

不均質な木質部材をつなぐ金属 3D プリンター製接合部の開発

～自由形状の接合部で未利用木材・間伐材の有効活用を促進～

株式会社竹中工務店

木下拓也

シモダフランチ株式会社

浦川博史, 岡方義則, 築山 仁, 堀田翔太

XENCE Architecture Studio

小澤巧太郎

1. はじめに

本稿では、金属 3D プリンターで製造したジョイント部材によって、不均質・不整形な木質部材を接合する新たな架構システムの開発について報告する。使用したワイヤ&アーク付加製造 (Wire and Arc Additive Manufacturing, 以下 WAAM) 方式の金属 3D プリンターは、従来の金属 3D プリンターに比べて速度と経



図 1 金属 3D プリンター製接合部を用いたモックアップ架構 (左: 全景, 右: 接合部詳細)

済性に優れ、建築・インフラ領域への展開可能性が高い。開発した 3D プリンター製接合部は、個々の接合部ごとに、形状を自由にカスタマイズすることができる。その自由度を活かすことで、製材の過程で生じる端材や不揃いな材など、これまで建設用途では利用できなかった木材を有効活用することが可能となる。このような未利用木材の有効化は、林業・製材業の歩留まり向上に繋がり、都市活動を通した森林資源循環促進に大きく貢献する。

接合部の設計においては、シミュレーションや造形試験を経て、3D プリンターでの造形制約を満たし、省材料かつ高剛性な形状を見出した。さらに、実際に製造した約 30 ピースの金属 3D プリント接合部と、製材過程で生じた未利用材を用い、間口 5.7m, 奥行 4.5m, 高さ 2.9m の工作物 (モックアップ架構) の試験施工を行って、提案技術の実現性を確認した (図 1)。

2. 都市・建築の木材活用推進の課題と、本技術の提供価値

2021 年に、「都市 (まち) の木造化推進法¹⁾」が施行されるなど、国や自治体の政策として、都市活動や建築・インフラにおいて木材利用を促進しようとする動きがみられる。図 2 に示すように、建築での木材利用のメリットは、①建設時の二酸化炭素排出量を S 造や RC 造に比して削減できる点 (削減効果)、②木材を建築物として長期間使用することにより、吸収した二酸化炭素を長期間貯蔵できる点 (貯蔵効果)、③使用後の木材や未利用部を最終的に燃料として利用することで化石燃料を代替できる点 (代替効果) の 3 点が主に挙げられる^{2), 3)}。現在、国内の人工林は本格的な利用期を迎えており⁴⁾、脱炭素社会の実現のため、また健全な森林資源循環のため、木材の活用促進は必須の状況である。

一方で、林業においては、森林整備の過程で生じる間伐材や、製材過程で生じる端材・ミミ材などを建設資材として流通させられず、ウ



図 2 都市・建築における木材利用の効果²⁾

ッドチップや燃料ペレットのような、非常に安価な材として処理せざるを得ない現実がある(図 3)。特に、都市木造において必要となる大径木材や集成材は、高規格が求められるが故に歩留まりが悪く、このような未利用部位あるいは低単価部位を多く生み出し、森林全体の利益効率を低下させる。このことは補助金を前提とした小規模事業者が多い林業・製材業にとって、事業拡大の大きな障壁となっており、結果として、木造化推進の諸施策にも関わらず、木材流通量が増加しない、いわば「山から木が降りてこない」状況が生まれている。

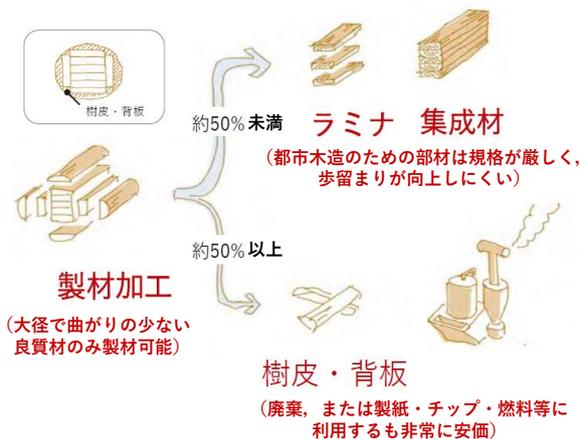


図 3 製材過程で生じる未利用材・低単価材のイメージ

本稿で報告する金属 3D プリンター製接合部の設計・製造技術では、このような未利用木材の有効活用に焦点を当てる。「曲がった」「不揃いな」「皮付きの」といった未利用木材の不均質性を、一つ一つ形状のカスタマイズが可能な金属 3D プリンター製接合部で受け止め、建築における外構資材(簡易な小屋・フェンス等)や内外装材として利用する。廃棄あるいは燃料として処理するよりも付加価値の高い建材として流通させることで、林業の歩留まりを向上させ、流通量の拡大に貢献する。また、建材として用いることで、廃棄・燃焼するしかなかった未利用部材に、二酸化炭素貯蔵効果を担わせることができる。このように、本技術は、木材資源循環促進と脱炭素社会実現の両面で有効なソリューションとなり得る。

