に出すものと、目立たない素材（構造的なもの）として裏に用いる2つのパターンが考えられる。理想的には面白い素材を見せたい」とし、表に用いるものとして考えられる活用方法の1つに「パネル」をあげた。「藁や繊維で作ったハーベストボードに近いような製品」として「パーティションや壁の仕上げ」として使用できる可能性がある。

素材はどのように選ぶか？

プロジェクトのどの段階で、どのように素材を選ぶかを尋ねたところ、「コンセプトと折り合わないと素材ってやっぱりすごいコストになる」ため「素材は、結構最初の段階から意識している」としていた。さらに、面で見たとときのサイズによって素材の与える印象が変わることについて触れ、「これぐらい（7.5cm × 7.5cm）の面で見ると、もしシハチ板の大きさで見え方が全然違うときがある」とした。

素材の実用可能性を評価する際に重視することはなにか？

普通のモルタル仕上げの壁やボルテックス仕上げで壁だもしくは土壁らしい見た目は「見ても、何も二度見も不気味さも意外性もないが、ある意味、製品として安心する」ことが価値基準であるという。上の質問の回答にある性能や機能、質などを担保できていることを含め、「Banality（普通であること）」は、1つな重要な要素である。質量、価格、廃棄物に関わる課題背景、上記の回答に関連する廃棄物ならではの機能性、施工の容易さ、4.1で試験をした耐衝撃性、曲げ強度、寸法安定性のほか「表面加工による耐水性や、吸音効果、対湿度、防音、防水性能」をあげている。もう1つの価値基準であり「Banalであることのむしろ逆の要素」として挙げたのは、「見た瞬間もしくは触った瞬間に何かやっぱり違う美しさだったり面白さがある」こと、つまり「意匠性」だという。過去にプロジェクトで参考にしたプラスチック廃棄物の破碎端材のリサイクル素材の事例を挙げ、「表面表面の扱いかんで面白い素材になる」ことがあり、「見た瞬間何か特別な表情がある」ということも実用可能性を向上させる。どちらの軸が良し悪しということではなく、それぞれ別の方向性として重要な要素だと述べた。また、「これももう全面に展開された世界を想像してみたときに、それ、そのそれって何を達成してるんだろうかっていうのを考えてもいいかもしれない」とし、「これこれこういうこれが世の中に浸透したときのビジョンって何なんだろう考えてもいい。これちょっとやっぱり10年後どうなんだろうみたいな。」と、長期的に、その素材が汎用性を持った場合のビジョンについても考えるべきだとした。

素材の持続可能性を評価する際に重要な項目はなにか？

1つ目は「カーボンキャプチャー」ができることである。好ましいサンプルの際に牡蠣の殻や卵殻について挙げた理由である。2つ目は、原料の供給についての長期的な視点をあげ、「例えばタバコはこれから喫煙者が減っていくであろう中で、どこまで実は今後の展望の広がりがあるのかってのはちょっとわからない。現に日本は喫煙者が減っている」として「インドとかまだまだ吸ってる人多いっていうのがなんとなくわかる」ので、グローバルな供給量の変化率にも目を向けることが必要だとしている。

〈第3回インタビュー〉

一般社団法人サーキュラーコットンファクトリー³ あらいかおりさん、中村薫さん、くぼたけいこさん
繊維ごみから紙や壁材をつくる事業に関わっている、国内の建築家チーム。

好ましいサンプルはどれか？

好ましいサンプルとして「1番最初に目に留まったのは自然素材で、具体的には木くずとか牡蠣やカニの殻」であった。特に殻類は「浄化機能や空気質をよくしてくれる可能性がある」として、気にしていた。また、アップサイクル事業に関わる事業の経験上、「その廃棄物を入れる混ぜることによって生まれる何か特性がある」ものに好ましさを感じるという。そのほか、カイロの中身については「すごい量が埋め立てられている」認識があり、「1回一瞬温まるために捨てられる」という使い捨ての部分に課題意識があるからこそ「見た目にも美しいもの」として面白さを感じるという。同じく見た目では、プラスチックの色味が「なんかかわいい色がいろいろあって、面白い」としていた。

