

令和 5 年 9 月 25 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02312

研究課題名（和文）3Dプリント仕口を用いたセルフビルド実験住宅

研究課題名（英文）Self Built Experimental House Using 3D Printed Joint

研究代表者

今井 公太郎（IMAI, Kotaro）

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：20262123

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では実用化が進む3Dプリント（付加製造）技術を用いて建築の仕口（ジョイント）を製作し、世界初のアルミ合金製3Dプリント仕口（Additively manufactured Joint: AMJ）を用いたセルフビルド建築を実現した。そのために、AMJの利用を前提にした独自の幾何学的構法システムと、用途を満足するフレーム内部空間の建築計画的把握手法を構築し、独自の乾式外壁システムも開発した上で、アルミ合金によるAMJの強度把握により3Dプリント仕口の建材（構造材）への応用の可能性を明らかにした。そして実物大のプロトタイプ建造を通じて新しい構法システムの施工性を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

3Dプリント（Additive Manufacturing: 付加製造技術）による建築の研究は建物全体を出力しようとするものが多いが、本研究は仕口に限定して3Dプリントを部分に適用することで、すでにある一般的な市販のAM装置を用いている点に新規性がある。技術的にこれを可能にするために、独自の幾何学的構法システムを開発し実装している。そして建築の形態の情報が集約された仕口と標準的なパーツとの自然な融合という新しい建築の課題を発見的に明らかにしながら、将来の展望として移動可能で自由なライフスタイルを可能にする安価な住宅サービスの普及への応用の可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：In this study, we fabricated architectural joints using 3D printing (additively manufacturing technology), which is now being put to practical use, and realized the world's first self-built architecture using aluminum alloy 3D printed joints (Additively manufactured Joint: AMJ). For this purpose, we developed an original geometric construction system based on the use of AMJs, a method for architectural planning the interior space of the frame that satisfies the intended use, an original exterior wall dry construction system and clarified the possibility of applying 3D printed joints to building materials (structural materials) by testing the strength of AMJs made of aluminum alloys. The workability of the new construction system was evaluated through the construction of a full-scale prototype.

研究分野：建築計画・設計 都市計画

キーワード：3Dプリント 仕口 ジョイント セルフビルド プロトタイプ

1. 研究開始当初の背景

日本の住生活を取り巻く最大の問題は、住環境コストがライフコストの多くを占め、人々の生活の自由度を下げていることである。そうした状況において、住宅の生産の高度化とりわけ 3D プリント（付加製造技術：Additive Manufacturing）を用いた建築技術に注目が集まっている。既往の研究としては、「大型の 3D プリント機器（AM 装置）からセメント系の材料を射出し住宅全体を製造するもの[文献①]」「現場では製作できない複雑な部材を AM 装置から製造し建築物に当てはめるもの[文献②]」「月面など極限環境にて AM 装置から建設資材を製造し建設を行うもの[文献③]」等のカテゴリが挙げられる。こうした既往研究は建築全体を 3D プリントすることを前提にしているが、AM 装置自体の高度な開発への要請が、一般への普及の妨げになっている。そこで本研究では建築の仕口（ジョイント）に着目し、これに 3D プリントを限定して用いることで、一般的に流通している AM 装置を用いた建築の提案を可能にする。

2. 研究の目的

本研究では、低コストで扱いやすいアルミニウム合金粉末による市販の金属製 AM 装置による 3D プリントを用いて AM 仕口（AM ジョイント：AMJ）を製作し、流通材と組み合わせることで大部分の工程をセルフビルド可能な住宅の建築構法システムを開発し、そのフィージビリティを実証・評価することを目的とする。この建築構法システムは、複雑な建築形状の情報を AMJ の形に集約し、AM と従来の建築技術の自然な融合を図る。この構法より、ユーザーが自分の力で建物をカスタマイズし、組み立てることができるようになる。さらに、梁や外壁パネルの単純化・標準化により、安価で単純な流通材と組み合わせ、建設期間とコストを削減することが可能になる。そして安全で簡便な建設が可能になるだけでなく、ライフスタイルの変遷に伴う住環境の改善を、個人の手による増改築により実現できる。

