

# 建設用 3D プリンタによる廃棄土壁由来の再生材料を用いた MEX 造形

## MEX 3D Printing Using Recycled Material from Waste Wall Clay

田住 梓<sup>1</sup>, 鷺見 良<sup>1</sup>, 岩本 卓也<sup>2</sup>

Azusa TAZUMI, Ryo SUMI, Takuya IWAMOTO

<sup>1</sup>ND3M, <sup>2</sup>株式会社 Polyuse

ND3M, Polyuse Co., Ltd

### 【要約】

土壁は、日本建築において幅広く用いられてきた素材であるが、現代では解体や改修に際し、特に都市部において処理困難な廃棄物とされる現状がある。一方、土は人の手で扱い易い素材であり、用いる場面によっては循環可能で低コストな素材として利用価値を発揮できる。本報告では、この廃棄土壁を、3D プリンティング技術により新たな価値を付与することを目標とし、複数の産地の土壁を用いて配合を検討しながら造形を実践する。

キーワード：土壁，3D プリンティング，廃材利用，自然素材，乾燥収縮，日本建築

### 【Abstract】

Clay walls have been used extensively in Japanese architecture. Today, when they are demolished, they become waste that is difficult to dispose of, especially in urban areas. However, clay or mud are easy to handle by human hands, recyclable, and low-cost. Therefore, it may be useful in some situations. In this report, we try to convert wasted clay walls into new value using 3D printing technology. We practice modeling while examining the composition using clay from multiple regions.

Keywords:mud wall, 3D printing, waste material, natural material, drying shrinkage, japanese architecture

### 1. 背景・目的

土壁は、特に西日本において広く一般的に住宅に用いられてきた構法である。現代の新築工事においては珍しいものとなっているが、土壁が使用されている住宅はまだ多く残されており、解体作業や改修の際に廃棄物となってしまう。旧来は、新たな土壁に混ぜ込んで使用したりするなどして再利用されるものであったが、現代の都市部では処理困難な廃棄物として扱われてしまう。その一方で、人の手で扱いやすく水で練れば何度も利用できる点が注目されている面もあり、現代建築への適用もみられる。本研究では、この壁土を原料とし、MEX(Material Extrusion)3D プリンティングの素材として活用する方法を探る。水と練り合わせることで流動性を付与することができるため、セメント系材料を扱う建設用 3D プリンタを使用する。

土系材料を用いた構造物の 3D プリントに関して、イタリアの WASP 社に代表される取り組み<sup>(\*)</sup>が世界各地である。しかしそれらの地域と同様に土を伝統的に用いてきた日本での 3D プリンティング事例はみられない。左官での土壁の配合や特性などについて、ばらつきのある自然素材を建築に適用するにあたり様々な検討がなされ、土壁の再利用を見越した研究<sup>(\*\*)</sup>も行われている。しかし 3D プリンタで吐出し積み上げるにあたり、従来の材料配合などをそのまま適用できない。

従って本研究では、造形のための基礎的研究として、

再生壁土素材が、3D プリントに必要な施工性を得るための配合や造形の検討、また、乾燥収縮についての検討を行う。

### 2. 廃棄壁土由来の原材料の制作

#### 2.1. 材料の分別・粉砕

本章では廃棄土壁の再生プロセスを述べる。解体された土壁には竹小舞や縄などが混入しているため、手作業で分別した後、土壁を粉砕する。これには、粉砕しきれない土、藁、比較的大きな砂礫が混入している。3D プリントにあたり、これらは詰まりや吐出不良の原因となるため、段階的に篩にかけ、最終的に 3mm のメッシュを通過したもののみを材料とした(図 1)。

