

サーキュラーエコノミー実現に向けた建築設備技術の効果予測検証

Predicting and verifying the effectiveness of building equipment technologies to realize a circular economy .

株式会社竹中工務店

Takenaka, CO.

奥山 広志

Hiroshi Okuyama

キーワード：サーキュラーエコノミー (circular economy)、屋外空間快適性 (Outdoor space comfort)、パッシブ建築(Passive Architecture)、ホールライフカーボン(whole life carbon)、生分解性部材 (biodegradable material)



図-1 外観イメージ及び建設～還元までの過程

1. はじめに

EXPO2025 大阪・関西万博は、「いのち輝く未来社会のデザイン」をテーマとし、「People's Living Lab-未来社会の実験場」をコンセプトに開催される¹⁾。本万博では、人類共通の課題解決に向けた先端技術や革新的アイデアの実証・発信の場として、多様なパヴィリオンが建設される。

近年、国際的な共通課題である「サーキュラーエコノミー」は、製品の長期使用、再利用、リサイクル、再生を通じて資源の経済システム内での循環を最大化する概念である^{2) 3) 4)}。この概念は、持続可能な循環型社会の実現に向けた重要な方策として、様々な産業分野での実装が期待されている。本開発では、このサーキュラーエコノミーの理念に基づき、生分解建築とパッシブ技術を統合的に活用した、環境循環型パヴィリオンの開発・建設を行った。本稿では、生分解性素材を用いた建築計画、環境調和型技術の導入、および生分解性設備部材の開発による効果検証について報告する。

2. 計画概要

2.1 建築概要

本建築は「森になる建築」という革新的コンセプトに基づき設計された(図-1 参照)。構造体には生分解可能な酢酸セルロースを使用し、3Dプリンターによる一体造形を実現した。本建築は「生分解性樹脂を構造材として一体造形した世界最大の3Dプリント建築」としてギネス世界記録に認定されている。(写真-1 参照)



写真-1 3Dプリンターでの出力施工の様子

外装材には、種子を漉き込んだ「Seeds Paper」を採用した。この和紙の製作は、生きた建築ミュージアムフェスティバル大阪 2024⁹⁾において、多世代の市民参加により実施された。外壁断面には植栽土壌を充填し、Seeds Paper からの種子発芽と壁内部からの植物成長を可能とする構造である。経年変化により、酢酸セルロースの生分解と植物の生育が進行し、建築物が自然に還元される過程を意図的に設計に組み込んでいる(図-1 参照)。建築概要を(表-1)に示す。

建物名称	森になる建築
構造	酢酸セルロース造
規模	地上1階×2棟 直径4.65m 高さ2.95m
建築主 / 設計・施工	(株)竹中工務店
設備施工	(株)TAK イーヴアック
素材開発提供	(株)ダイセル
3D プリント製造技術	Boolean. Inc
酢セル配管強度試験	積水化学工業(株)
酢セル配管製造技術	あけぼの化成(株)
氷配置計画	恩地製氷(株)

表-1 建物工事概要

2.2 設備概要

設備概要を以下に示す。

(1) 電気設備

受電設備：万博ランドスケープ配電盤から低圧受電

送電設備：コンセント電源、灌水制御電源

照明設備：充電式ランタン

(2) 衛生設備

給水設備：灌水用給水

灌水制御：土中温度センサー、WAGO 制御システム

(3) 空調設備

換気設備：自然換気

空調設備：廃氷冷却システム・クールチューブ

3. サーキュラーエコノミー実現に向けた環境建築計画

3.1 快適性目標の設定

大阪ベイエリア万博会場における快適性目標として、既往の研究成果⁶⁾に基づき、新標準有効温度 (SET*) 32°C を設定した。この数値は夏期晴天時の木陰における快適性と同等の環境条件を示す。半透明な酢酸セルロース製ドーム型構造体特有の温室効果による快適性への影響を考慮し、建築地の特性を活用した環境調和型設備技術の開発・導入を検討した。

3.2 建設地の気象特性分析と建築計画への応用

建設地の気象特性を定量的に把握するため、大阪市内部と沿岸部の気温比較分析および沿岸部における外気温度・風速の実測調査(2023年9月5日13:00 晴天)を実施した。測定結果から、大阪ベイエリアはヒートアイランド現象の影響が比較的軽微であり、周辺海域による気温上昇抑制効果により、大阪市内(本町)と比較して平均気温が3~5°C低位であることが判明した。また、平均風速5.0m/sという測定結果は、パッシブ技術の効果的な活用が可能な環境条件であることを示している。

