

広葉樹の利用促進に向けた、小規模太陽熱木材乾燥庫の環境設計手法と運用最適化

ー物理シミュレーションと実測データに基づくハイブリッド・デジタルツインの構築ー

森と木のクリエイター科 木造建築専攻 銭 鼎琨

1. 研究背景と目的

里山地域で活動する木工家や中小木材事業者にとって、伐採した広葉樹材の乾燥は大きな課題である。近年の燃料費高騰を背景に、クリーンエネルギーの活用への関心が高まっており、中でも太陽エネルギーを利用した乾燥方式が選択肢の一つとして注目されている。本研究では、設備投資および設計コストを最小限に抑えることを前提とし、一定の乾燥品質を確保しつつ、含水率低下速度に適した太陽熱木材乾燥庫の設計と運用最適化を中心課題とする。なお、乾燥品質に関する議論については、本研究では主に既存研究の知見を援用する立場をとる。

具体的には、IoT センサーネットワークによる実測データと建築環境シミュレーションを統合したデジタルツイン・フレームワークを構築することで、乾燥プロセスの「見える化」を実現し、定量的運用手段および太陽熱木材乾燥庫設計の最適化手法を確立することを目的とした。最終的には、地域の気候条件に応じた汎用的な設計支援プラットフォームを構築し、非専門家でも科学的根拠に基づく太陽熱木材乾燥庫を設計・運用できる環境を提供することを目指した。

2. 研究方法

2024 年の自力建設プロジェクトで建設した集熱や、断熱性能など条件の異なる 3 棟の実験用太陽熱木材乾燥庫のプロトタイプを対象として研究展開する。各室内に温湿度、日射量、風速、および重量センサーを設置し（図 1）、外界環境から建築内部を経て木材に影響する熱と水分の流動経路を時系列データとして継続的に取得した。



図 1 各種センサー

約 6 ヶ月間にわたり、3 樹種（ホオノキ、ウワミズザクラ、ブナ）の乾燥実験を実施した。並行して、建築環境シミュレーション（Grasshopper/Honeybee/

EnergyPlus）を構築し、実測値とシミュレーション値のキャリブレーションを通じてモデル精度の向上を図った。

また、制御変数法による対照実験を 2 種実施した。条件 A は透湿シートの機能を完全に遮断した、条件 B は断熱面と集熱面の面積比（断熱面積/集熱面積）を 1.40 から 3.18 に増大させた。それぞれセンサーによる計測データを比較し、各要因が乾燥性能に及ぼす影響を検証した。さらに、機械学習アルゴリズム（XGBoost）を用いた回帰分析により、庫内温湿度に寄与する特徴量（集熱面積、気密性能、断熱性能、木材量等）の重要度を定量的に算出した（図 2）。次に、絶対湿度の経時変化と、特定樹種における各乾燥段階の含水率との相関分析を行った（図 3）。この結果を、前段階の特徴量重要度分析により得られた各要因の寄与度と関連付けることで、環境変数から含水率低下速度への影響経路を表す関係モデルを構築した。

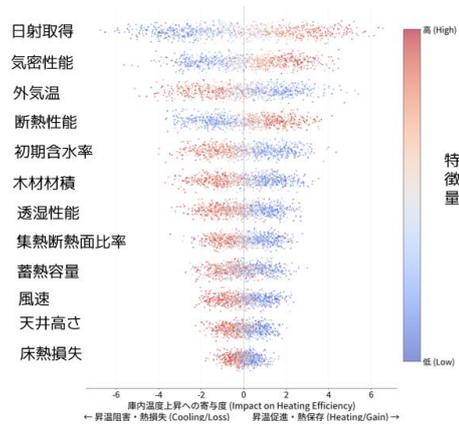


図 2 特徴による温度変化重要度分析

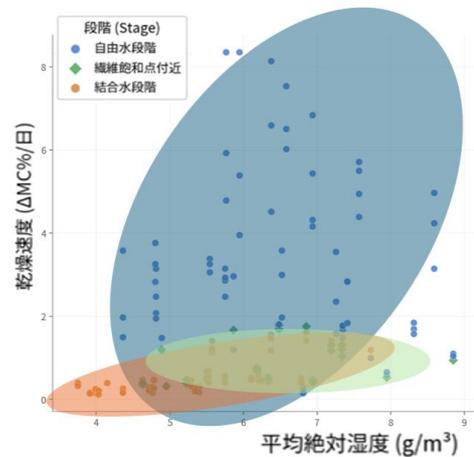


図 3 含水低下率と絶対湿度相関解析(サクラ)

3. 研究結果

実測値と Grasshopper/Honeybee シミュレーション値のキャリブレーションにより、室内温度予測の平均二乗誤差 (RMSE) は当初の 4.2°C から 1.8°C に改善された。この精度向上により、デジタルツインモデルを用いた設計代替案の事前評価が実用的な精度で可能となった。

XGBoost による特徴量重要度分析の結果、特徴量を建築性能、室外環境、木材状態の 3 群に分類し、各群の寄与率を算出した。その結果、決定係数 $R^2=0.91$ の精度のもとで、建築性能の寄与率が約 45%、室外環境が約 39%、木材状態が約 16%であることが示された。