この再生壁土は、もともとの土壁の配合により組成は異なり、粘土質の土、3mm 以下の砂、微細な藁繊維、その他混和物が含まれている状態である。一般的に新



図 1 廃棄土壁とそれを原料とした再生壁土

土は、粘土質の土のみのため、同じ材料として扱うことはできず、個別に検討が必要である。

## 2.2. 藁繊維の作成

通常の壁土には、荒壁、中塗り、仕上げなどの段階に応じて、ひび割れ防止や接着性向上のために混ぜ込む藁すさの種類が異なる。通常仕上げ以外では、繊維をほぐしていない切断したままの藁を用いることが一般的である。しかし、3Dプリンタで吐出するにあたり、細かい繊維にする必要がある。そのため、一般的に流通している規格を用いる場合、10mm前後のひだしすさ、5mm前後の微塵すさをを用いることができると考えられる。

本研究においては様々な長さでの比較実験をすることから、すさも自作のものを用いた。通常、仕上げ用の細かいすさは、水に長時間晒しアクを抜き、繊維を柔らかくした後に裁断して作成するが、今回は簡便のため、裁断した藁を穀物用ミルにかけ、繊維をほぐしたものをを用いた(図2)。



図2 藁すさの作成

## 2.3. 材料の混練

前述のように、再生壁土には粘土と砂が混ざっており、微細な藁繊維も混入している。新土を壁に用いる場合は砂や糊を混ぜたりするなど、場面に応じて様々な配合をする。今回は荒壁の施工を基準に、再生土に水と藁を混ぜ込んだものとした。また、糊などは用いず水捏ねとし、左官用の水の配合では3Dプリント可能な流動性を確保できないため、状況に応じて調整した。

## 4. 再生壁土材料の3Dプリンティング

### 4.1. 実験に用いる3Dプリンタ

本研究では、株式会社 Polyuse の開発する、セメント系材料を出力することを目的とした建設用3Dプリンタを用いる(図3)。XYZ3軸のフレームをもち、X軸に材料を吐出するノズルが搭載される。水と混練された材料は、連続押し出し式のポンプより、ノズルまで供給される。今回の実験にあたり、100~150mm/sec程度の速度で、吐出された材料幅はおおよそ30mm、積層高さはおおよそ10mmの条件で造形を行った。

### 4.2. 材料の配合・性状の評価指標

3Dプリンタでの出力に際し必要な材料性能について整理する。まず第一に、吐出可能な流動性が必要で

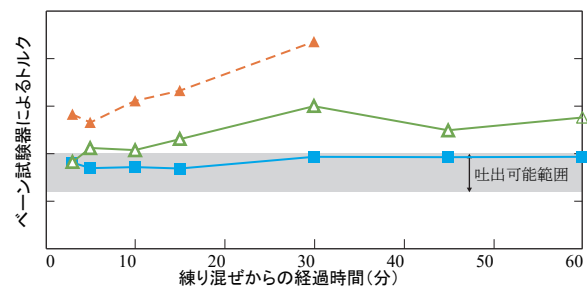


図3 本研究で用いた建設用3Dプリンタ

ある。そのため、粘性土のせん断強さ、粘着力を測定するために用いるベーンせん断試験を評価指標として用いる。このベーン測定器で得られるトルクが、スクリュウポンプでの押し出し時の負荷に対応すると考えられる。この時間変化をみることで、吐出可能な状態を維持する時間や硬化時間を予測することができる。材料は吐出後、次の積層により上部の重量がかかるため、トルクが増大する方が望ましい。そのため、安定して吐出できる時間と積層の自立保持はトレードオフの関係にある。また、フロー試験により、吐出直後の形状保持の評価のために、材料の軟性を測定する。