3. WAAM 方式金属 3D プリンター

3D プリンターは、切削加工 (Subtractive Manufacturing) と対比する形で付加製造 (Additive Manufacturing) 技術や積層造形技術と呼ばれる。その名の通り、材料を付加・積層しながら形状を生成させる製造手法で、切削加工や鍛造、あるいはプレス成型といった既往の製造技術とは異なる特徴を持つことから、造形自由度の向上や、材料効率の改善といった面で期待されている。

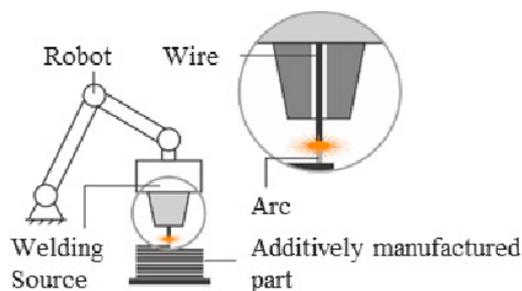


図 4 WAAM 方式金属 3D プリンターの基本セットアップ⁵⁾

建築・インフラ業界での 3D プリンター活用は、モルタル系プリンターの開発が多く報告されてきた一方で、金属 3D プリンターについてはあまり活用事例が見られなかった。しかし、金属材料は高い強度と剛性、そして柔軟な加工性を持つ建設資材であり、それが 3D プリンターによる多品種少量生産(マス・カスタマイゼーション)に対応できた場合のインパクトは大きい。



図 5 金属 3D プリンターによる自由形状接合部



図 6 金属 3D プリンター製大型ベンチ(HAGOROMO BENCH)

本稿で紹介する接合部は、ワイヤ&アーク付加製造(WAAM)方式と呼ばれる金属 3D プリンターで造形した。WAAM 方式は、アーク放電を熱源とし、溶接ワイヤを送給して、クラッディング(肉盛り溶接)により造形を行うプリント方式である(図 4)。WAAM 方式は、金属粉末をレーザー

焼結して造形する一般的な金属 3Dプリント手法と比べ、材料コストと造形速度に優れており、建築のような大型サイズの造形に適している。さらに、産業展開を考える上では、JIS 等の規格に適合したワイヤを用いることができることも WAAM 方式の大きなメリットである。筆者らはこれまで、WAAM 方式金属 3D プリンターの建築・インフラ領域への展開可能性に注目してきた。2019 年には、図 5 に示す自由形状の金属 3D プリンター製接合部のコンセプトモデルをリリース⁶⁾し、2021 年には、図 6 に示す長さ 8m を超える大型ベンチを製作^{7), 8)}した。併せて、造形された金属の材料特性や溶接品質の確認にも取り組んできた。図 7 はステンレス合金製ワイヤ SUS308L の引張試験の一例である。連続溶接により積層されるため、積層の方向に依存した異方性が見られるが、いずれの方向においても十分な強度と伸びを示した。