3. 研究の方法

セルフビルドと AMJ のための、独自の幾何学的構法システムを考案し、それに基づいたプロトタイプの建造により実現性を確認する。まず、この構法システムの全体の 3D モデルの幾何学を制御するための BIM アルゴリズムを開発・実装し、その中で AMJ の 3D モデルも自動出力できるようにする。そして AMJ を組み込んだ新たな構法システムの開発を行う。次に、アルミニウム合金を用いた AMJ の破壊試験の実施により構造的フィージビリティを実証的に確認する。そして自動で生成された AMJ を用いたプロトタイプの試験的建造により構法システムを評価し課題を明らかにする。そのうえで、住宅プロトタイプの構法的・構造的な有用性を検証し、様々な観点で評価を行い、さらなる課題を抽出する。特に AM 技術が圧倒的な軽量化を実現し、使い勝手や適用性を向上させる可能性を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 独自の幾何学的構法システムと形態の幾何学的安定性の把握分析

本研究に先立ち考案した幾何学的構法システム（特開 2020-66951）に基づき、頂点の座標と仕口の形態を幾何学的かつ構造的に BIM 上で把握するためのアルゴリズムを開発し実装した。提案する幾何学システムの計画・制御のための技術的手法を明らかにした。これにより、建築物の形状の決定から AMJ の 3D モデル作成までの一連の工程を自動処理できるようになり、建築物の形状のカスタマイズにかかる時間やコストを削減することを可能にした。

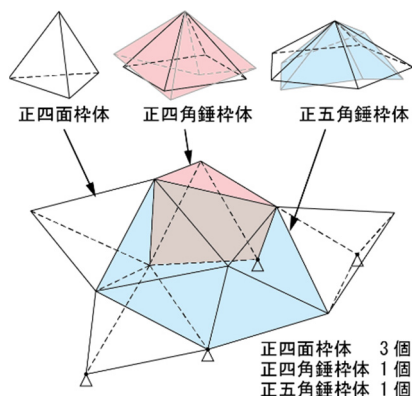


図1 幾何学的構法システム

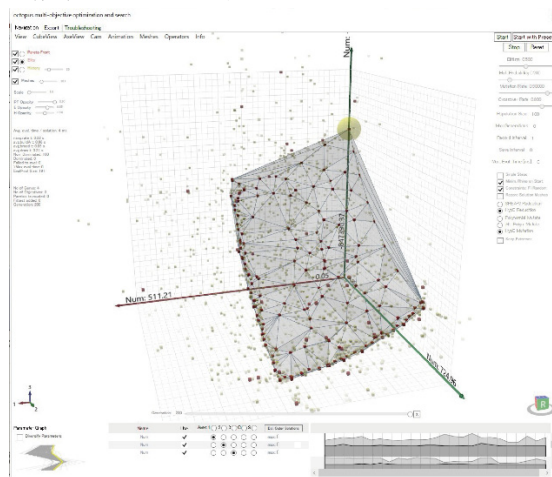


図2 AMJの形状決定に用いたツール画面

ツール内で接地条件・部材同士の干渉・空間的広がりなどを評価し、全体形状を決定する。

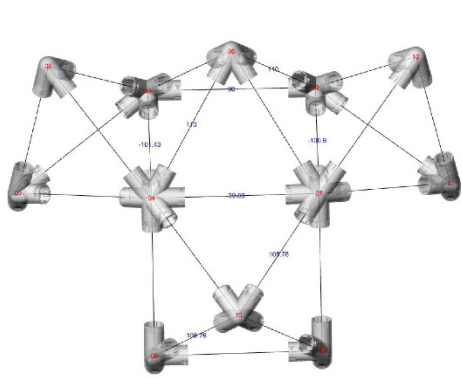


図3 フレームを構成するAMJの3Dモデル一覧

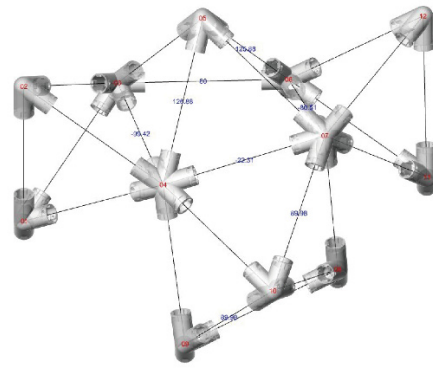


図4 角度を変化させて捻りを加え形状を変更した例

正四面体, 正四角錐柱体, 正五角錐柱体を組み合わせたリンケージを用いて, その設置点の位置のコントロールによって全体形状を制御し, その構造安定性を確認するアルゴリズムと, 用途による内部空間の要請, 内部化される面積, 部材の角度の均斉度などいくつかのパラメトリックな指標により, リンケージの3D線データの幾何学を決定する方法を構築した.