### 4.3. 壁土のフレッシュ性状についての予備試験

まずモデルケースとして、愛知県名古屋市内の民家の改修現場から入手した再生壁土を用い、フレッシュ性状を試験した。藁と土の配合については一般的な中塗り土の配合を参考にした。水分量に関しては本実験以前に小型の粘土用3Dプリンタで出力を行い、その造形時の配合を元に決定した。藁すさは5mm程度の微塵すさを使用した。また、②と③については吐出後の自立保持性を高める狙いで増粘剤を配合した。①と③を比較すると、増粘剤を加えたことにより初期のベーンは吐出可能範囲に抑えつつ、トルクの立ち上がりは速く、フローの低減と水分量の増加にも成功したため、③の配合に決定した(図4)。



| 配合       | ①    | ②    | ③    |
|----------|------|------|------|
| 凡例       | ■    | ▲    | ▲    |
| w/p (%)  | 24.7 | 29.6 | 29.6 |
| 増粘剤      | 無    | 有    | 有    |
| フロー値(mm) | 116  | 106  | 109  |

図4 ベーンせん断試験とフロー試験結果

#### 4.4. 再生壁土の造形実験

##### 4.4.1. 円柱の積層実験

まず、上に材料が積層されることによる下層の自立保持性を確かめるため、直径 600mm の円柱を積層する実験を行った(図 5)。12 層目付近から下部が外側に膨らみはじめ、15 層目を積層したところで内側に崩壊した。つまり形状の工夫なく、10 層つまり 100mm 程度は積層可能だといえる。プリントする形状にリブをもたせるなどの工夫や、壁厚を確保するなどすれば、より高く積層可能だと考えられる。

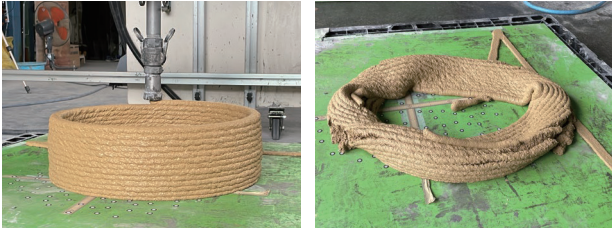


図 5 円柱積層実験結果

##### 4.4.2. 曲線パスを持つブロックの 3D プリンティング

前項の結果より、シングルラインの積層でも 100mm 程度の造形が可能であることがわかったため、800mm 四方の大型ブロックの造形実験を行った(図 6)。全体のプリント時間は 23 分で、最後までポンプの負荷は安定した状態で吐出可能であった。プリントパスが接する部分で壁の膨らみはあるものの、狭い隙間も接することなく造形できていた。

造形後、日光の当たらない屋内で乾燥させた(図 7)。収縮によるひび割れが生じており、主に外周で周囲より壁が薄い箇所に亀裂が完全に貫入している。通常今回造形した厚さ 30mm 以上のような壁には、50mm-100mm 程度の荒すさをを用いるため、微塵すさでは亀裂を食い止められず、弱い部分で分離してしまったと考えられる。一方それ以外の部分の表面には、荒壁で生じるような細かいひび割れなどはみられず、細かい微塵



図 6 大型ブロックの造形

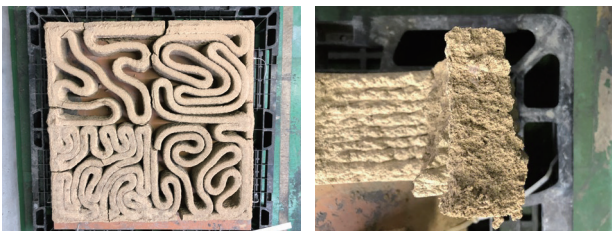


図 7 乾燥後の造形物

すさ混入の効果が発揮されていると考えられる。また、断面に関しては、層間で分離している様子はなく、各層は十分に結合していると考えられる。

#### 5. 異なる産地の再生壁土の比較

##### 5.1. 目的

壁土には規格があるものではなく、採取地や配合により材料特性は様々である。そこで、様々な地域の民家の解体により生じた廃棄土壁を収集した再生壁土を対象にフレッシュ性状の試験を行い、3D プリント可能な性質を獲得できるかどうか検討する。

