

プロトタイプ製作を通じた資源循環型建築に関する実践的研究

オープンイノベーションによる技術開発と評価手法の構築

羽角 華奈子^{*1}・相馬 智明^{*2}・佐藤 大樹^{*1}・井坂 匠吾^{*3}・御所園 武^{*4}・古市 理^{*3}・
大久保 英也^{*5}・田中 浩也^{*6}

Keywords : circular economy, upcycle architecture, circularity, 5R, circular design rate

サーキュラーエコノミー, アップサイクル建築, 資源循環性, 5R, サーキュラー設計率

1. はじめに

建築や構造物の建設には多くの資源が投入される。建設業全体では、国内資源の3割以上が使用されており、多くの割合を占めている^①。近年、企業への資源循環に対する要求が高まる中、建設業も積極的に資源循環の実現へ向けて対策し、貢献していく必要がある。

資源循環の実現した社会を考えると、資源の循環は需要と供給がバランスし、必要なタイミングで必要なものが供給されることが求められる。そのためには、需給を調整する役割をもつ一時的なストック、調整役が必要となり、これまで倉庫や中間処理場で保管される状態であったが、近年、消費財よりも使用年数の長い建築がこの調整役の役割を担う「資源バンク^②」の考え方も始めている。建築で使用される素材は多種多様であり、またその量も莫大となるため、地域の資源循環へのインパクトは大きく、建築の資源循環性能の向上は、サーキュラーエコノミーの実現に向けた貢献が大きいと考えられる。

本研究では、資源循環性の向上につながる建築の要件を通常の資源循環において考慮される3R（Reduce（廃棄物の削減）、Reuse（再度使用する）、Recycle（使えなくなったものを再度資源として使用する））に2つのR（Resilience（レジリエンス）とRemountability（再生可能性））の視点を加えた5Rで整理し、それに配慮した実験用のプロトタイプの設計・施工を通じて実践的な技術課題の検証を行った。特に、資源循環性向上のための技術開発と、資源循環に配慮した建築計画を設計プロセスに実装していくため、資源循環性評価手法の開発およびプロトタイプを対象とした評価

の試行について報告する。なお、これらの検討は、メカーや大学等の様々なステークホルダーと共に、オープンイノベーションの手法を取り入れて行った。

2. 資源循環性の向上に寄与する建築の要件整理

2.1 先行研究の調査

建築の資源循環性の向上における先行事例を調査した。将来の再利用とリサイクル率を高めるため、解体が容易で再生可能な単一材料に分解できる「Design for Disassembly（DfD）」に関する研究が進んでいる。Crowther^③は、DfDのガイドラインとして27の設計原則を提案している。また、Cheshire^④は、「建築を耐用年数経過後に貴重な材料や部品を回収・再利用できるようにすることで、永続的な「遺産」となるように設計することが可能となる」とし、5つの設計原則として、「積層造形」「廃棄物排除設計」「適応性設計」「分解設計」「材料選択」を挙げている。

政策面でも、EUが「サーキュラーエコノミーに適した建物の設計」を提唱し^⑤、建設時から再生材利用や解体容易性に配慮した建設を行い、建物所有者や建材提供者を含めたあらゆるステークホルダーとのライフサイクル全体での資源循環配慮による財務評価等を求めている^⑥。

2.2 要件の整理

近年のDfDの研究動向や政策動向に加え、新たな視点として、地域の資源を循環させる「資源バンク」としての機能や、可能な限り輸送コストを削減し、地域内で可能な限り資源を循環させる視点を追加して考え

*1 技術センター イノベーション戦略部 技術開発戦略室

*2 技術センター 都市基盤技術研究部 木・鋼研究室

*3 設計本部 先端デザイン部

*4 設計本部 構造設計第二部

*5 クリーンエネルギー・環境事業推進本部 資源循環技術部

*6 慶應SFC研究所

表-1 資源循環に寄与する建築の要件
Table 1 Requirements for buildings that contribute to resource circulation

大項目	小項目
Reduce 減容化	建築関連材料（構造体、内外装等）の減容化、設備材料の減容化・台数削減
Reuse リユース	インフローのリユース（既存躯体利用、内外装、設備、残土リユース）、アウトフローのリユース（副産物、廃棄物のリユース）
Recycle リサイクル	インフローのリサイクル（リサイクル素材採用）、アウトフローのリサイクル（副産物、廃棄物の分別、リサイクル）
Resilience レジリエンス	構造体、内外装、設備の長寿命化、設備の更新性、建材メンテナンス性、地域性素材利用
Remountability 再生可能性	構造体、内外装の取り外しやすさ、解体しやすい接合方法、構造体、内外装等の規格化

