

木造建築を安全に使い続けるための技術

むらもと まこと
村本 真

京都工芸繊維大学 デザイン・建築学系 准教授

1 はじめに

木造建築を使い続けるためには、定期的なメンテナンスが必要である。建物の状態を観察しつつ、必要に応じて補修や補強を実施することで、災害に対する安全性を確保でき、建物を長く使い続けられる。

特に、伝統的な木造建築では、土壁の耐震性能評価が重要であり、設計資料の充実が図られてきた。京都市では、土壁の性能曲線を写真1のような実験結果に基づいて利用できるようになっている¹⁾。ここでは、京都左官協同組合²⁾が左官職の技能を維持するための取組みが進められている。

既存の伝統的な木造建築では、その建物の使用状況やメンテナンスの有無によって、土壁や木部材の状態も様々である。耐震診断時や建物改修時に架構の状態が確認され、その結果を踏まえて建物全体の構造性能を求める。耐震性能が十分ではない場合には、耐震補強が実施される。しかし、

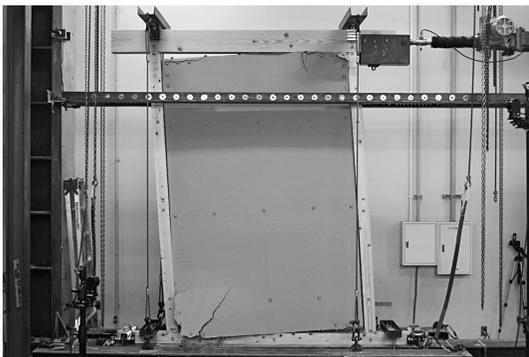


写真1 土壁の破壊実験の様子

既存の木造建築の安全性を建物全体のシミュレーションで確認するために必要な検査技術が十分に発展していない。

本稿では、非破壊検査によって木材と土壁の性能を予測する方法を紹介する。そこでは、実験データベースが重要な役割を果たしている。また、伝統的な木造建築の性能評価ができた後、人口減少の現代において、既存木造建築を新しい技術で修理・補強する可能性について述べる。土壁をロボットアームで施工する取組みを紹介し、左官職の技能継承を考える。

2 壁土や木材の性能曲線までを非破壊検査で予測する

伝統的な木造建築を安全に使い続けるためには、建物の構造性能を数値解析で確認する必要がある。ところが、新築の木造建築とは異なり、使用している木部材の性能や建物の耐震性能を確保している土壁の性能を必ずしも正しく評価できるとは限らない。使用している木材の強度や硬さ(弾性係数)を含む材料の性能曲線(応力-ひずみ関係)、さらには密度などは、壊さずに知ることが難しい。一般の非破壊検査法は弾性係数を推定でき、実用化されてきた実績がある。

既存伝統木造建築の耐震要素となる土壁の場合は、壁土の調合がほとんど不明であるから、木材と同様に材料の性能曲線を非破壊検査で把握することは難しい。また、土壁は異なる種類の壁土が

層になっていて全体に薄いため、鉄筋コンクリート構造や煉瓦造のように、コア抜きを行えない。

この問題に対処するために、筆者らは押込試験³⁾を利用した木材と壁土の非破壊検査法を開発している。伝統的な木造建築の木材と壁土の材料の性能曲線が非破壊検査によって、精度よく推定できるようになれば、数値解析⁴⁾によって、材料から応力-ひずみ関係を直接推定して、建物全体の性能を評価できるようになる。

土壁の非破壊検査法では写真2の機械を用いている。壁土に圧子を押しつける押込試験によって、微小な変形状態の荷重と変形曲線を得て、これと壁土の圧縮試験の結果との関係性を用いて強度や性能曲線、密度を予測する⁵⁾ことができる。現在は、京都深草産の壁土のみを対象として実験データベースを構築しているため、異なる地域への適用が課題となっている。壁土は地域によって、土の粒度分布が異なる。また、左官の調合も異なることから、地域や調合によらず壁土の性質を统一的に議論できるような非破壊検査法との関係性の発見が必要である。