##### 5.2. 収集した土壁

4 章で用いた名古屋の土に加え、岡山、広島、福岡の民家より土を手に入れ、再生壁土を作成した。さらに比較対象として、有名な壁土産地である淡路の荒土と埼玉の荒木田土の2種類を用意した。それぞれ外観は大きく違い、粘土質の量にも差が見られた(図 8)。

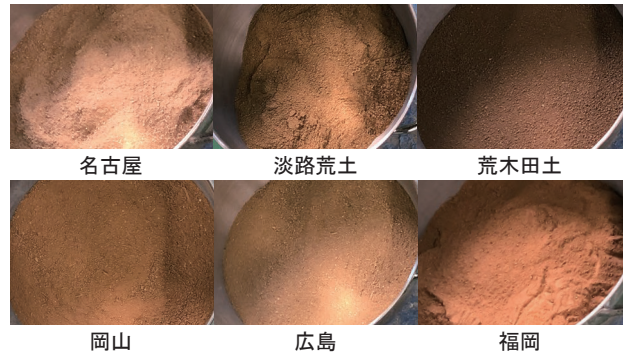


図 8 各産地の壁土

##### 5.3. 産地ごとのフレッシュ性状の評価

4.3 節のフロー試験とベーンせん断試験を実施した結果を示す(図9)。配合は図 4 の③と同様である。

すべて乾燥状態の壁土を用いたが、測定結果に大きな違いがでた。福岡の土は時間が経過してもトルクが増加せずほぼ横ばいであった。しかしそれ以外の土に

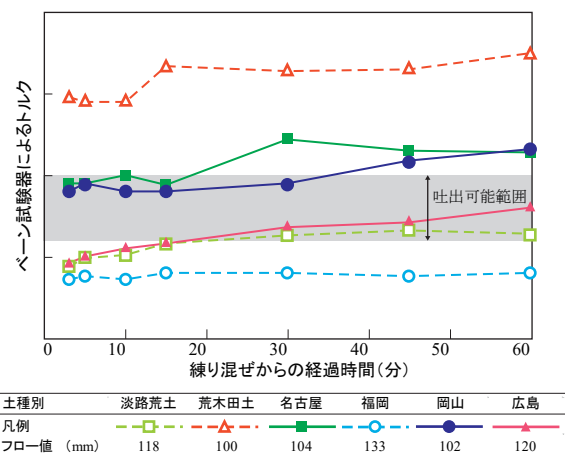


図 9 各産地のフレッシュ性状試験結果

については時間経過で増加しているため、水分量など調整で適切なフローを得て、名古屋の土と同じように造形できる可能性がある。また、荒木田土は15分頃に急速に立ち上がった先で横ばいであり、粘土質の多さを反映している可能性がある。既に過去の施工時に砂などと配合され調整がされた状態である再生壁土であっても大きく性質が異なる。よって、3Dプリンティングにあたり個別の比較検討が必要である。一方で、どの壁土もトルクの上昇は緩やかであるため、練り混ぜ後安定して押出可能である。

## 6. 藁すさの配合による収縮ひび割れの評価

### 6.1. 目的

4章の実験では吐出のため短い繊維を用いる必要があり、長さ5mm程度の微塵すさを配合した。表面のひび割れは発現しなかったものの、大きな割れを抑制することができなかった。そこで、藁すさの長さや配合量を変化させながら、ひび割れへ与える影響を考察する。

### 6.2. 作成した試験体と藁すさの配合

今回作成した藁すさの長さは一般に用いられるものを基準とした。おおよそ5mmが微塵すさ、10mmがひだしすさ、20mmが中塗りすさ、30mm-50mmが短い荒すさに対応する。壁土には淡路の荒土を用い、製造業者の推奨配合である1kgあたり12gを標準とした。それに加え建築基準法告示や文献<sup>(3)</sup>を参考に、1kgあたり6gから36gの配合とした。それぞれ個別に混練したのち、ウレタン塗装合板上で150mm×150mm×20mmの樹脂型に詰め、表面をならして脱型した。また、基準配合で高さ5mmと40mmの試験体も作成した。