る。これらを網羅的に考慮し、資源循環に寄与する建築の要件を 3R に加え、Resilience（レジリエンス）と Remountability（再生可能性）を追加した 5R に整理した。それぞれの具体的な項目を表-1 に示す。Resilience には、Longevity（長寿命化）、Renewability（更新可能性）、Regionality（地域性）を、Remountability には Detachability（分解可能性）、Module（規格化）を含むものとした。

これらの 5R の視点を建築の計画段階から配慮することで建築の資源循環性が向上すると考えられる。このような要件項目をまとめることで、計画段階での配慮事項のチェックリストとしての利用が期待される。さらに、建築分野で使用されている CASBEE⁷⁾ のようにチェックリストから配慮項目の達成度を点数化することで、その建築の資源循環性能の価値を明確化できると考えた。

3. 評価手法の開発

3.1 既往の評価指標

欧州では、建築の資源循環性評価手法の導入が始まられており、その一つにエレンマッカーサー財団の MCI(Material Circularity Indicator)が挙げられる。この手法では、資源循環・製品寿命・製品の機能全てを考慮して 1 つの式にまとめている。さらに、Madaster 社は、この指標を建築物専用に発展させて使用しており、今回は、この Madaster 社のシステム⁸⁾を用いた評価についても試行した。Madaster の資源循環性指標の算出では、インフロー（資源の調達）における再生材使用率とアウトフロー（解体後の資源循環）における素材の再生可能性やエンボディドカーボンのほかに、建築の改修しやすさや解体後の資材の再生可能性等について

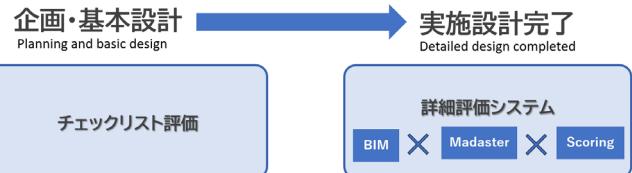


図-1 2段階の資源循環性評価のフローイメージ
Fig.1 Two-stage circularity assessment flow

評価する（以後、MCI（Madaster Circularity Index）と記述する）。BIM データに材料データベースを紐づけ、建築のレイヤーごとに指標を算出している。

しかし、国内の建築プロジェクトにおいては、初期計画段階において BIM データを作成することはないため、MCI では、プロジェクト上流において資源循環性を評価し、より高い資源循環性を達成するための取り組みを検討することが難しいという課題がある。

3.2 評価指標の検討

プロジェクト上流の基本設計段階から資源循環への配慮を検討できるように、MCI のような BIM データを必要とする指標とは別に、前述した 5R の各項目に対する達成度合いを積み上げ評価する方法で、建築の資源循環への配慮に関する達成度の評価を試みた。各小項目は、表-1 の小項目をさらにインフローとアウトフローへ振り分け、両面の配慮をそれぞれ別に評価できるものとした。

項目ごとに建築設計者が考え得る最大限の取り組みがなされた場合を満点、全く配慮しなかった場合を 0 点とし、点数の積み上げで建物全体の評価とした。全項目が満点となった場合を 100% とし、インフロー／アウトフローそれぞれで算出し、この評価指標を「セキュラードesign rate」と呼ぶこととし、資源循環への配慮の達成度とした。

プロジェクト上流において 5R のチェックリスト方式での評価「セキュラードesign rate」から資源循環性をより高める努力をし、さらに詳細設計段階に BIM データが完成した段階で、MCI を用いてより詳細に評価するという 2 段階の評価を取り入れることで（図-1）、より資源循環への取り組みを促進できることが期待される。開発した評価手法を今回製作したプロトタイプへ適用した。なお、評価手法の検討においては、コンソーシアムの枠組みを活用し、大学、行政、建材メーカー、素材メーカー等の様々なステークホルダーの意見を踏まえながら整理した。

4. 資源循環建築プロトタイプの製作



図-2 UC の概要
Fig.2 Overview of Upcycle Cabin

表-2 UC における主な 5R への配慮事項
Table 2 Main 5R considerations in the UC

項目	内容
Reduce	木とプラスチックを使用することによる材料の削減、古材断面をそのまま使用することによる廃棄物削減
Reuse	古材の使用、リユースプラスチックの使用
Recycle	リサイクル材の使用
Resilience	地域材の使用、接合部へのアクセス性
Remountability	分解可能なフレームと着脱可能なパネル、モジュール化