パヴィリオンの最適配置決定に際し、CFD解析で敷地内の自然風流動を解析した(図-2参照)。特に夏期における南西および西向きの卓越風の特徴を考慮し、自然通風効果を最大限に活用できる建設位置を選定した。またこれに基づき、パヴィリオン入口を南西および西側に配置する計画を採用した。

さらに、外壁面温度低減効果について Grass hopper を利用して直達日射量を解析し、最小化となるような敷地周辺の樹木配置を計画した。(図-2参照)。

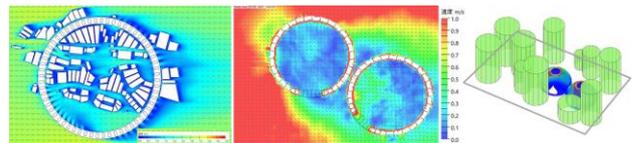


図-2 CFD 自然風解析・日射負荷解析

3.3 屋外空間における快適性への統合的アプローチ

敷地の自然通風ポテンシャルを含め、パッシブ技術により半屋外建築における快適性を高めるため、3つの技術を導入した。

1. 卓越風の有効利用
2. 熱負荷自体を抑制
3. パッシブ冷却システム

導入技術を図-3に示す。

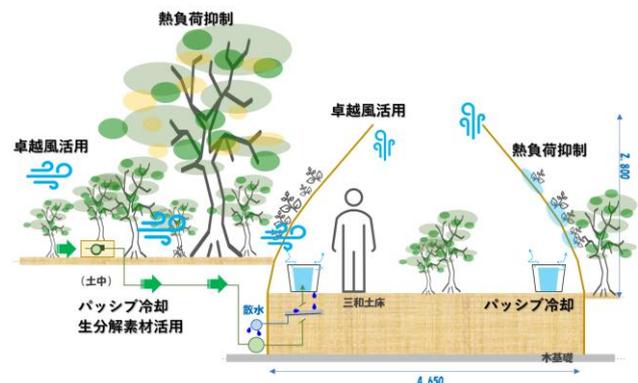


図-3 パッシブシステム導入

3.4 熱負荷の抑制

当社技術研究所においてモックアップを作成し、外壁内植栽土壌への散水時における表面温度変化を計測した。測定結果（図-4 参照）により、灌水時の壁内土壌温度が30℃以下に低下することが確認された。従来型断熱材とは異なる特性を持つものの、土壌を活用したパッシブ熱遮蔽効果が期待できることが実証された。これらの実験に基づき、外壁内土中無線温度センサーと連動した灌水制御システムを開発した。具体的には、外壁温度が30℃を超過した場合に自動的に灌水電磁弁を作動させる制御システム（WAGO社システムを使用）を実装し、植生と同時に効率的な土壌冷却システムとして機能させている。

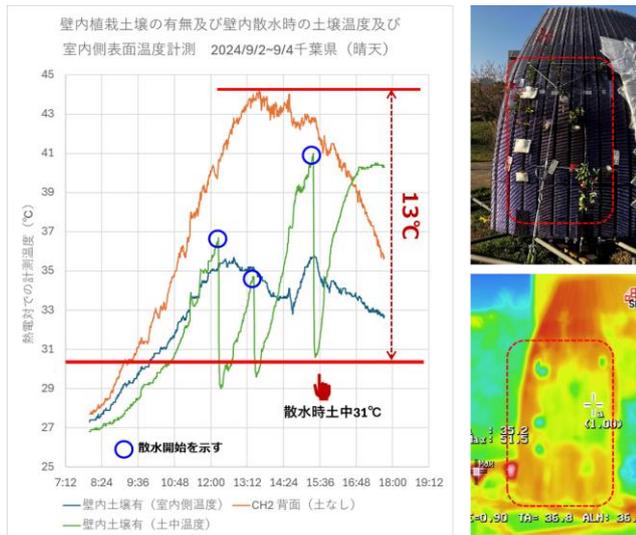


図-4 外壁温度推移（点線箇所が対象部位）

3.5 廃氷冷却システムの導入

本建築で採用した「廃氷冷却システム」は、市場流通過程で発生する気泡混入氷の有効活用を図るパッシブ空調システムである。通常、気泡混入部は市場価値が低く、廃棄される傾向にあるが、本システムではこれを万博会期中の室内冷却源として積極的に活用する。