好ましくないサンプルはどれか？

髪の毛は「ちょっと怖くて、毛が伸びてできそう」という不気味な印象を与えるほか、レシートは「原形が残る点が面白い」が建材として使いたいかと

3 <https://www.circularcottonfactory.jp/>

言われると「防火性が落ちそう」と、機能面での懸念が残る。また、カイロの廃棄物は「磁石がくっつくことはさ、なんか磁場的なっていうか何か影響でそう」なので検証が必要だが、むしろそれを活かした「治療室」への応用などができる可能性など、用途に合わせて、好ましさに好転する可能性を示した。

どんな素材の用途が考えられるか？

はじめに、このサンプルの形状から「タイル」の使い道があると提案があった。従来のタイルと異なり、プレスするだけで焼成加工の必要性がない点は、利点になる。また、「植木鉢やベンチなどのプロダクトスケールのもの」や「短期間で壊してしまうもの、仮設建築物」についても触れられた。いずれの用途の場合も、従来の用途と比べた LCA 比較など、データによる検証が重要だとしている。

素材の実用可能性を評価する際に重視する要素はなにか？

外観、触感、質量、価格、耐衝撃性、曲げ強度、寸法安定性、耐火性、耐水性、廃棄物の配合比率、廃棄物の産地、廃棄物に関わる課題背景、廃棄物に対して持つ印象、LCA 評価が挙げられる。特に、価格に関しては「すべての人に手に届く」という部分を重要視しており、強調している要素である。

素材の持続可能性を評価する際に重視する要素はなにか？

「『混ぜればゴミ』という言葉」について触れ、どんな素材でも一度混ぜてしまうと、次のリサイクルのために分別する難易度が上がり、その次のリサイクルができず廃棄されてしまう現状を語った。例えば「ガラス入りのコンクリートをその次に使うとしたら、どうなるのか」「セメントやそれ以外の接着剤で、その強度を増すものを例えば入れたら、また再生できるのか」といった点が懸念される。そのため、建材に使用して耐久性が落ちた後も、プロダクトとして活用する方法など、次の使い道は持続可能性に大きく関わる要素である。また、「LCA 評価で、製品のライフサイクルを数値的に評価する」ことの重要性も触れられた。

第 5 章

結 論

5.1. まとめ

ここまでの章では、様々な廃棄物をリサイクルするコンクリート素材をデザインする過程と、その付加価値を探求するための検証を行った。本章では、その素材についての評価から分かったことをまとめる。この考察は、1.4 本研究の目的で示した以下の3つの問いに対応している。

- コンクリート素材の開発において、いかに様々な廃棄物を「資源」として活用できるのか？
- 開発した素材は、従来のコンクリートと比較してどのような強度特性を持つか？
- 開発した素材は、強度や耐久性などの物理的特性の他にどのような価値を持つか？

まずは、既存研究・先行事例・インタビューから洗い出した、コンクリート素材の開発様々な廃棄物を「資源」として活用するための要素を以下にまとめる。

- 素材の物理的性質
 - － 曲げ強度
 - － 耐衝撃性
 - － 寸法安定性
 - － 耐火性

- 耐水性
- 吸音・防音性
- 質量
- 空気清浄能力
- 硬度
- 絡みやすさ

- 主観的に捉える素材の性質
 - 見た目（意匠性）
 - 触感
 - 匂い

- 持続可能性に関わる素材の性質
 - 廃棄物の排出量（供給量）
 - 廃棄物の産地（地域性）
 - 廃棄物に関わる課題背景
 - 廃棄物の運送コスト
 - 廃棄物の回収コスト
 - 材料の原価
 - 再リサイクルの可否
 - 塗装の有無
 - カーボンキャプチャー
 - LCA 評価
 - 材料の配合比率

