

東京大学大学院工学系研究科
建築学専攻

2021 年度
修 士 論 文

デジタル・ファブリケーションを用いた
道具の制作手法および
設計・制作プロセスに関する研究

2022 年 1 月 17 日提出
指導教員 権藤 智之 特任准教授

学籍番号 37-196068

淡 路 広 喜

目次

1 章 序論.....	3
1. 1 背景.....	4
(1) 設計者の「道具の制作」による自由度の高い建築生産の実現.....	4
(2) デジタル・ファブリケーションの現状の課題	9
(3) 道具としてのデジタル・ファブリケーション	12
1. 2 目的.....	14
1. 3 方法・構成.....	14
1. 4 用語の定義.....	15
(1) デジタル・ファブリケーション	15
(2) 道具とその関連要素.....	16
2 章 先行研究	19
2. 1 デジタル・ファブリケーションの先行研究.....	20
2. 2 道具の先行研究.....	20
(1) 道具に関する言説	20
(2) 建築生産の道具に関する先行研究.....	23
(3) 道具の分析手法に関する先行研究.....	24
3 章 近年のデジタル・ファブリケーションにおける道具	27
3. 1 分析の手法.....	28
(1) 事例の収集	28
(2) 分類の項目・分析の内容	34
3. 2 事例の概要.....	35
3. 3 分類項目	36
(1) 素材	36
(2) 動作	39
(3) 道具の制作手法.....	40
(4) 汎用性	45
(5) 操作者に必要な技能.....	48
3. 4 二軸分析	56
(1) 道具の制作手法と制作物のスケール	56
(2) 道具の制作手法と汎用性	58
(3) 道具の制作手法と必要な技能	62
(4) 道具の制作手法と動作	64
3. 5 小結.....	65
4 章 建築生産にみられる「道具の拡張」	67

4.1 調査事例の概要	68
4.2 道具に必要な技能	71
4.3 道具の開発コスト	73
4.4 設計・制作プロセス	75
4.5 小結	79
5 章 開発.....	80
5.1 開発の概要	81
(1) デジタル・ファブリケーションを用いた弾性曲げの可能性.....	81
(2) 制作物の概要.....	83
(3) 制作物の自由度の評価方法.....	84
5.2 「道具の拡張」の具体的手法.....	85
5.3 アジャイル型の設計・制作プロセスの実践.....	87
5.4 最終的な制作物.....	111
(1) 形態・素材・道具の決定	111
(2) パラメトリックな設計手法.....	115
(3) 構造解析.....	118
(4) 道具の制作	121
(5) 加工	123
(6) 組立準備.....	124
(7) 屋外での組立.....	126
(8) 弾性曲げシミュレーションを活用した全体形状の修正.....	134
(9) 課題	138
5.5 小結	140
6 章 考察.....	142
6.1 モデル化できなかった要素	143
(1) 精度の問題	143
(2) 接合部の設計.....	143
6.2 ワイヤー巻き取り機の課題.....	147
6.3 建築スケールの構造物への拡張可能性.....	149
6.4 素材のばらつきに対応する技能.....	151
7 章 結論・今後の課題.....	153
参考文献	156
謝辞.....	169
資料.....	171

1 章 序論

1. 1 背景

(1) 設計者の「道具の制作」による自由度の高い建築生産の実現

従来の建築生産に対する設計者の役割は、剣持の支配型・選択型という設計者の 2 分法に見られるように¹、外部にある生産システムを前提として主体的な介入を試みるか否かと言った視点が一般的であった。

近年では、デジタル技術の発展によって、高度な形状操作を用いた設計や、3D プリンター等によってこれを直接的に製造するデジタル・ファブリケーションに注目が集まり、建築分野でも各地で応用例が見られるようになった。デジタル・ファブリケーションを設計者が使いこなすことにより、設計データから直接物質として出力することができれば、設計者が生産システムを外部にあるものとしてとらえるのではなく、設計者が直接生産にかかわることができる可能性がある。M. カルポは「デジタル・アーキテクトは今日、デザインすることと製作することを同時に行うようになりつつある²」と述べており、デジタル・ファブリケーションによって設計者の生産システムに対する関係性が根本的に変わりうることを示唆している。