ジョイント群3Dモデルは線データの変形に追従して自動でモデリングされるプログラムで生成される. それらのデータを直接3Dプリント製造することで, 建物の形状変更に対応できる.

(2) 用途を満足するフレーム内部空間の把握手法の構築

内部空間の要件を球で表現し, 多面体フレームの内接球の軌跡上に配置された極大球を用いて実現可能な解を決定する手順により, フレームの全体形状を制御するパラメトリックな手法を整備した. これにより, 必要な機能を平面上に配置し, 全体を包絡する多面体の外形の形状の把握を可能にし, ささまざまなフレームの条件において多目的最適な形状を求めることができる.

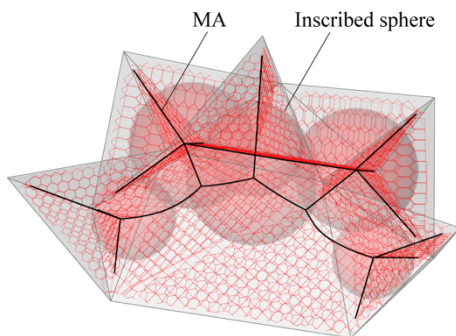


図5 多面体の内接球の極大球と中心点の軌跡

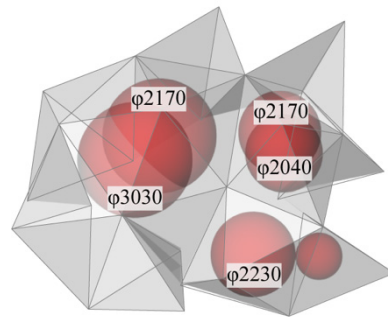


図6 極大球の分布 (初期値)

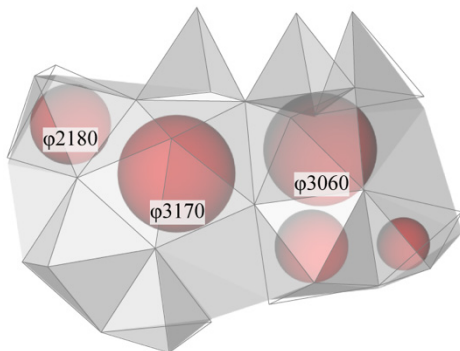


図7 面積を最大化した実行解

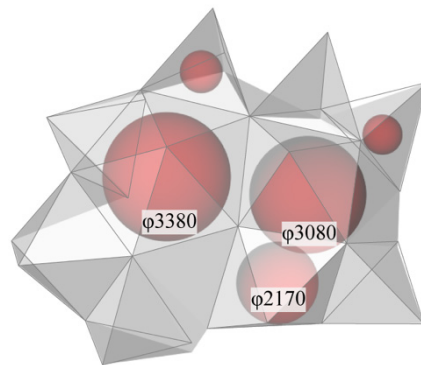


図8 線材間の角度の偏りをなくし均一化した実行解

(3) 独自の乾式構法システム・外壁システムの開発

3D プリントジョイント (AMJ) と他の標準的な部材を組み合わせた新しい乾式構法システムを開発した。独自の十字型の嵌合システムにより、建設時のスピートアップを図ることが可能である。安価で軽量、適度な強度があることからアルミ合金を AM の素材として採用している。また、標準化されたアルミのサブ仕口を組み合わせることで、標準部材との連続性を担保しつつ、非常に高精度かつ、構造と仕上げを自然に融合したものとすることができる。