本研究内でこの全ての項目を検証できたわけではないが、3つの強度の実験を含めて、作成したプロトタイプごとの評価を一覧にすると、以下の図のようになる。緑が価値として高く評価されたもの、水色が低く評価されたものである。牡蠣殻は物性以外にも高く評価された項目が最も多く、本研究で作成したプロトタイプの中では高く評価できる。次にカイロくず、ガラスや陶器くずが評価された。ただしカイロくずは廃棄物の供給量や回収コストに懸念がある。



図 5.1 各サンプルごとのまとめ

次に、それぞれの項目について詳細にまとめる。はじめに挙げた素材の物理的性質については、インタビュー内で「好ましいものは、廃棄物を使っているっていうだけじゃなくて、普通のものとは比べたときに効果やパフォーマンスがあるもの」「Banality (普通であること)」「その廃棄物を入れる混ぜることによって生まれる何か特性がある」などと三者三様に表現された。いずれも、従来のコンクリート素材やその他に検討できる素材と比べて、物理的性質が強化されるか、今までのコンクリート素材にない新しい性質が生まれることは付加価値になるといえるだろう。素材の物理的性質のうち、本論文でデザインした廃棄物を活用するコンクリート素材では、4.1で曲げ強度・耐衝撃性・寸法安定性の3点を調べた。開発した素材は、従来のコンクリートと比較してどのような強度特性を持つか?を明ら

かにするための試験である。廃棄物がもたらす素材の機能を強化することで、強度を強化できるため、長寿命の素材になり、持続可能性を向上させることも期待できる。牡蠣殻や卵殻の石灰石代替やガラスや陶器くずを骨材として利用する先行研究はあるが、カイロの中身を用いた試験には新規性がある。

その結果、廃棄物を活用することで、いくつかの素材に強度が増す効果があることがわかった。コンクリートが弱みとする曲げ強度では、カイロ酸化鉄の配合比率が33.10wt%の試験片と牡蠣殻粉碎品の配合比率が6.10wt%の試験片は、普通ポルトランドセメントの強度を上回った。耐衝撃性では、ガラス粉碎品の配合比率が6.10wt%の試験片と牡蠣殻粉碎品の配合比率が6.10wt%の試験片が普通ポルトランドの強度を上回った。また、寸法変化率が低い（寸法が安定している）のは、ガラス粉碎品の配合比率が33.10wt%の試験片、卵殻粉碎品の配合比率が6.10wt%の試験片、ガラス粉碎品の配合比率が6.10wt%の試験片、牡蠣殻粉碎品の配合比率が33.10wt%の試験片が上回った。カイロ酸化鉄は曲げ強度の強化に優れ、ガラス粉碎品は、耐衝撃性や耐湿性の強化に優れ、牡蠣殻粉碎品は曲げ強度と耐衝撃性、耐湿性の全ての強化に優れることがわかる。これらは1つの試験片につき1回きりの試験なので、今後繰り返し試験をする必要があるが、廃棄物を用いることでこれらの性質が強化されることは、大きな付加価値となるだろう。逆に、有機廃棄物を用いることによって物性が低下するものは好ましくない。そのほか、インタビューでは、耐火性や耐水性、吸音・防音性、空気の清浄効果など「機能性」が強化されることが価値になるとわかった。今回、これらの性能については試験を行えなかったが、それぞれの試験の結果によって、最適な用途を導くことはできるだろう。例えば、吸音性や防音性はオフィスや音楽の流れるスペースなどで活用でき、耐火性が高まれば台所周りなどに使用できる。ある物理的性質が向上した結果、ほかの物理的性質が変化することもあり得るため、用途や地域によって、複合的に判断しなくてはならない。

次に、主観的に捉える素材の性質についてまとめる。これは、開発した素材は、強度や耐久性などの物理的特性の他にどのような価値を持つか？という問いに対応している。第2章で示した既存の研究や事例では、既存の研究で検証されていない意匠性が重要であるという仮説があった。インタビュー内で素材の「好まし