建築分野においてデジタル・ファブリケーションが注目を集める理由の一つは、デザインと生産がシームレスになり、設計者が直接生産に関わる回路を形成できると考えられるためである。かつて、ジャン・プルーヴェが自ら工場を持ち、自由度の高い設計・生産行為を展開したように、外部の工作機械であっても設計情報を元に直接的な加工を行えば、生産手段が外部にあることのデメリットなく、より自らが望む制作物を具現化しやすいと考えられている³。マリオ・カルポが「3D プリンティング、3D スキャニング、そしてリバーズ・モデリングによってすでに、ひとつの連続したデザインと生産のプロセスを心に描くことが可能になっている⁴」と述べているように、デジタル・ファブリケーションによって設計者が生産に接続し、設計から制作を連続的に行えるプロセスによって、設計者が思い描いた理想を実体化できるのではないかと期待されている。A. メンゲスらは、現状の建築生産においては設計側は完成されたデザインを一方的に引き渡し、施工側は不明瞭な製作限界を提示しているとして、Production immanent design tool (生産内包型デザインツール)と呼ばれる形態データからロボットの加工データを自動的に抽出できる環境を考案している⁵。この生産内包型デザインツールのコンセプトを唱えている A. メンゲスは、パ

¹ 剣持りょう、規格構成材建築への出発、綜建築研究所、1974

² マリオ・カルポ、美濃部幸朗訳、『アルファベットそしてアルゴリズム』、鹿島出版会、2014、p.67

³ 山名善之、ジャン・プルーヴェの工場製・組立住宅における実験的試み、『10+1』No.41、2005、pp.90-97

⁴ マリオ・カルポ、前掲書、p.53

⁵ 竹中司、岡部文「ロボットはコンピュータの夢をかたちにするか？ 2」、GA JAPAN 129

ラメトリックに設計した形態の制作可能範囲を可視化するような試みも行っている（図 1）。これにより、設計者が設計と制作を一体的なプロセスとしてとらえ、施工側の不明瞭な製作限界に縛られることのない、より自由度の高い制作物を実現できるような建築生産のあり方を目指しているといえるだろう。

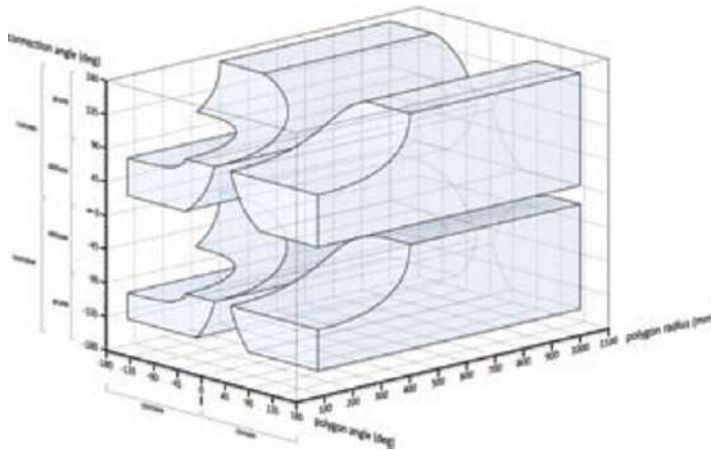


図 1 A. メンゲスによる制作可能範囲の図式化⁶

このように、デジタル・ファブリケーションは設計者にとって生産手段を身近に引き寄せる可能性を秘めている。一方で、デジタル・ファブリケーションに使われる機械そのものに対して設計者が創作的に関わることは難しくなっているともいえよう。例えば、3D プリンターであれば適切な情報を入力すれば適切な形状が出力される。当然、設計者にはプログラム等、機械のために必要な知識を身につけなければならない。しかし、その形状を実現したのは 3D プリンターの能力が高いためであって、設計者は設計能力は活用されたとしても製作段階において自らの能力を発揮したり、何か主体的に工夫を行うといった関与はしていない。別の見方をすれば、用いる機械（道具）を定めた時点で、それによって加工が可能な寸法や形状は定められており、設計者はその中で自由度の高い製作を行う。