表-3 UC におけるリサイクル・リユース材の活用
Table 3 List of recycled and reused materials used in the UC

部材	リユース・リサイクル材料
柱、梁	社寺建築で使用されていた古材
構造補強壁	漂着プラスチック
アルミフレーム	リサイクルアルミニウム
おむつ再生パネル	使用済み紙おむつ
木質バイオマス充填複合パネル	木材製材端材、リサイクルPP
アクリルパネル	飛沫防止用アクリル
屋上緑化用屋根パネル	詰め替えパック、リサイクルPP
明り取りパネル	詰め替えパック、リサイクルPP
床パネル	竹・植木剪定材

4.1 プロトタイプの設計

プロトタイプでは、5R の観点から以下のこととに配慮して設計を行った。なお、本研究で製作した資源循環建築プロトタイプを「アップサイクルキャビン」と名付け、以後 UC と表記する。図-2 に UC の概要および表-2 に UC における主な 5R への配慮事項を示す。今回は実験用工作物であることから、牽引用の車体の上に工作物を製作することとした。以下に資源循環における配慮事項の詳細を述べる。

・ インフローのリユース、リサイクルへの配慮

壁のパネルに、使用済みおむつ、漂着プラスチック、リサイクルポリプロピレン (PP)、詰め替えパックのリサイクル素材等を使用し、インフローの資源循環性能の向上を図った。さらに、リサイクル材の利用範囲の拡大のため、漂着プラスチック

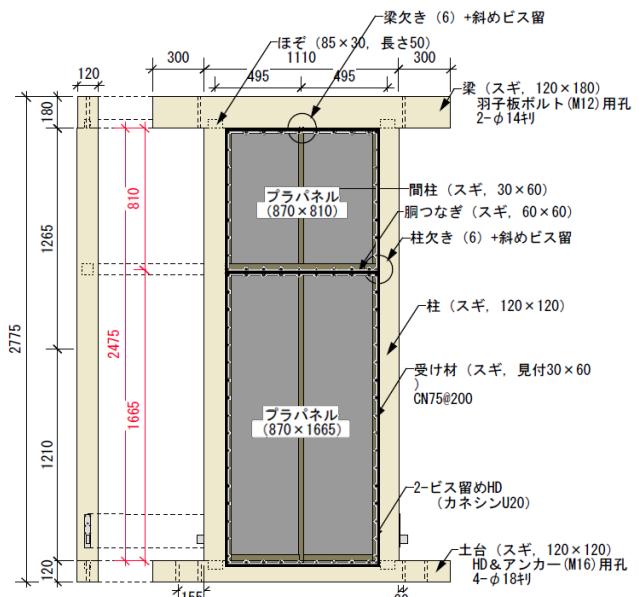


図-3 耐力壁実験体
Fig.3 Experimental body of load-bearing wall test

を耐力壁として活用した。詳細を表-3 に示す。

・ 地域性への配慮

地産地消の資源循環を目指し、地域の社寺建築で使用されていた古材の他、地域で回収された植木剪定材や製品プラスチックとして回収された PP 等を活用した。

・ 分解可能な構造

400mm × 400mm にモジュール化した格子状のアルミフレームにリサイクル材によるパネルをはめこみ壁と屋根とした (図-2)。パネルは壁、屋根共に同じサイズで規格化し、将来の再利用に向け、複数の素材を混合せず 1 枚ずつ着脱可能とした。パネルは工具等不要で着脱可能であり、機能やデザインなど、内部空間を使用する際の用途に応じて、その場で取り換えることも可能な構造とした。

4.2 再生材を使用するための技術開発

4.2.1 漂着プラスチックを使用した耐力壁

再生プラスチックを耐震要素とするため、同素材を熱圧成型して面状部材を製造し、その面材を真壁として納めた木造軸組耐力壁を構成した。耐力壁の構造性能を明らかにすること目的として、真壁式木造耐力壁の面内せん断試験を実施した。

プラスチックパネルに筋交い効果による圧縮力を負担させるようにするため、真壁式の耐力壁を設計・製作した。耐力壁の詳細を図-3 に示す。プラスチック面材の最大製造サイズは約 1930mm × 915mm 版であることから、大小 2 枚を 1 組として張ることとした。試験