推定した壁土強度を用いて、土壁の性能曲線(荷重-変形角関係)を土壁の破壊実験のデータベース



写真2 押込試験による壁土の非破壊検査

を整理した結果と組み合わせる⁶⁾こともできる。木材の非破壊検査法は土壁と同様に押込試験を用いるが、圧子の変位が固定され荷重のみを取得する機械を用いている。これは、木材が壁土より強度が大きいいため、押込力を大きくする必要があるのである。

木材の性能曲線の予測は難しい。異方性材料であること、樹種や節などの欠点も考慮する必要があるからである。壁土の場合と同様に、押込試験の結果と縦圧縮試験の結果のデータベースを統計的に分析することによって、木材の密度、強度、弾性係数、応力-ひずみ関係を予測する。また、樹種の判定も場合によっては、専門家の助言が必要であることから、樹種によらない性能推定を目指している。研究の当初は押込試験と材料試験に含まれる線形の関係を探したが、樹種によらない予測が困難であった。

現在は、さらに実験データを蓄積したことにより、実験データセットの機械学習によって、密度、平均年輪幅、強度、弾性係数を予測する機械学習モデルを作成でき、これらを組み合わせて、木材の縦圧縮応力-ひずみ関係をある程度予測する⁷⁾ことが可能となっている。今後も実験データの充実によって学習データの拡充を図り、推定精度の向上を目指している。

3 ロボットと職人が協働でつくる未来の建築現場

筆者らは、建築業界全体が抱える人手不足の問題に関して、特に伝統的な工法におけるロボットの活用を試行錯誤している。これまでに土壁の破壊実験を数多く実施してきたことから、産業用ロボットアームを用いて、土塗り左官の実現の可能性を探っている。ロボットと職人が協働している現場の実現を目指している。

まずは、職人が持つ技術をそのままロボットに移植することを考え、熟練左官職人の塗り付け時の動作や鑊^{こて}圧等をモーションキャプチャ実験によって取得して用いることを考えた。複数の左官職人の動作を分析し、それらの特徴を拾って、ロボットアームの動作経路を設計している。これによって、写真3のように、ベニヤ下地あるいは土下地において中塗り土を塗りつけられている⁹⁾。

このままでは、塗り付けた土壁の仕上がりをロボットが評価できないことから、職人の目の代わりとなるセンサーをロボットアームに搭載することも試みている。初期のプロトタイプでは塗り残した部分が多かった。そこで、塗り付け状況を画像解析によって判定して、塗り残し部分に再度塗り付けを実施するように経路を再設計する仕組みを導入している。ここでの判定は様々な左官仕上げの写真的画像を機械学習したモデルによって実現している⁹⁾。この塗り残しの判定問題は、学習データの準備によって、土壁の補修領域の判定問題として解くことができる。

建設現場にロボットを導入するにはまだ多くの課題がある。特に、町家の改修現場は狭く、小型のロボットしか使用できない。また、ロボットがこのような現場を自在に移動できるとも限らない。段差や上下の移動も必須であり、足回りの駆

動性が必要である。さらには、ロボットが作業領域を自動認識できる必要もある。現在は、左官職人の右手のみを模倣しているため、壁土を鑊に載せる作業に人の助けが必要である。近い将来、人型ロボットにおいて、左官作業を実現することも期待される。

以上のような課題は、他分野の技術の積極的な利用や応用によって次第に解決されていくものと思われる。その結果、現場には左官ロボットが複数台配置され、それを職人が取りまとめることになる。職人の役割も変わり、より繊細で高度な作業に集中できるようになる可能性がある。そこまでいかずとも、職人が高負荷な左官作業を継続して体を痛めなくなるのが期待できる。

4 技能・技術の種を残す

左官ロボットは左官職人と協業するように企図されている。ロボットアームの経路は、写真4のように左官職人のモーションキャプチャ実験の取得データから、職人の技能分析とともに生成されている。左官職人のモーションキャプチャデータは重要なデータベースである。筆者らは、各地の左官職人のデータを取得する試みを進めている。