このようにデジタル・ファブリケーションにおいて、機械自体の機能を設計者が拡張的に用いることは難しい。こうした問題意識にもとづき、近年のデジタル・ファブリケーションの事例では、機械を含む広い意味での道具を設計者が設計・制作する動きが見られる。ETH や Stuttgart ICD といったデジタル・ファブリケーション施設を保持した教育機関が中心となり、産業用ロボットのエンドエフェクターを制作することで、新規性の高い形態・素材・構法を開発するような動きがみられる。Rock Print Pavilion (Gramazio Kohler Research, 2018) は小石を糸で補強しながら積層させるという全く新しい工法を実現する

号、2014、P.193

⁶ Menges, Achim. "Morphospaces of robotic fabrication." *Rob/ Arch 2012*. Springer, Vienna, 2013, p.42

エンドエフェクターを開発し、元の素材へと解体可能な不定形の柱状の構造物を制作するというプロジェクトである⁷ (図 2)。また、産業用ロボットを用いずにまったく独自の道具を開発している事例も見られる。STIK Pavilion (T_ADS, 2014)では、木材を設置してハンドルを回すと、木材に接着剤を付着させながら木材が積まれていくような「ディスペンサー」と呼ばれる道具を開発している⁸ (図 3)。



図 2 Rock Print Pavilion (Gramazio Kohler Research, 2018)⁹

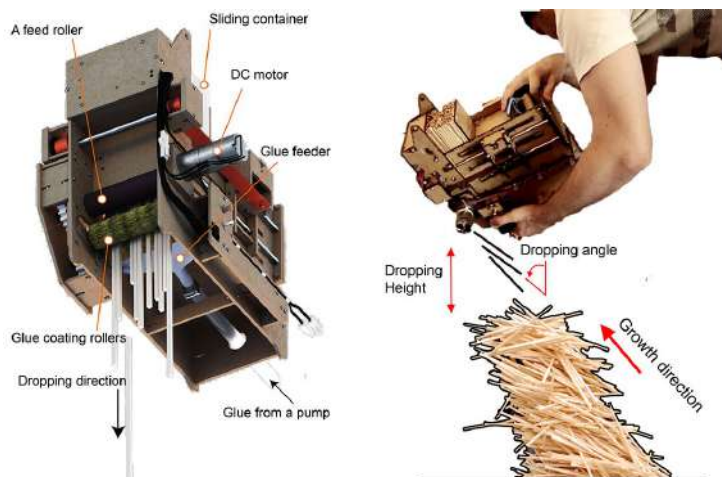


図 3 STIK Pavilion (T_ADS, 2014)のディスペンサー¹⁰

⁷ Aejmelaeus-Lindström, Petrus, et al. "Rock Print Pavilion: Robotically fabricating architecture from rock and string." *Construction Robotics 4.1*, 2020, pp.97-113.

⁸ Hironori Yoshida, et al., Architecture-scale human-assisted additive manufacturing, *ACM Transactions on Graphics*, no. 88, 2015

⁹ Aejmelaeus-Lindström, Petrus, et al., op. cit., p.107

電動工具以前の建築における道具は、設計者や施工者が主体的に製作したり、工夫したりして使いこなすものであった。例えば、鉋や鑿に見られるように、つくられる建築が精緻化すると必要とされる道具も精緻化、細分化してきた。また、大工はこれらの道具を作業の度に微調整して用いていた。大工道具の研究者である村松は素材に合わせて「道具の制作」を行うことの重要性について次のように述べている。

針葉樹は逆目が立ちやすい。それを防ぐために二枚刃のカンナが工夫され、右使い、左使いのペア（対）になった道具も多い。そうした工夫を前提にして、カンナの刃もノミ（鑿）の刃も、あるいはノコギリの歯のアサリも、相手にする気の種類や物性に適わせて変えられる。ノコギリのアサリのごときは、季節の乾湿の度にまで適わせられる。硬い木や乾いた季節にはアサリは小さく、逆な場合は大きくが、その原則である。