さ」について尋ねた際に、多くの人が見た目から来る印象に触れており、「見た瞬間もしくは触った瞬間に何か違う美しさだったり面白さがある」ことは、重要な要素であると考えられる。サンプル全体の中では、海洋プラスチックの色味と、牡蠣の殻、卵殻の「有機物らしさ」や「石っぽさ」「土壁」など既存の素材との共通点、カイロの中身を使用したものの色味が注目を集めた。意匠性に優れるものは、特に、「セメントボードを何かで仕上げで隠すんじゃなくてそれ自体が空間の表現になる」ように、素材の表情を表に見せ、人を魅せる空間の一部として使用する際には、重要な要素である。インタビューでは「壁材」や「床材」の提案があがったほか、屋根の瓦やファサードなど、表に出る部分に使用する用途や、構造体にとって問題ない量の素材を3Dプリンティング技術などを使用して活用し、新たな形状を試す可能性も考えられる。しかし、「結局（見た目の）面白い表面材で終わってしまうと勿体無い」という指摘もあったように、表面材として美しいだけでなく、機能性を備えていた方が、価値は高まる。意匠性は重要であるが、それも特定の用途に必要な機能性を満たした上での付加価値といえるだろう。触感に関しては、コンクリートの場合、表面に施す塗装の有無によって薄れてしまう可能性があるが、防塵性があるなど、塗装の必要のない用途では考慮する要素として認識される。匂いに関しては、今回のサンプルに特徴的なものがなかった、正確にはタバコの葉が非常に独特な匂いを放っていたが2ヶ月ほどで消えたため、特段議論にあがることはなかった。

持続可能性に関わる素材の性質についても、まとめる。これも、開発した素材は、強度や耐久性などの物理的特性の他にどのような価値を持つか？という問いに対応している。インタビューで、「原料の供給」について2人の建築家が挙げたように、廃棄物の排出量は、特に素材を開発した初期段階で、価格と密接に関わる要素である。ただ単に、2023年時点で廃棄物として話題になっているだけでなく「長期的かつグローバル」な視点で、廃棄量が減らず、安定的に供給（廃棄）されるものが、コンクリートに活用する廃棄として好ましいとされる。その点、タバコの吸い殻は喫煙者が国内で減少していく見込みがあることから、不安定な供給が予測された。廃棄量が多いものの中でも、リサイクル率が低く、埋め立てせざるを得ないものは、課題背景が強いものとして、コンクリート素材にリサイク

ルされる価値が高まると考えられる。また「地産地消」という言葉があったように、材料が採れる場所（有機廃棄物の場合は排出される場所）が近いものはその地域の気候に馴染む素材である可能性があるほか、運送の経済的コストや環境負荷が低いものは付加価値として捉えられる。また、廃棄物の回収コストについては、特にカイロなど一般廃棄されるものの回収コストが高く、価格の高騰が懸念される要素になる。廃棄物の排出量（供給量）、廃棄物の産地（地域性）、廃棄物に関わる課題背景、廃棄物の運送コスト、廃棄物の回収コストを複合的に見ると、材料の原価が決まる。

そのほか、再リサイクルの可否は「混ぜればゴミ」という言葉があったように、持続可能性にとって重要な要素である。一度廃棄物としてセメントと混ぜ合わせた素材は、リサイクルで素材を分けることができず、粉碎してリサイクルするとしても耐久性が低下してしまうことが考えられる。そのため、建材としての寿命を迎えた後に、プロダクトなどスケールが小さく高い耐久性が求められない用途に再び作り直す可能性などを示すことも、建材としての価値となるだろう。またそもそも、有機廃棄物は肥料化したり食品に加工することで土に還すことができるものであり、長年生分解性されないコンクリート素材にリサイクルすることで、むしろ循環系を壊してしまう可能性がある。粉碎して乾燥させた卵殻や牡蠣殻は、適量を混ぜることで素材の物理的性質を強化して長寿命化という点で付加価値になるが、ピーナッツや人毛などの効果については今後機能面の強化を詳しく調べる必要がある。