土壁の性能をいくら吟味しても、施工できる職人が不在では、日本の土壁文化が衰退してしまう。

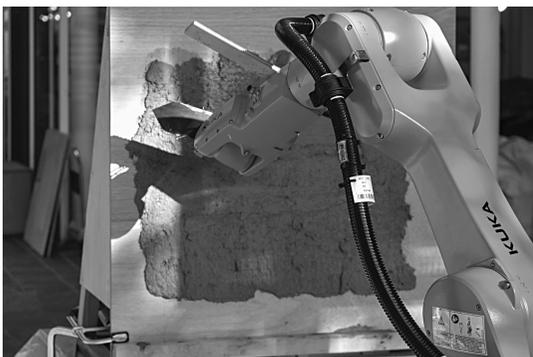


写真3 ロボットアームによる土塗り左官
(株竹中工務店との共同研究)



写真4 左官のモーションキャプチャ実験
(株竹中工務店との共同研究)

伝統的な木造建築そのものも大切であり、保存していくことが求められるが、それを施工する技術自体も継承されなければ、木造建築を保存することが難しくなる。

今のところ、モーションキャプチャ実験を実施している職種は左官に限っているが、他の職種にも展開可能である。職人のモーションデータの保存によって、時代を超えて、職人技術をデジタル空間上でリアルに確認できるようになる。ARゴーグルなどを使用すれば、このデータベースを用いて、より臨場感を以て熟達者の技術を学べ、技能教育ひいては入職者の増加にも有効となるのではないかと思われる。

5 おわりに

本稿では、既存木造建築を対象に、材料の性質を非破壊検査によって調べる技術を建物の性能をシミュレーションする技術に組み合わせること、さらに伝統的な工法をロボットで施工する技術を紹介した。ここで紹介した非破壊検査法は押込試験に基づき、あらかじめ実施している材料実験と組み合わせたデータベースの構築によって材料特性が推定される。ロボット施工による左官技術は、伝統工法における未来の建設現場を提示し、この技術開発を職人の技能継承と関連させることによって、広く木造建築の文化を残すためにも有効であることを述べた。

本稿で紹介した技術の対象は伝統的な木造建築であったが、これらの技術は現代の木造建築にも応用できるものである。木造建築を多くの信頼性の高い実験データに基づいて設計し、必要に応じて部材の現状性能のデータを取得して修理し、補強する仕組みを提供することがこれらの技術の目指すところである。

(参考文献)

- 1) 京都市都市計画局建築指導部(2021)「京町家できること集—建築基準法の適用除外制度の紹介と建築基準法の下でできること—」令和3年改訂版, pp. 62-64
- 2) 京都左官協同組合「[京都左官協同組合京土壁仕様]の特徴と使い方」
<http://kyotosakan.com/021.html>, (2024. 8. 6参照)
- 3) 谷 充博・佐久間淳・篠宮将光(2009)「球圧子の押込試験による軟材料の厚さと Young 率の計測」『日本機械学会論文集(A 編)』第75巻, 第755号, pp. 125-132, (一社)日本機械学会
- 4) 例えば, Rong Hu, Makoto Muramoto, Jun Li (2024) A fiber beam-column model for damage assessment of traditional Chinese timber structures, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, Vol. 23, No. 1, pp. 245-263, Taylor & Francis
- 5) 牛谷和弥・村本 真(2018)「壁土の圧縮試験から得た材料特性と押込試験結果の関係」『構造工学論文集』Vol. 64B, pp. 463-471, (一社)日本建築学会
- 6) 馬場花和・寺門宏之・村本 真(2024)「既存土壁で実測した押込試験結果を用いた土壁の荷重-変形角関係の推定」『日本建築学会大会学術講演梗概集』構造Ⅲ, pp. 785-786, (一社)日本建築学会
- 7) 太田和輝・村本 真(2024)「木材の押込試験と縦圧縮試験の結果の機械学習による応力ひずみ関係の推定」『日本建築学会大会学術講演梗概集』構造Ⅲ, pp. 599-560, (一社)日本建築学会
- 8) 登尾育海・バルナ ゲルゲイペーター・村本 真・西村智賢(2022)「左官職人の鏝の動きに基づく経路により制御したロボットアームによる土塗り左官」『第45回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集』pp. 31-36, (一社)日本建築学会
- 9) 森本理仁・登尾育海・村本 真・杜偉薇・バルナ ゲルゲイペーター・西村智賢(2023)「左官ロボットのための機械学習を用いた壁面塗り領域判定」『日本建築学会大会学術講演梗概集』情報システム技術, pp. 211-212, (一社)日本建築学会