図9 AM仕口・サブ仕口と外壁パネル

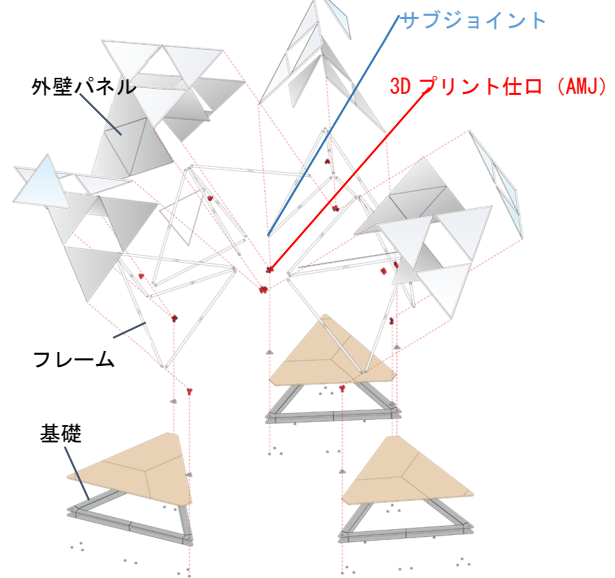


図10 構法システムの全体構成とAMJ

(4) アルミ合金による3Dプリント仕口 (AMJ) の強度把握

アルミニウム合金製 AMJ の建築材料としての構造適用性を確認するために、金属 AM 装置で製作した接合部の構造部材としての性能を曲げ・引張破壊試験で検証し、AMJ の強度や安全性を確認するとともに、構造部材として使用した場合の今後の改善点を明らかにした。また、実際に試作品を製作し、プロトタイプ建造において適用可能性を確認した。強度について、AM アルミニウム合金は公称値より低い性能であったが、強度制御と慎重な加熱処理により構造材料として使用することが可能であることが明らかになった。



図11 曲げ破壊実験中のAMJ

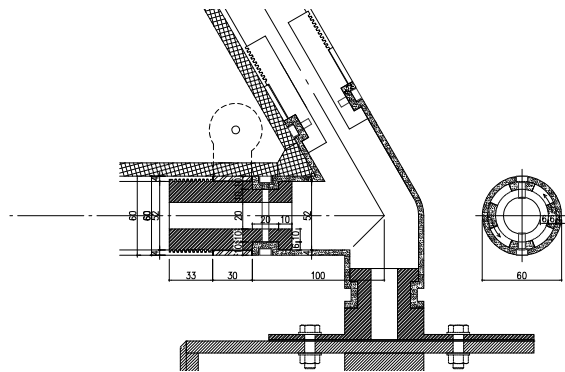


図12 AM仕口・サブ仕口周辺の断面詳細

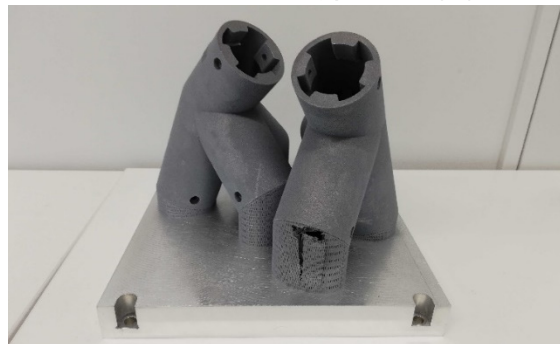


図13 AM造形したアルミ製仕口 (AMJ)

(5) 実物大のプロトタイプ建造と施工性の評価

実物大のプロトタイプを建造して実現性を確認し、具体的な仕口のデザインやパネルの取り付け方法について、易施工性、安定性などの観点で有効性を評価した。30 m²程度の実物大プロトタイプについては、4名程度の手作業で重機無しで外壁パネルも含めて8時間程度で組み立てが可能であること、最も時間がかかるのは意外にも墨出し作業であることが明らかになった。構法としてはAMJの精度と他の削りだしのアルミの精度が独自の十字型の筋合システムによるアソビにより易施工性が担保できることが確認された。また乾式の外壁パネルとフレームの止水性について改善すべき点はあるもののある程度確保できることが確認された。