塗装の有無も、議論の余地がある要素だ。インタビューであったように「ユーザー視点で考えた場合の強度やメンテナンスのしやすさ」では、「経年劣化」に対する不安や「地域」によって異なる気候（湿度の高さや寒さ）に対応するため、表面にコーティングをするなどして長寿命化を促す場合がある。しかし、それらの塗装によるCO₂の排出量が課題視されたり、塗装によってむしろリサイクルが難しくなるなどのデメリットはある。最後に、カーボンキャプチャーに関しては、卵殻が大きく期待できる。LCA評価も、素材のライフサイクルにおける環境への影響をはかる上で非常に重要である。既に第1章で述べたように、高炉セメントB種は、ポルトランドセメントと比べてCO₂排出量が少ない。インベントリ分析で

製品の製造工程を廃棄に至るまでのCO₂排出量の原単位を示した論文 [7] によると、ポルトランドセメントは「757.9kg-CO₂/単位量」に対し、高炉セメントB種は「458.7kg-CO₂/単位量」と大幅に数値が減少する。このように、高炉スラグを活用することによるCO₂排出量の減少は特定できたが、リサイクル素材についてのデータベースには今回アクセスできなかった。環境省が身近な素材に関する信頼できるデータを公開することで、素材開発における環境負荷を定量的に評価でき、持続可能性を評価する開発の助けになるだろう。

5.2. 考察と展望

上記のインタビュー内であがった特性以外に、消費者がリサイクル素材に対して抱く印象も素材開発と訴求において重要な要素だと考えられる。展示会に出展した際に、髪の毛に対して「怖い」「気持ち悪い」といった反応が多くあったほか、タバコは「身体に悪そう」、カイロには「温かみがある」、卵殻には「新しい生命を想起させる」という声があがった。上記に挙げた事例のように、素材が人びとに与える印象は潜在的に消費者に認識されており、共通認識として浮かびあがるリサイクル素材にかかわる印象は製品開発に活かすことができるだろう。例えば、カイロを誰かから誰かへ手渡すシーンの「温かみ」を連想させるので、人と人を繋ぐ空間の壁材に使用したり、既存の建物を壊して生まれ変わる建物の一部に卵殻を使用するなどが考えられる。その他、地域性などの項目とこの情緒的価値をかけ合わせ、ジーンズ・デニムの名産地である岡山県のジーンズ工場が出た廃材を活用し「地元のつながり」を連想させる建築物の内装に活用することも考えられる。それらを活用し耐久年数を終えた後に、第3章に示した植木鉢のような製品として再活用することができれば、持続可能性とも結びつくだろう。

最後に、プロジェクトの構成について振り返りたい。本研究は、素材メーカーや建材メーカーと初期から協働して持続可能な建材のコンセプトを決め、最後の評価段階で建築家に実用可能性や持続可能性についての意見を集めた。今後、新たな素材開発をする場合は、建築家の意見をコンセプトフェーズの初期段階から反映させていくことことで、より多くのステークホルダーの意見を反映するもの

づくりができると感じる。建築家は、建築物に関わる人びとの間に立ち、工務店の課題、メーカーの課題、住まう人々の求める条件、法的な条件、施主の求める予算やスケジュールなどの現実的な条件についての知見がある。この知見は、素材の開発のコンセプトフェーズにおいて、実用的かつ持続可能な素材を作っていく上で非常に重要である。日頃の業務もある中で時間の制約もあるが、建築家の求める素材を共同で開発していくアプローチが、イノベーションを生むための素材開発に求められていると感じている。