図-4 軸組をずらして留めた接合方式

Fig.4 A joint method in which the frame is fixed by shifting

体数は2体とした。試験方法は柱脚固定式とし、試験体上端部を水平に正負交番繰返し加力するものとした。

その結果、終局状態としては、プラスチックパネルが圧縮筋交いとして圧縮力を負担しながら面外にはらみ出した。合板壁と比して粘り強く $1/10\text{rad}$ まで変形しても大きな耐力低下は認められなかった。またプラスチック面材を留付けるビスのパンチングアウトも生じなかつた。

得られた壁倍率評価に関する特性値は、2体の試験結果で大きな差ではなく、平均で3.9倍の壁倍率が得られた。この結果はリサイクルプラスチックを耐力壁として使用できる可能性があることを示唆する。ただし、リサイクルプラスチックの耐久性等については評価していないため、より詳細な検討が必要である。今回のUCはプロトタイプであり短期的な使用となるため、耐久性についての確認はしていないが、実験結果の壁倍率を考慮に入れ、設計を行つた。

4.2.2 資源循環性を向上する接合部

木質軸組接合部において、汎用性の高い着脱性と再装着性を具備しようとする場合、継手・仕口にできるだけ木材加工を加えない方法が必要である。今回は図-4に示すような、軸部材（梁、桁、柱）を各部材の厚さ分だけずらした形で接合する方式を基本とした。軸部材相互のせん断力の伝達は両面に尖部を有する金物（以下、ボスギヤングネイル/BGNと書く）で行うものとした。軸部材相互の離留めはBGNを貫通して併設されたビスに期待することとし、ボルト孔等の木材加工が生じないように配慮した。

BGNは厚さ $t=0.8, 1.2\text{mm}$ で 90mm 角の1枚の鋼板を部分的に折曲げて複数の尖部を出すように加工したもので、それらの尖部を鋼板の表裏両面に同数加工した

ものである。尖部は折曲げ方向によってせん断力の伝達性能が異なるため、それら尖部の折曲げ方向を1方向としたものと2方向としたものを製作した。

尖部の数はいずれも両面で48個になるようにした。尖部の長さは約 3.5mm であり、2方向のものでは尖部形状に「返し」を作ったものと無いものを用意した。返しはBGNを木材に打ち込む際に、打込みの反動で抜けにくいという効果がある。BGNの中央には $\phi 20\text{mm}$ の丸孔が空けられており、離留め用のビスを部材相互と金物を貫通するように留めることができるようになっている。

BGNを用い、接合部分の試験体を制作してせん断試験を行い、性能を確認した。BGNの鋼板厚さが 0.8mm から 1.2mm になると剛性は約10%，耐力は約40%向上した。一方、尖部の返しの有無によって大きな差は認められなかつた。ビスの有無を比較すると、ビスが増える分の耐力向上が認められたが、剛性に対してはあまり大きな影響を与えたかった。

以上のように、木材加工不要なBGNを開発、せん断性能を確認し、その実験結果を用いてUCの設計を行つた。なお、今回は、UCは試験的な工作物であるため、壁面は閉鎖空間を成していない。今後、実際に木造建築に活用するには、柱、梁と壁の納まりについて、検討が必要である。

4.3 プロトタイプの施工

本プロトタイプの施工は、大成建設技術センターにおいて実施した。施工期間は約4日間を要した。今回は、分解性を高めるため、また、地域資源を活用しやすくするために、組み立て・解体に特殊な工具を不要となる接合方法を用いた。具体的には、木材はビスでの留め付け、木材とアルミフレームはプレート型金具を用い、木材-金具はビスによる固定、金具とアルミフレームはボルト留めとした。特に、アルミフレームはRemountabilityを向上するため、容易に着脱できるように接合した。そのため、施工期間のうち2日間は現地合わせでの土台や木材、耐力壁の加工に要し、組み立てについては、柱梁の組み立てに1日間、耐力壁の設置に0.5日間、屋根、壁のアルミフレームの設置に0.5日間を要した。できるだけ加工を減らすために、現地合わせの加工に多くの時間を要したが、組み立て自体は短時間で完了することができた。開発したBGNを使用した接合についても、スムーズに行うことができた。ただし、今回用いた古材は断面が $150\text{mm} \times 135\text{mm}$ であり、現在流通している木材より太く、1本当たりの重量が重かったため、施工手間がかかった。特に耐力壁の