酢酸セルロース製クールチューブダクトによる地中熱利用と廃氷冷却の統合である（図-5 参照）。地中熱での予冷外気を建物ベンチ内の廃氷と接触させて冷却し、さらに融解水をクールチューブダクト上部に放水させることで地中冷却効果を増強する。最終的に、この水は植栽灌水として利用される循環型システムを構築している。

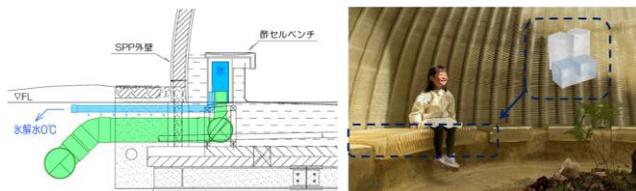


図-5 廃氷冷却部詳細図

3.6 環境配慮技術の統合効果分析

導入した環境配慮技術の総合的な効果を評価するため、室内快適性の詳細な解析を実施した。図-6 に示す解析結果において、案1は酢酸セルロース単体構成、案2は環境配慮技術を統合した実施仕様である。解析の結果、実施仕様におけるSET*は31℃程度となり、3.1節で設定した快適性目標値を達成することが確認された。従来案と比較して室温を4℃程度低減させ、温室効果の抑制に成功している。これにより、非空調屋外空間における快適性確保の実現が可能であることが確認できた。

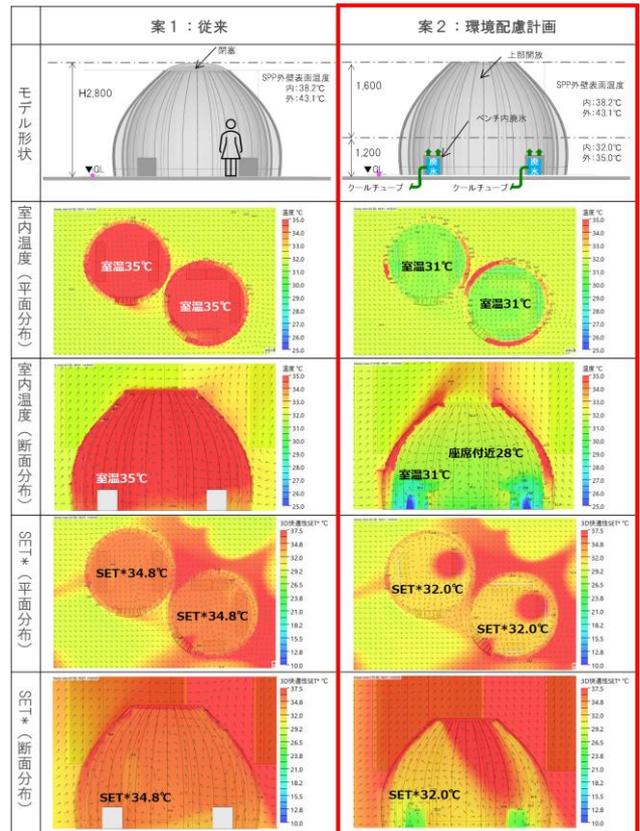


図-6 快適性評価解析結果

4. 酢酸セルロースを用いた設備部材の技術革新

4.1 酢酸セルロースの材料特性と環境性能

本建築の「森になる」というコンセプトを設備面で具現化するため、構造体と同様の生分解性を有する酢酸セルロースを用いた配管およびダクトの開発を行った。具体的には、海洋用途で試験的に製造された配管を建築仕様に最適化し、押出成形による製造技術を確立した。

従来の主要配管材料であるポリ塩化ビニルは、プラスチック循環利用協会の調査⁷⁾によると、マテリアルリサイクル率が30%以上である。本研究では、生分解性を有する酢酸セルロースの原料採用により、解体後の産業廃棄物発生を抑制し、環境負荷の実質的な低減を実現した。

4.2 酢酸セルロース製配管とダクトの開発

酢酸セルロース配管の製造工程（図-7）において、加熱温度、管肉厚、押出時間等の製造パラメータを最適化することで、塩化ビニル管のJIS規格主要項目に適合する製品の開発に成功した。JIS規格準拠の配管規格試験により、従来の塩化ビニル配管と同等の構造強度を有することを実証し、電線ケーブル保護管、雨水排水配管、融解水配管、クールチューブダクト等、多様な用途での実装を実現した。