謝 辞

本論文の作成にあたり、多くの方々にご指導ご鞭撻を賜りました。

指導教官の慶應義塾大学メディアデザイン研究科 マッシュ ウォルドマン教授には多くのご指導を賜りました。ここに深謝の意を表します。同学科専任講師 山岡 潤一先生には、本論文の作成にあたり、副査として適切なご助言を賜りました。感謝申し上げます。株式会社クラレ横山氏と今川氏、並びに富士スレート株式会社馬淵様には、多くのデータや助言を頂きました。ご協力に、厚く御礼申し上げます。インタビューにご協力いただいた垣副正樹様、カズ・T・ヨネダ様、あらいかおり様、中村薫様、くぼたけいこ様には、適切かつ思慮深いご助言をいただきました。実務家として活躍されている皆さまの意見は、非常に貴重なものでした。お忙しい中、本研究にご協力いただき、感謝申し上げます。Samcara プロジェクトの皆さんには、本研究の遂行にあたり多大なご助言、ご協力頂きました。リサーチや素材制作、展示会準備など、研究に関わる多くの機会でご支えていただきました。ここに誠意の意を表します。最後に、この2年半で多くの時間を共に過ごしたGIDプログラムの皆さん、学部時代からの友人の皆さん、両親に心から感謝の意を示します。本当にありがとうございました。

参 考 文 献

- [1] Mahfooz Soomro, Vivian W.Y. Tam, and Ana Catarina Jorge Evangelista. Production of cement and its environmental impact. *Woodhead Publishing*, pp. 11–46, 2003.
- [2] Sabbie Miller, Arpad Horvath, and P. Monteiro. Impacts of booming concrete production on water resources worldwide. *Nature Sustainability*, Vol. 1, , 01 2018. doi:10.1038/s41893-017-0009-5.
- [3] Vince Beiser. 『砂と人類: いかにして砂が文明を変容させたか』. 草思社, 2020. 藤崎 百合 訳.
- [4] 能勢美季. 『生コン 値上げ表明相次ぐ』, 2019年11月26日朝刊. <https://www.nikkei.com/article/DGKKZO52504110S9A121C1QM8000/>.
- [5] IEA. Technology roadmap - low-carbon transition in the cement industry, 2018. <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry>(Accessed on 20/06/2023).
- [6] IEA. Cement, 2022. <https://www.iea.org/reports/cement>(Accessed on 20/06/2022).
- [7] 河合研至. コンクリートの環境負荷評価(2) コンクリートに関わる環境負荷の評価方法. 日本コンクリート工学会, Vol. 50, No. 7, pp. 635–639, 2012.
- [8] 鉄鋼スラグ協会. 鉄鋼スラグ統計年報(2021年度版), 2022. <https://www.slg.jp/pdf/FS-182.pdf>(Accessed on 20/06/2023).

- [9] 日本工業規格. 日本工業規格 jis r 5211 : 2009 高炉セメント, 2019. <https://kikakurui.com/r5/R5211-2019-01.html>(Accessed on 20/06/2023).
- [10] 福島県技術管理グループ. 高炉セメントコンクリートの特性と施工に関する留意点, 2007. https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/life/21284_23436_misc.pdf(Accessed on 20/06/2023).
- [11] 環境省. 一般廃棄物の排出及び処理状況等（令和元年度）について, 2021. <https://www.env.go.jp/press/109290.html>(Accessed on 20/06/2023).
- [12] 環境省環境再生・資源循環局廃棄物規制課. 産業廃棄物の排出及び処理状況（令和3年度速報値）, 2022. <https://www.env.go.jp/content/000123320.pdf>(Accessed on 20/06/2023).
- [13] 水野大二郎, 津田和俊. 『サーキュラーデザイン: 持続可能な社会をつくる製品・サービス・ビジネス』. 学芸出版社, 2022.
- [14] Alastair T.M. Marsh, Anne P.M. Velenturf, and Susan A. Bernal. Circular economy strategies for concrete: implementation and integration. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 362, p. 132486, 2022. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132486>.
- [15] P. Purnell and A. Dunster. 20 - recycling of concrete. *In Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Management, Recycling and Reuse of Waste Composites*, pp. 569–591, 2010.
- [16] Senthil Kumar Kaliyavaradhan, Tung-Chai Ling, and Kim Hung Mo. Valorization of waste powders from cement-concrete life cycle: A pathway to circular future. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 268, , 2020.
- [17] M.S. Guimaraes and J.R. Valdes et.al. Aggregate production: Fines generation during rock crushing. *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 81, pp. 237–247, 2007.