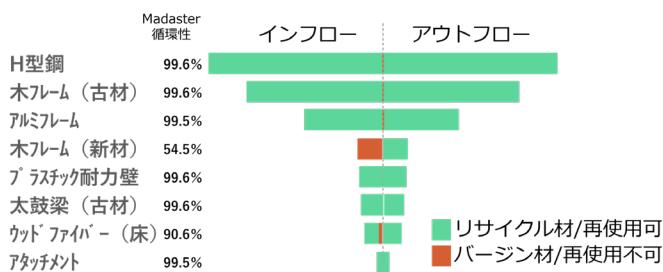


図-5 部材ごとの MCI 評価結果

Fig.5 Madaster circularity index results for each component



図-6 部材ごとの Detachability 評価結果

Fig.6 Detachability evaluation results for each component

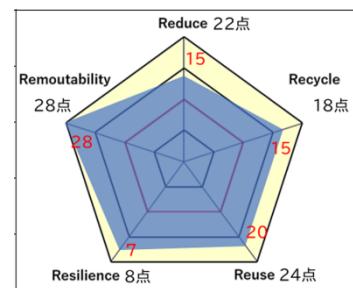
フレームや梁の設置においては、安全確保のためクレンを使用した。

さらに、組み立て後、屋根および壁のアルミフレームについて設計時に配慮した解体性を検証した。屋根は金具とボルト留めであったため、高所作業車を用いて2名で作業すれば、約40分で作業を完了することができた。壁についても、2名で上下を支持した上でボルトを外すだけで取り外し可能としたためスムーズに作業することができ、30分程度で解体することができた。以上より、ビス留めと比較して木材を傷めることなく、取り外しおよび再組立てを可能にすることができ、設計時の配慮から解体性を向上できることを確認することができた。

5. 資源循環性の評価指標の試行

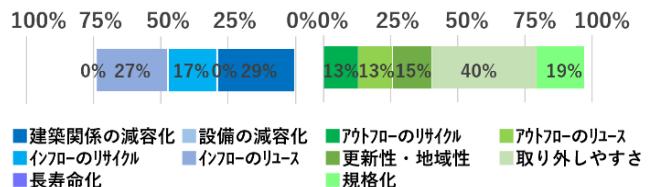
5.1 BIM データを用いた Madaster による評価

図-5に部材ごとの質量とMCIによる評価結果を示す。実験用工作物であるためにそのベースとして牽引車を用いたことから車体の鋼材が最も大きい質量を占めているが、UC本体の評価としては、リサイクル材/リユース材の積極利用によるインフローへの配慮と、解体可能な設計によるアウトフローへの配慮がなされていることがわかる。単一素材へと分解可能で、次の用途へリサイクルしやすい配慮をしていることは、図-6のDetachabilityの結果にも表れている。Detachabilityについては、アルミフレームに壁パネルを設置する構成としたため、skin(外装部)については、非常に高評価



(1) 5R の評価結果

インフロー/資源削減 アウトフロー/資源供給



(2) インフロー/アウトフローの評価結果

図-7 チェックリストによるサーキュラー設計率

Fig.7 Circular design rate evaluated from the checklist

表-4 MCI 評価とチェックリストによるサーキュラー設計率の比較

Table 4 Comparison of Madaster circularity index and circular design rates calculated from a checklist

項目	詳細評価	簡易評価
指標	Madaster 資源循環率	サーキュラー設計率
インフローの資源循環性	94%	73%
アウトフローの資源循環性	98%	98%
トータルの資源循環性	97%	85%

となった。一方、structure(構造部)については、接合は金具やビス留めを使用しており、結果は63%となつた。とはいえ、この結果も十分高評価と言える。

5.2 チェックリストを用いたサーキュラー設計率

5Rの各項目に対する達成度合いを積み上げ評価する方法で、UCの資源循環への配慮の達成度をチェックリストを用いた評価手法を試みた。各小項目は、表-1のようにインフローまたはアウトフローへ振り分けることでMCI評価に倣った枠組みとし、計画の進展とともに詳細評価へシームレスにつながるものとした。

項目ごとの点数配分は、現時点では暫定値としており、今後多くの建築を評価する中で、MCIの詳細な評価結果との比較などを通じて調整を図っていく必要がある。

図-7に簡易評価によるサーキュラー設計率の結果を示す。図-7(1)は5Rの項目ごとの評価である。5Rはその重要度から項目ごとに総得点を変更しており、UCは実験用工作物であることから長寿命性は評価対象外と考えResilienceの配点を低くしている。図-7(2)はインフ