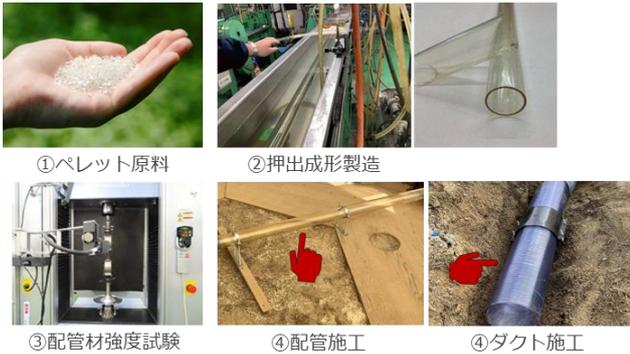


図-7 酢酸セルロース配管の製作過程

4.3 環境負荷低減効果の定量評価

酢酸セルロースの採用による環境負荷低減効果を定量的に評価した結果、建物解体時における塩化ビニル系産業廃棄物の大幅な削減が可能となることが確認された。従来の塩化ビニル配管との比較⁸⁾において、特にクールチューブダクトではホールライフカーボンを約65%削減できることが実証され、設備領域におけるホールライフカーボン削減に寄与することが明らかとなった。

5. 照明計画

本建築の照明システムにおいて、従来型の固定式常時点灯照明に代わり、来場者に配布する充電式ランタンによる動的照明方式を採用した。利用者の動線や空間の使用状況に応じて照明環境が有機的に変化する、インタラクティブな光環境を創出することに成功した。この手法により、エネルギー消費の最適化と共に、来場者の行動パターンに応じた柔軟な空間演出を実現している。（写真-2参照）

6. 終わりに

本研究開発では、従来の「スクラップ&ビルド」型建築から脱却し、「つくり・つかい・森になる建築」という革新的なパラダイムを提示した。「森になる建築」の開発を通じて、以下の二つの主要な成果を達成した。

第一に、還元する建築における環境調和型のパッシブシステムの構築を達成した。自然エネルギーを効率的に

活用するとともに、廃棄物の有効利用を通じて、屋外空間における快適性の解決策を示すことが出来た。

第二に、設備部材における生分解性素材の実用化を果たした。JIS規格におおそ適合する配管部材の開発に成功し、ホールライフカーボン削減を実証した。この成果は、建築設備分野における新しい環境負荷低減の具体的な方策を提示している。

これらの研究成果は、サーキュラーエコノミーの実現に向けた新たな方向性を提示するものである。今後の課題として、長期的な性能評価と耐久性の検証、他用途建築への適用可能性の検討、およびコスト最適化による実用性の向上が挙げられる。この成果を基盤として、今後さらなる技術開発と実証実験を進めることで、環境調和型建築の普及促進に貢献していく。

謝辞

本研究開発で快適性を評価するにあたっては東京大学大学院工学系研究科建築学専攻特任准教授 谷口 景一郎様、照明計画の在り方については岡安泉照明設計事務所 岡安 泉様に多大なる御支援・御協力を賜りました。ここに記して謝意を表します。



写真-2 建物完成後の全景写真（撮影：増田好郎）

参考文献

- 1) EXP02025 大阪・関西万博概要
<https://www.expo2025.or.jp/overview/>
- 2) 勢一智子：EU法の動向-サーキュラーエコノミーの淵源と展開-、環境法政策学会誌第25号2022年12月
- 3) 黒田真司・中村保博：サーキュラーエコノミー実現に向けたプラスチック循環の動向、電気学会誌2025年145巻1号 p.34-37
- 4) 熊坂仁美・大川朝子・吉田秀政：持続可能な地域づくりのためのサーキュラーエコノミー実践研究-福島市DMOの取り組みを事例として-、地域活性研究2023年18巻1号 p.139-147

- 5) 生きた建築ミュージアムフェスティバル大阪 2024 : 2024 年 10 月 26 日～27 日に行われた、大阪の魅力ある建築を一斉に無料で公開する日本最大級の建築イベント。
- 6) 中野淳太他 : 0 駅及び非空調駅の熱的快適域の比較-大規模空調空間を有する駅の熱的快適域に関する研究その 3-, 日本建築学会大会学術講演梗概集(環境工学Ⅱ), 319-320, 2012
- 7) プラスチック循環利用協会 : 2020 年プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況
- 8) 塩化ビニル環境対策協議会資料 (2010 年 3 月) を基に塩ビ工業・環境協会作成 (2022 年 3 月)