- [18] Ardavan Yazdanbakhsh and Lawrence C. Bank et.al. Concrete with discrete slender elements from mechanically recycled wind turbine blades. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 128, pp. 11–21, 2018.
- [19] Nabajyoti Saikia and Jorge de Brito. Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. *Construction and Building Materials*, Vol. 34, pp. 385–401, 2012.
- [20] Xuemiao Li, Tung-Chai Ling, and Kim Hung Mo. Functions and impacts of plastic/rubber wastes as eco-friendly aggregate in concrete – a review. *Construction and Building Materials*, Vol. 240, pp. 385–401, 2020.
- [21] Sungwun Her and Taehoon Park et.al. Synthesis and characterization of cement clinker using recycled pulverized oyster and scallop shell as limestone substitutes. *Cleaner Production*, Vol. 278, , 2021.
- [22] Othman and Nor Hazurina et.al. Cockle shell ash replacement for cement and filler in concrete. *Malaysian Journal of Civil Engineering*, Vol. 25.2, pp. 201–211, 2013.
- [23] Soltanzadeh and Fatemeh et.al. Development and characterization of blended cements containing seashell powder. *Construction and Building Materials*, Vol. 161, pp. 292–304, 2018.
- [24] Wei and Chong Beng et.al. Properties of mortar with fine eggshell powder as partial cement replacement. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 46, pp. 1574–1581, 2021.
- [25] Huang and Qian et.al. Modification of water absorption and pore structure of high-volume fly ash cement pastes by incorporating nanosilica. *Journal of Building Engineering*, Vol. 33, , 2021.
- [26] Sun and Huaqiang et.al. Optimization of gypsum and slag contents in blended cement containing slag. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 112,

- , 2020.
- [27] Muthusamy and Khairunisa et.al. Properties of high strength palm oil clinker lightweight concrete containing palm oil fuel ash in tropical climate. *Construction and Building Materials*, Vol. 199, pp. 163–177, 2019.
- [28] Mohamad and Nabilla et.al. Environmental impact of cement production and solutions: A review. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 48, pp. 741–746, 2022.
- [29] Li and Le et.al. Waste ceramic powder as a pozzolanic supplementary filler of cement for developing sustainable building materials. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 259, , 2020.
- [30] 皆川佳唯, 酒井雄也, 勝木太. コンクリートがれきと木材を原料とする建設材料の開発. *生産研究*, Vol. 72, 2号, pp. 213–217, 2020.
- [31] Jin and Ruoyu et.al. An empirical study of perceptions towards construction and demolition waste recycling and reuse in china. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 126, pp. 86–98, 2017.
- [32] Solido typef coffee リサイクル内装ボード. https://www.knew.co.jp/shouhin/solido/typeF_coffee/(Accessed on 20/06/2023).
- [33] Paneco 廃棄衣料繊維を原料としたサステナブルなボード. <https://paneco.tokyo>(Accessed on 20/06/2023).
- [34] fabula ゴミから感動をつくる. <https://fabulajp.com>(Accessed on 20/06/2023).
- [35] 日本産業規格. R 5211 : 2009 高炉セメント, 2009. <https://kikakurui.com/r5/R5211-2019-01.html>(Accessed on 20/06/2023).
- [36] 東京都環境局 資源循環推進部産業廃棄物対策課. 『産業廃棄物の種類』, 2018. https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/resource/industrial_