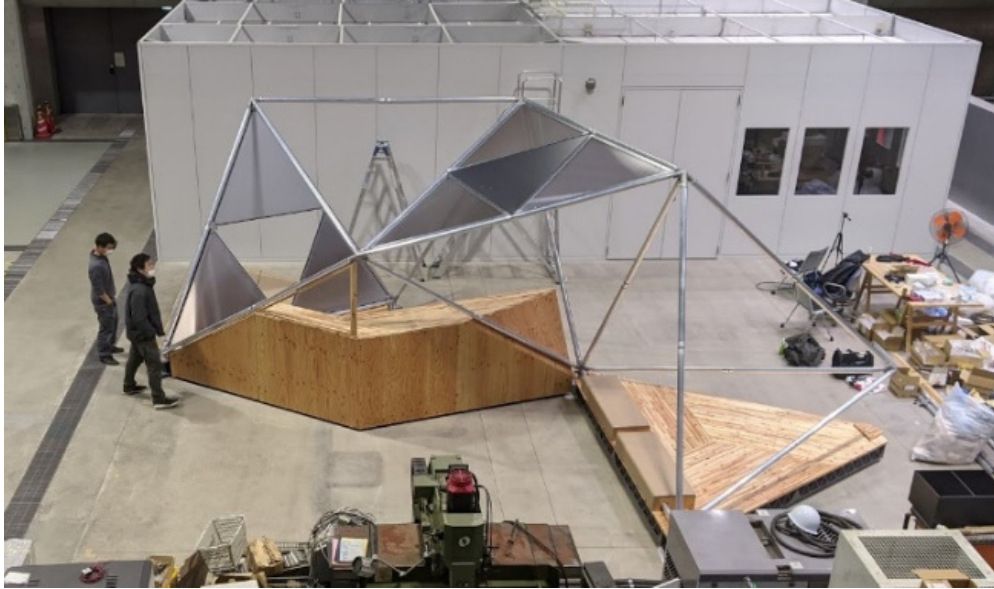


図 14 実物大プロトタイプの制作風景， 柏大空間実験室にて



図 15 AMJのディテール

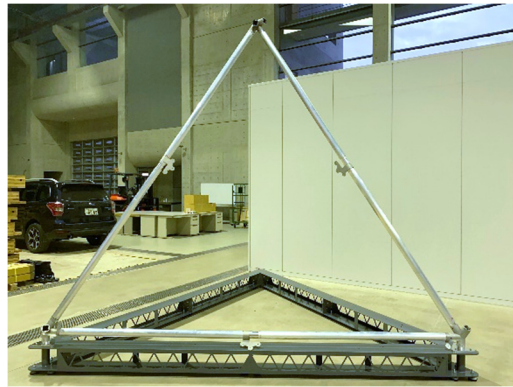


図 16 基礎に固定された正三角形の基本フレーム



図 17 完成したフレーム

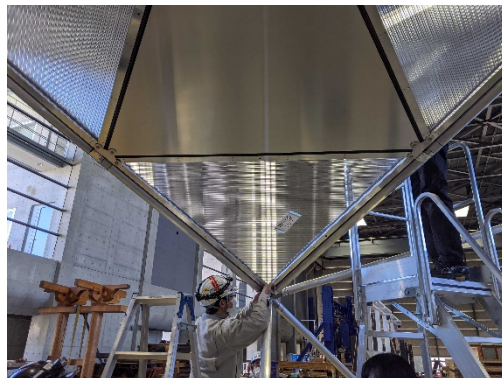


図 18 完全乾式工法による屋根パネル

<引用文献>

- ① “we print buildings”, Apis Cor, <http://apis-cor.com/>, 2017.
- ② “The Institute for Advanced Architecture of Catalonia designs the first 3D printed bridge in the world” Areti Markopoulou, <https://iaac.net/institute-advanced-architecture-catalonia-designs-first-3d-printed-bridge-world/>, Iaac, 2017.
- ③ “Lunar Outpost Design”, Giovanni Cesaretti, https://www.fosterandpartners.com/media/2634652/lunar_outpost_design_foster_and_partners.pdf, Foster + Partners, 2014.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 今井公太郎	4. 巻 72-5
2. 論文標題 自由なライフスタイルを支える工学	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 生産研究	6. 最初と最後の頁 349-353
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11188/sei_sankenkyu.72.349	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 今井公太郎・伊東優・国枝歆・山口大翔	4. 巻 2020
2. 論文標題 3Dプリント（付加製造技術）による仕口を用いたセルフビルド実験住宅 その1 幾何学システムの概要と効用	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集・建築デザイン発表梗概集(CD-ROM)	6. 最初と最後の頁 1249-1250
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 山口大翔・今井公太郎・伊東優・国枝歆	4. 巻 2020
2. 論文標題 3Dプリント（付加製造技術）による仕口を用いたセルフビルド実験住宅 その2 幾何学システムの安定性の検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集・建築デザイン発表梗概集(CD-ROM)	6. 最初と最後の頁 1251-1252
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 山口大翔・今井公太郎・伊東優・国枝歆・福島佳浩	4. 巻 2021
2. 論文標題 3Dプリント（付加製造技術）による仕口を用いたセルフビルド実験住宅 その3 形状の実行可能解とその導出プロセス	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集・建築デザイン発表梗概集(CD-ROM)	6. 最初と最後の頁 423-424
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 今井公太郎・山口大翔・伊東優・国枝歆・福島佳浩	4. 巻 2021
2. 論文標題 3Dプリント（付加製造技術）による仕口を用いたセルフビルド実験住宅3D プリント（付加製造技術）による仕口を用いたセルフビルド実験住宅 その4 構法的特長とその効用	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集・建築デザイン発表梗概集(CD-ROM)	6. 最初と最後の頁 425-426