この結果から、太陽熱乾燥において「制御不能」とされてきた室外環境の影響を、集熱面積や断熱性能といった設計可能な建築パラメータを通じて調整できる可能性が示された。

続いて、庫内絶対湿度と含水率低下速度の相関分析を行った結果、含水率を基準として、乾燥過程が以下の 3 段階に分類されることが明らかとなった。自由水段階 (MC>35%) では、最大乾燥速度 8.35%/日 (データ点数 70) を記録し、絶対湿度との間に見かけ上の正の相関傾向が認められた。これは、日射量の増大に伴い庫内温度と蒸発駆動力が上昇する一方、木材からの放湿により絶対湿度も同時に上昇するためであり、絶対湿度は乾燥速度の原因変数ではなく結果的な共変動と解釈される。繊維飽和点近傍 (MC 28~35%) であり、自由水蒸発から拡散支配への遷移領域として特徴づけられた (データ点数 25)。結合水段階 (MC<28%) では乾燥速度 1.5%/日以下 (データ点数 80) にとどまり、水分移動が拡散に支配されることで絶対湿度の影響が減弱する傾向が確認された。

なお、条件 B のデータ点は全体的に高絶対湿度域 (7~10 g/m³) に偏在しており、これは集熱面を半減させたことによる室温低下および排湿効率の低下に起因すると推察される。この傾向は、前述の XGBoost による特徴量重要度分析において太陽放射が最大の寄与要因であるという知見と整合する。

条件比較および乾燥対照実験から、以下の知見が得られる。①透湿性材料はパッシブ型太陽熱木材乾燥庫の乾燥促進に顕著な効果を発揮し、特に初期の自由水蒸発段階においてその寄与が大きい。(条件 A の結果) ②集熱部と断熱部の面積比率が昼夜の温湿度差を決定しており、この比率を調整することで目標とする温湿度変動パターンを得ることが可能である。③断熱材料の種類 (素材の違い) は乾燥進行への影響が比較的小さく、断熱性能値 (熱抵抗) が同等であれば材料選択の自由度が高いことが示される。

最後に、設計支援オンラインプラットフォームを開発した。プラットフォームは以下の 3 つの機能モジュールから構成される。①3D ビジュアライゼーション

(Three.js) により、ユーザーは太陽熱木材乾燥庫の 3D モデルをリアルタイムで確認・回転操作できる。②サイドバーのパラメータ調整ダッシュボードにより、集熱面積・断熱厚・開口率等の設計変数をスライダー操作で変更し、即座に性能予測値 (予想乾燥日数・建設コスト概算) を確認できる。③LLM (大規模言語モデル) を活用した自然言語インターフェースにより、「厚み 35mm, 材積 0.2 立米、ウワミズザクラ材を 3 ヶ月で含水率 8%以下乾燥させたい」といった要望を入力すると、最適される建築仕様又は運用アドバイスが提案される。さらに、木材乾燥文献を RAG パイプラインで構造化し、設計根拠となる学術知見を参照可能にした。

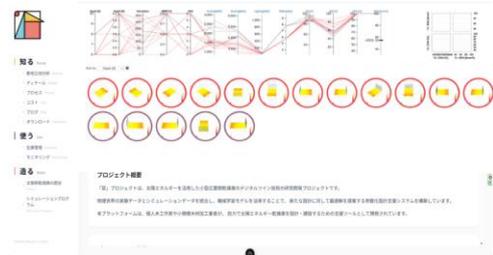


図4 オンラインプラットフォーム

4. 結論

本研究は、太陽熱木材乾燥における「環境の非制御性」という本質的課題に対し、IoT センサーネットワークとデジタルツイン技術を統合したデータ駆動型アプローチが有効であることを実証した。XGBoost による特徴量重要度分析は、室外環境要因のうち日射量が室内環境変動の支配的要因であることを定量的に示し、この知見は集熱面積や開口設計といった建築的パラメータへの変換を可能にする。すなわち、従来「偶然に左右される」とされてきた太陽熱乾燥の性能を、設計段階で予測・最適化できる道筋が示された。なお、本研究における木材乾燥の検討は、環境データと含水率変化の数理的分析に留まっており、木材内部における水分移動メカニズムの解明には至っていない。木材内部の乾燥モデルについては既存研究の成果を援用しており、この点は今後の課題として残される。

研究成果物である設計支援オンラインプラットフォームは、継続的なキャリブレーションを行うデジタルツインモデルに加え、データの蓄積に伴う機械学習による特徴量分析を可能とし、新規データに応じて精度が継続的に向上する予測モデルを提供する。地域の気候データを入力とすることで、任意の立地条件における太陽熱木材乾燥庫性能の事前評価が可能である。林産地近傍で活動する木工家や中小木材事業者が、温熱計算などの建築知識と専門的乾燥知識がなくとも、科学的根拠に基づく太陽熱木材乾燥庫を設計・運用できる環境を提供する。これにより、里山広葉樹資源の地産地消型利用が促進され、地域のものづくり産業の発展および地域活性化への貢献が期待される。