- waste/about_industrial/about_01.html#cmshaikibutu(Accessed on 20/06/2023).
- [37] 東北発電工業. 石炭灰関連商品(東北フライアッシュ, クリンカアッシュ), 2018. <http://www.tohatu.co.jp/>(Accessed on 20/06/2022).
- [38] 一般社団法人GOMITAIJI. “改あらたな価値”を“新たな価値”に. <https://www.gomitaiji.or.jp>(Accessed on 20/06/2023).
- [39] Ankush Gupta. Human hair “waste” and its utilization: Gaps and possibilities. *Journal of Waste Management*, Vol. 2014, p. 17, 2014.
- [40] 日テレ NEWS. モーリシャス沖 油回収で「髪の毛」に注目, 2020. <https://news.ntv.co.jp/category/international/701138>(Accessed on 20/06/2023).
- [41] 光成壮. 卵の殻“廃棄物”がよみがえる?, 2022. https://www3.nhk.or.jp/news/contents/ohabiz/articles/2022_0330.html(Accessed on 20/06/2023).
- [42] キューピー株式会社. 卵黄以外はどうなるの? <https://www.kewpie.co.jp/mayonnaise/tips/efficient-use.html>(Accessed on 20/06/2023).
- [43] 国土交通省. 港湾・空港等整備におけるリサイクル技術指針のとりまとめ, 2004. <https://www.mlit.go.jp/kowan/recycle/2/13.pdf>(Accessed on 20/06/2023).
- [44] 環境省環境再生・資源循環局. 漁業系廃棄物処理ガイドライン(改訂), 2020. <https://www.env.go.jp/content/900535373.pdf>(Accessed on 20/06/2023).
- [45] ソニー株式会社. 余剰バイオマスを利用したサステナブルな素材, 2020. <https://www.sony.com/ja/SonyInfo/triporous/sustainability.html>(Accessed on 20/06/2023).

- [46] 森下佳代子, 須藤綾華, 羽鳥哲矢, 宮下貴子, 川上勝弥. 粉殻灰のコンクリート混和材としての利用に関する検討. 小山工業高等専門学校研究紀要, Vol. 2017, No. 50, pp. 7–10, 2019.
- [47] 熊谷誠治. もみ殻の最先端リサイクル技術. <https://www.akita-u.ac.jp/honbu/publicinfo/pdf/kenkyu/20200226.pdf> (Accessed on 20/06/2023).
- [48] 射水市. 射水市バイオマス産業都市構想, 2014. <https://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/pdf/imizu.pdf> (Accessed on 20/06/2023).
- [49] 新潟市. 新潟市田園資源活用推進方針, 2016. https://www.city.niigata.lg.jp/kurashi/kankyo/hozen/saiseikanou/d-shigen/denensigen_houshin.files/denenshigennkatsuyousuishinnhoushinn.pdf (Accessed on 20/06/2023).
- [50] 江戸川区. 感熱紙のリサイクルについて. https://www.city.edogawa.tokyo.jp/e004/kuseijoho/kohokocho/goiken/iken_kaitou/kurashi/12.html (Accessed on 20/06/2023).
- [51] 環境省. 令和2年版 環境白書 循環型社会白書/生物多様性白書. <https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/r02/index.html> (Accessed on 20/06/2023).
- [52] Novotny TE, Lum K, Smith E, Wang V, and Barnes R. Cigarettes butts and the case for an environmental policy on hazardous cigarette waste. *Int J Environ Res Public Health*, 2009.
- [53] World Health Organization. Tobacco and its environmental impact: an overview, 2017. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241512497> (Accessed on 20/06/2023).
- [54] T.E. Novotny and E Slaughter. Tobacco product waste: An environmental approach to reduce tobacco consumption. *Curr Envir Health Rpt*, Vol. 1, p. 208–216, 2014.

- [55] 日本産業規格. JIS A 1408 : 2017 建築用ボード類の曲げ及び衝撃試験方法, 2017. <https://kikakurui.com/a1/A1408-2017-01.html>(Accessed on 20/06/2023).
- [56] 日本産業規格. JIS A 5430 : 2018 繊維強化セメント板, 2017. <https://kikakurui.com/a5/A5430-2018-01.html>(Accessed on 20/06/2023).