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 福島佳浩・今井公太郎・伊東優・国枝歆・山口大翔	4. 巻 2021
2. 論文標題 3Dプリント（付加製造技術）による仕口を用いたセルフビルド実験住宅 その5 金属3Dプリント用アルミニウム合金の機械的性質	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集・建築デザイン発表梗概集(CD-ROM)	6. 最初と最後の頁 427-428
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 今井 公太郎・伊東 優・国枝 歆・山口大翔・佐藤 淳・福島 佳浩	4. 巻 2021-6
2. 論文標題 「PENTA-HARD」	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 新建築	6. 最初と最後の頁 154-161
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 今井公太郎・伊東優・国枝歆・山口大翔
2. 発表標題 3Dプリント（付加製造技術）による仕口を用いたセルフビルド実験住宅 その1 幾何学システムの概要と効用
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山口大翔・今井公太郎・伊東優・国枝歆
2. 発表標題 3Dプリント（付加製造技術）による仕口を用いたセルフビルド実験住宅 その2 幾何学システムの安定性の検討
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山口大翔・今井公太郎・伊東優・国枝歆
2. 発表標題 3Dプリント（付加製造技術）による仕口を用いたセルフビルド実験住宅 その3 形状の実行可能解とその導出プロセス
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今井公太郎・山口大翔・伊東優・国枝歆・福島佳浩
2. 発表標題 3Dプリント（付加製造技術）による仕口を用いたセルフビルド実験住宅3D プリント（付加製造技術）による仕口を用いたセルフビルド実験住宅 その4 構法的特長とその効用
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福島佳浩・今井公太郎・伊東優・国枝歆・山口大翔
2. 発表標題 3Dプリント（付加製造技術）による仕口を用いたセルフビルド実験住宅 その5 金属3Dプリント用アルミニウム合金の機械的性質
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口大翔、今井公太郎、伊東優、国枝歆、福島佳浩
2. 発表標題 3D プリント(付加製造技術)によるジョイントを用いたセルフビルド建築の開発プロセス
3. 学会等名 Designシンポジウム2021
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	本間 健太郎 (HONMA Kentaro) (90633371)	東京大学・生産技術研究所・准教授 (12601)	
研究分担者	伊東 優 (ITO Yu) (90839523)	東京大学・生産技術研究所・特任研究員 (12601)	
研究分担者	国枝 歆 (KUNIEDA Kan) (80839522)	東京大学・生産技術研究所・特任研究員 (12601)	
研究分担者	佐藤 淳 (SATO Jun) (50587946)	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授 (12601)	
研究分担者	福島 佳浩 (FUKUSHIMA Yoshihiro) (60883105)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・助教 (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	山口 大翔 (YAMAGUCHI Hiroto)	東京大学・工学系研究科・大学院生（博士課程） (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関