### 6.3. 乾燥収縮・ひび割れの評価

乾燥後の状態を示す(図10)。4.4.2項で見られたような、全体が切り離されるようなひび割れまたはそれに発展することが予想されるものを「割裂ひび割れ」、一方で表面に無数に生じるひび割れを「表面ひび割れ」として区別する。基準配合の5mm\_12gの試験体には部分的に割裂ひび割れが生じたが、表面ひび割れは生じなかった。それより少ない5mm\_6g、藁なしの試験体にはより大きい割裂ひび割れが生じた。10mm以上の12gで割裂ひび割れを生じたものはなく、繊維長を長くすることで抑制可能だと考えられる。しかし、20mm以上では表面ひび割れが生じ、6g\_30mmでは割裂ひび割れも生じている。これは、繊維を長くしたことで、繊維が不均一に分布し、ひび割れが生じたと考えられる。5mmの試験体については、24gでは割裂ひび割れに発展しそうなひび割れが存在するが、36gにはひび割れは見られない。10mmの試験体は12g、24gで

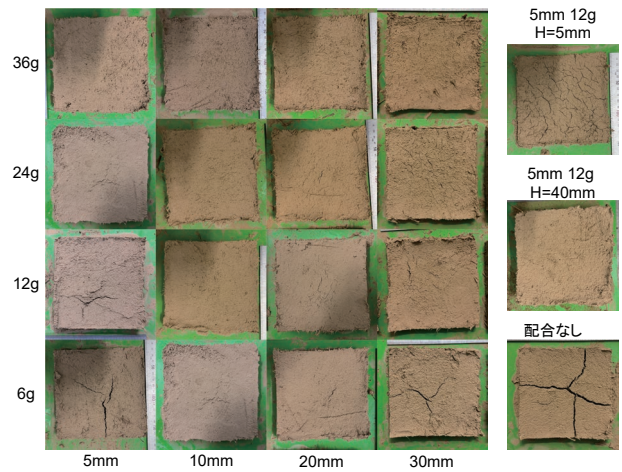


図10 藁すさの長さや配合とひび割れの関係

表面ひび割れを生じたが、6gではいずれのひび割れもなかった。

以上より、繊維を長くすることで割裂ひび割れを抑えることができる一方で、表面ひび割れは増加する。本実験においては10mm\_6gが一番ひび割れの少ない結果となり、繊維長は伸びたが配合量を減らすことができたため、吐出不良のリスクには少ないと予想できる。また、配合を減らすと繊維が長い場合に部分的な割裂ひび割れを生じる可能性がある。また、造形物の大きさにより割裂ひび割れが生じる場合も考えられるため、表面ひび割れは許容したうえで配合量を増やすことも検討すべきである。本研究はポンプでの連続押出を前提としているが、24g以上の配合では十分な流動性を確保できておらず吐出困難な性状である。しかし、シリンダのなかに材料を詰め空気圧などで押し出す方式であれば、より流動性の低い材料でも吐出できるため、藁の配合量を高めることが可能だと考えられる。

## 7. 結論

再生壁土と藁の配合を検討することにより、3Dプリント可能な性状を確保できることが分かった。一方、藁の配合や産地の異なる壁土については出力実験を行っていないため、今後実際に出力実験を行い本報告内容の評価を行う必要がある。

### 参考文献

1. WASP, <https://www.3dwasp.com/en/3d-printing-architecture/>, (参照2023-9-30).
2. 浦 憲親：地域産土に関する基礎実験，日本建築仕上学会2014年大会学術講演会研究発表論文集，p. 15-18, 2014
3. 特定非営利活動法人土壁ネットワーク：⑦ 告示の問題 / 壁土, [http://www.tutikabe-net.com/studyreport/studyreport\\_7.html](http://www.tutikabe-net.com/studyreport/studyreport_7.html), (参照2023-9-30).