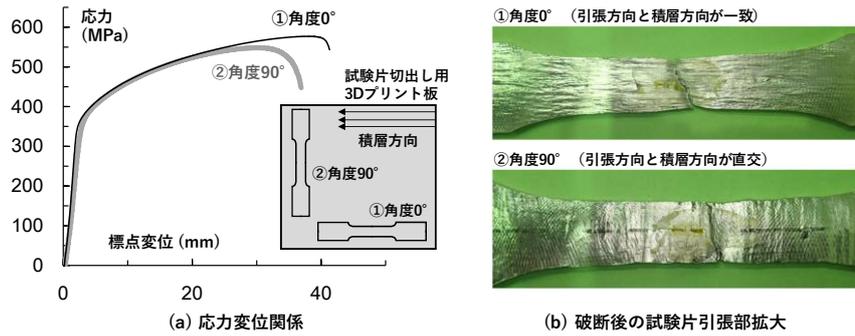


図 7 WAAM 方式金属 3D プリンター製ステンレス合金の材料試験⁸⁾

4. 未利用木材と金属 3D プリンター製接合部によるモックアップ架構の設計と試験施工

本節では、WAAM 方式金属 3D プリンターで製造した接合部を用いた、建築スケールのモックアップ架構の設計、及びその試験施工について述べる。モックアップ架構の部材には、実際の製材過程において生じた未利用木材を使用する。モックアップ架構の 3D モデルを図 8 に示す。架構は円筒シェル形状で、間口 5.7m、奥行 4.5m、高さ 2.9m の大きさを有し、岐阜県郡上市の山間部の農地に工作物として設置する。これにより、2 節で示した未利用木材の有効活用の可能性、及び 3 節で示した WAAM 方式金属 3D プリンターの建築・インフラ領域への展開可能性の検証を行う。

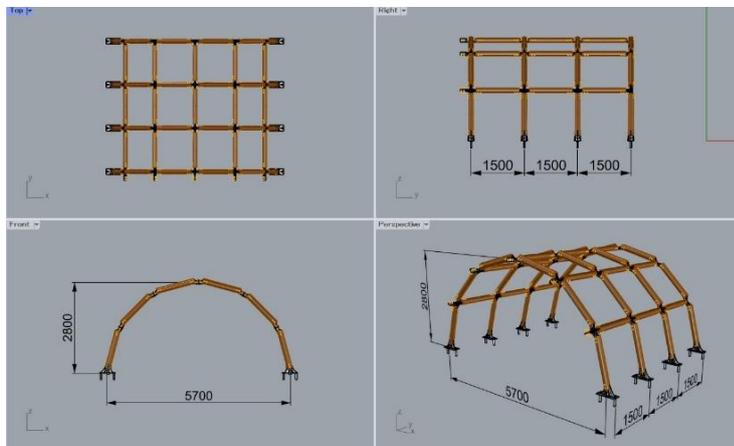
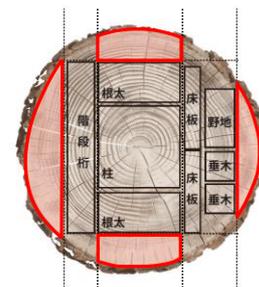


図 8 モックアップ架構の 3D モデル



(a) 木取りの例と三日月型の未利用部(赤粋)



(b) 施工前のヤード仮置き状況
図 9 使用木材

4.1 使用木材

試験施工に使用する木材は、実際に 300~400mm 径の丸太から木取り(丸太から柱や梁・桁といった角材や板材を切り出す製材工程)を行った際に生じた、スギ及びヒノキの三日月型の未利用部位とした(図 9)。このような部材は、背板あるいは三日月と呼ばれ、木材を丸太のまま利用する場合を除いて必ず発生する箇所である。また根本側と梢側で厚みや幅が異なる不整形な形状となるため、建材としての利用価値が低く、多くの場合廃棄されるかチップ化されてしまう部位である。

4.2 接合部 3D モデルの設計・最適化

上述のような不整形な三日月型木材を部材として利用し、架構を構築するため、図 10 の A 矢視図に示すように、2 本の三日月型木材の鋸挽きされたフラット面を向かい合わせ、3D プリントした金属プレートを挟み込んでボルト接合するディテールを考案した。

次に、プレートが各方向から取り付けてくるジョイント中央部分(図 10 領域 B)の形状は、トポロジー最適化により決定した。トポロジー最適化は、構造シミュレーションの繰返しにより、設定した設計領域から不必要な材料を削り、合理的な形状を見出すことができる。省材料と造形時間の短縮を実現できるため 3D プリンティングと相性がよい技術である。

図 11 に、トポロジー最適化の設定条件及び経過を示す。図 11 左端の STEP 3 には、設計条件を合わせて示した。黒点線で示した設計領域の周囲から、木材に挟み込まれたプレートを介して伝達される荷重を想定し、軸力と偏心力を载荷する。設計領域の中央には、施工時に単管で接合部を保持するための円形の空隙を設け、空隙周囲の円筒領域を、荷重伝達を担う支持部とする。材料使用量を設計領域の 25%とし、その中で剛性が最大となる形状を探索する。以上の条件で、密度法に基づくトポロジー最適化⁹⁾を実施した。図 11 に示す通り、最適化ステップが進むごとに、合理的な形状として、円筒領域を囲む星形の形状に徐々に収束していることがわかる。