ロー／アウトフローごとの評価である。UCは設備機器がないために設備関連の減容化も評価対象になっていること、および長寿命化も評価対象になっていることからインフローの評価値が低くなっているものの、その他の項目では高い配慮がなされていることが高評価につながっており、開発した評価手法を用いることで、資源循環への配慮が可視化できることが確認できた。

表-4に、詳細評価と簡易評価の結果の比較を示す。指標や計算方法が異なることから、両者の絶対値の比較はできないものの、基本計画段階で取り組んだ設計上の工夫が実施設計段階での詳細な評価に接続される必要があるとの認識から本結果を示す。インフローにおける設備や長寿命への配慮を評価対象外にしていることから、現時点では評価値にも大きく差が生じている。今後は、総合的な評価値としてこれらの数値に相関性を持たせた評価していく必要があると考えられる。

6.まとめ

本研究では、オープンイノベーションの手法を用い、様々なステークホルダーの意見を踏まえて資源循環に配慮した建築の要件を整理し、実際にプロトタイプの設計・施工を通じ、得られた知見をまとめた。

① 要件の整理

資源循環に配慮した建築の要件を 5R（Reduce, Reuse, Recycle, Resilience, Remountability）にまとめた。特に、日本は地震多発国であり、また、輸送を考えた場合、地域内での資源循環性を向上させる必要があることから Resilience を追加し、さらに建築を解体しやすくすることでリユースし易くするため Remountability の視点を追加した。

② 評価手法の開発

建築の資源循環性の 2 段階の評価手法を開発した。プロジェクトの上流の計画・基本設計段階においては、チェックリスト形式の評価手法を用い、詳細設計の段階においては、BIM データを用いた MCI 評価手法を用いる。特に、計画・基本段階において評価できることから、資源循環へ配慮した建築の普及に寄与することが期待される。

③ プロトタイプの設計・施工

①の要件を考慮したプロトタイプを製作した。製作にあたり、再生材である漂着プラスチック板について建材としての使用可能性を確認するため、面内せん断試験を実施し、耐力壁としての構造性

能を確認した。長期的な使用については、素材の劣化などについて、より詳細に検証する必要がある。また、様々な断面をもつ古材を加工せずに軸組をずらして接合できる接合金物（BGN）を開発し、耐力を確認した。今後、実プロジェクトで使用する際には、壁面との納まりを検討する必要がある。

④ プロトタイプの評価

開発したチェックリストを用いた評価手法および MCI を用いて、プロトタイプの資源循環性を評価した。十分に高い資源循環性を達成できていることが分かった。一方、両者の評価結果に差異がみられた部分もあり、計画・基本設計段階から詳細設計段階への評価をシームレスにつなげていくため、より多数の物件による試行を通じ、評価手法を高度化する必要がある。

本研究において、資源循環に配慮した建築のプロトタイプの製作を通じた実践的な取り組みから、多数の課題が見えてきた。今後は、実プロジェクトへつなげるため、開発した技術を高度化する必要がある。また、今回開発した資源循環性の評価指標についても、多数の事例を適用しながら、チェックリストによる評価と BIM データを用いた MCI がシームレスにつながるよう、チェックリスト評価の調整を行っていく必要がある。地域全体で建築物の資源循環性を高めていくために、今後様々なステークホルダーの意見を聞きながら、資源循環性の可視化を通じて、理解を醸成することが重要である。

参考文献

- 1) 国土交通省:
<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001847455.pdf/>
(2025/07/08 時点)
- 2) Thomas Rau 他 (野田由美子訳) : マテリアル循環革命, 彰国社, 2025
- 3) Crowther Philip.: Design for Disassembly-Themes and Principles, Environment Design Guide, 2005
- 4) David Cheshire, Building Revolutions: Applying the Circular Economy to the Built Environment, RIBA Publishing, 2019
- 5) 日本貿易振興機構: 欧州グリーン・ディールの概要と循環型アラジック戦略にかかる EU および加盟国のルール形成と企業の取り組み動向, 2020
- 6) European Commission: Circular economy - principles and how to design buildings, 2022
- 7) 一般財団法人住宅・建築 SDGs 推進センター:
<https://www.ibecs.or.jp/CASBEE/index.htm> (2025/07/08 時点)
- 8) Madaster 社: <https://docs.madaster.com/nl/en/> (2025/07/08 時点)