WAAM 方式金属 3D プリンターは、連続溶接により造形を行うため、オーバーハング(斜め方向の造形)が生じると熔融金属が垂れ、溶接品質の低下を招く。本報で製作する接合部は荷重を伝達する構造部材であるため、接合部の 3 次元形状は、トポロジー最適化で得られた 2 次元形状を押し出した形状を基本として、オーバーハングを最小限とした。接合部モデル形状を図 12 に示す。モックアップ架構

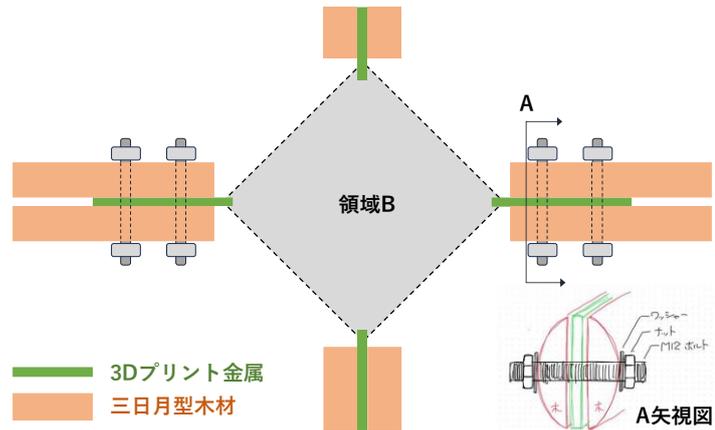


図 10 三日月型木材の接合イメージ

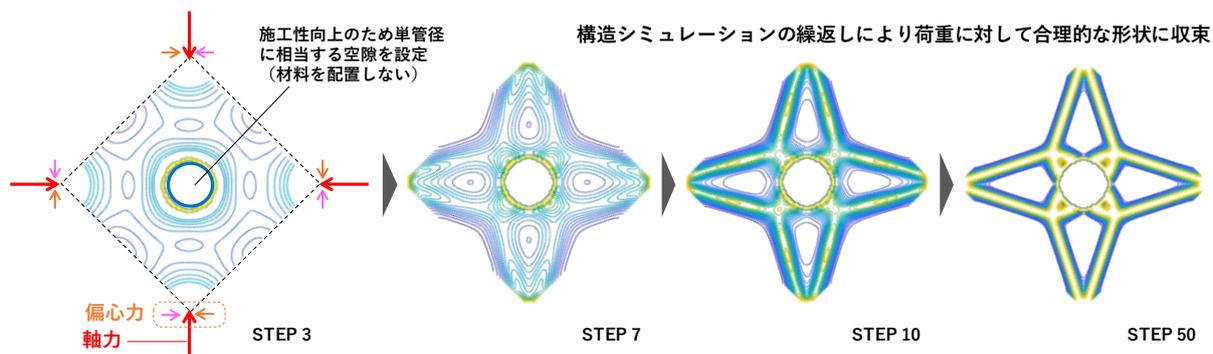


図 11 ジョイント中央部分のトポロジー最適化

の円周方向にはシェル形状を形成するため取り付け部材が 30° の傾きを有し、その直交方向は直線状に繋がるため傾き無しとした。

4.3 基礎 3D モデルの設計

同じく金属 3D プリンターで製作する基礎モデルの詳細を図 13 に示す。造形の基盤となるベースプレートの上部は、接合部と同様に 2 枚の木材に挟み込まれるガセットプレートと、それを支持するリブ材から成る。ベースプレート下部には、2 本の円筒管を造形し、地中に埋め込んだ単管に挿し込むことで基礎を固定するディテールとした。ガセットプレートは、シェル形状を形成するため、鉛直上向きではなく、地面に対して 75° の角度を持つように配置した。

4.4 金属 3D プリンターによる接合部・基礎の造形

接合部及び基礎は、シモダフランジ株式会社（兵庫県相生市）が保有する WAAM 方式 3D プリンターにより造形した。図 8 に示した、円筒シェル形状で、奥行き 3 スパンを持つモックアップ架構を構築するため、接合部モデルを 20 ピース、基礎モデル 8 ピースを製作した。溶接ワイヤには SUS308L を用いた。接合部モデル 1 ピースあたりの造形時間は約 8 時間であった。造形後、所定位置に穴開け加工を施した。製作された部材を図 14 に示す。3D プリントに適した合理的な設計を行ったことで、多数の部材が必要な接合部の製作においても、現実的な時間と工程で製作可能であることがわかった。

4.5 モックアップ架構の施工

モックアップ架構の施工状況を図 15 に示す。はじめに基礎モデルの据付けと仮設足場の組立てを行い、次に接合部モデル中央の穴に単管を通し、仮設足場と接続して、接合部の位置決めを行った。その後三日月型の木材の設置及びボルト締めを行うことで、架構全体をスムーズに施工することができた。竣工状況を図 16 に示す。図 16 右に示す接合部詳細写真からは、金属 3D プリンター製接合部に取

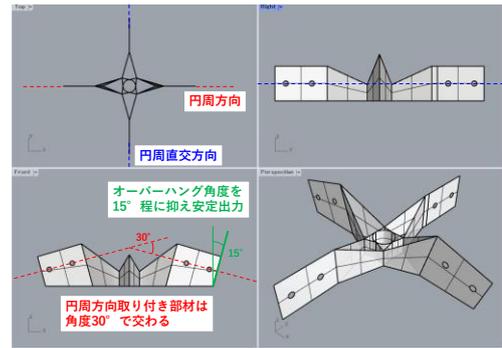


図 12 接合部モデルの 3 次元形状

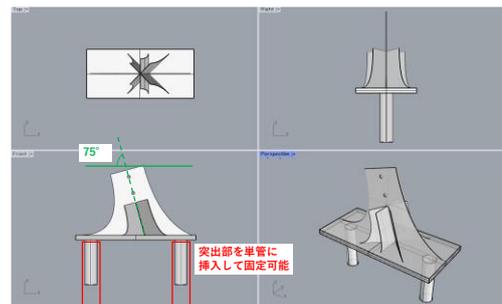


図 13 基礎モデルの 3 次元形状



図 14 部材の製造状況
(上段:接合部モデル, 下段:基礎モデル)



図 15 モックアップ架構の施工状況(左:仮設足場組立て, 中:接合部位置決め, 右:全体仮組状況)



図 16 モックアップ架構の竣工状況(左:全景, 右:接合部詳細)

り付く個々の三日月型木材の不揃いさが見て取れる。ばらつきが大きく、形状が不揃いなため、これまで建材として利用できなかった部材を有効活用し、これまでに無い空間を生み出したものと考えている。

5. まとめと今後の課題 ～よりサーキュラーな建築架構を目指して～

本稿では、金属 3D プリンターで製造したジョイント部材によって、不均質・不整形な木質部材を接合する新たな架構システムについて報告した。実際に WAAM 方式の金属 3D プリンターを用いて 28 ピースのジョイント部材を製造し、不整形な木材を接合したモックアップ架構の試験施工を行った。今後の重点的な取り組み事項として、下記 2 点を挙げる。

1. 金属 3D プリンター製部材の出来形精度確認及び品質確認
2. プリント材料である溶接ワイヤに、スクラップ材を原料とした再生金属を活用

1.により、WAAM 方式金属 3D プリンターを信頼できる建築部材製造手法として確立する。また 2.によって溶接ワイヤも再生金属とすることで、架構全体を循環資源により構築することが可能となる。「山のスクラップ(=未利用木材・間伐材)」と、「都市のスクラップ(金属スクラップ)」でつくる、サーキュラーな建築架構の構築を目指す。適用先についても、外構・内外装部材から仮設現場事務所、引いては実際の建築構造物へと順次展開していきたいと考える。

【参考文献】

- 1) 林野庁: 脱炭素社会の実現に資する等のための建築物等における木材の利用の促進に関する法律(通称:都市(まち)の木造化推進法, 2021.10
- 2) 恒次祐子, 外崎真理雄: 木材利用による CO2 削減効果の評価モデルの開発と日本への適用, 平成 18 年度研究成果選集, 森林総合研究所, 2006.
- 3) 恒次祐子, 外崎真理雄: 2050 年までの木材利用による CO2 削減効果シミュレーション, 平成 21 年度研究成果選集, 森林総合研究所, 2009.
- 4) 林野庁: 森林・林業基本計画, 2016.5
- 5) Köhler, Markus et.al.: Wire and Arc Additive Manufacturing of Aluminum Components, Metals, 9. 608., 2019.
- 6) MX3D Takenaka Connector: <https://mx3d.com/industries/construction/connector-for-takenaka/>, Accessed Aug. 20th, 2024.
- 7) 竹中工務店名古屋支店 名古屋センタービル改修, 新建築, pp. 78-83, Oct. 2021.
- 8) 木下拓也: 金属 3D プリントによるステンレス製大型ベンチの製作—竹中工務店名古屋支店改修—, 鋼構造協会誌 JSSC, No. 52, 2023. Winter.
- 9) Sigmund, Ole: A 99 line topology optimization code written in Matlab, Structural Multidisciplinary Optimization, Vol. 21, Issue 2, pp. 120-127, 2001.