大工道具に限らない。そのほかの道具にもこうした工夫が必ずある。モノに合わせ人に適わせているからである。それが人によって千差万別のモノへの適用の妙を発揮する。物や材料を均質化して、機械生産に適わせてしまう強引な硬さと、それはまったく正反対である¹¹。

村松は材料、操作者、周囲の環境といった個別性に適応して生産を行うために道具をつくり、調整することの重要性を指摘している。さらに、そのような道具に対する工夫は大工道具以外のすべての道具について重要であると述べている。

別の例でブルネレスキは、サンタ・マリア・デル・フィオーレの施工にあたって、揚重等のために新たな機械を開発している¹²。J. プルーヴェは図面作成と並行して手持ちの工作機械に内在する可能性を最大限に引き出すことを考えるというように、経済的な観点も含めて生産物と道具を同時に思考することで、実験的な試みを多数具現化している¹³。例えば、グランジュ・ブランシュ病院のエレベーター・キャビンの設計・制作においては、折曲げ薄鋼板による軽い空間構成とその薄鋼板の製造を機械化する手法を同時に開発している¹⁴。設計者による「道具の制作」は、設計者が思い描いた理想を具現化し、自由度の

¹⁰ Hironori Yoshida, et al., op. cit.

¹¹ 村松貞次郎、『道具と手仕事』、岩波書店、2014、p.34

¹² ロス・キング著、田辺希久子訳『天才建築家 ブルネレスキ フィレンツェ・花のドームはいかにして建設されたか』、東京書籍、2002、pp.89-106

¹³ 山名善之、前掲書、pp.90-97

¹⁴ ヴィトラ・デザイン・ミュージアム、慶応義塾大学 DMF 企画、カトリーヌ・デュモン・ダヨ、ブルーノ・ライシュリン監修、山名義之日本語版監修『ジャン・プルーヴェ』、

高い建築生産を行うための手段であると考えられる。このようなかつての建築家たちが行ってきたような「道具の制作」は機械化や設計施工の分離に伴って失われつつあるが¹⁵、近年の産業用ロボットの利用をはじめとする独自の道具の開発によって、「道具の制作」による自由度の高い制作物の実現が再び行われ始めているといえるだろう。

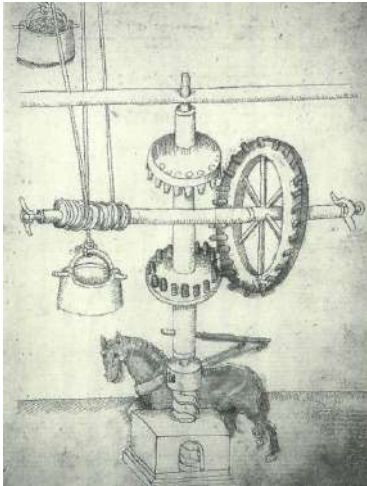


図4 ブルネレスキによる揚重機の開発¹⁶

創造的な生産活動を行う上でのこのような「道具を制作する」行為の重要性は建築以外の分野でも指摘されている。緒方は「道具を制作する」行為について次のように述べている。

何かをつくるときに使う人の立場に立つことは必要不可欠だが、それもまた行き過ぎれば、つくる人と使う人を暗黙のうちに分断し、使う人自身がつくったり、つくりかえたりできる可能性を排除し、テクノロジーをブラックボックス化してしまうことにもつながる。未来のテクノロジーは、「使える」道具であるだけでなく、「つくれる」道具や「つくりかえられる」道具でもあるべきだろう¹⁷。

TOTO 出版、2004、p. 128

¹⁵ 村松貞二郎、道具と機械と人間の歴史的関係、日本機械学会誌、76 巻 654 号、日本機械学会、1973

¹⁶ ロス・キング著、前掲書、p. 93

¹⁷ 緒方壽人『コンヴィヴィアル・テクノロジー 人間とテクノロジーが共に生きる社会へ』、ビー・エヌ・エヌ、2021、pp.195-196

設計と生産を分離して生産をブラックボックス化するのではなく、設計者が自ら道具を制作し、調整し、使いこなすことで自由度の高い建築生産を行っていくことができると考えられる。そしてデジタル・ファブリケーションは設計者が生産に接続するための道具となり、道具の制作を可能にするツールとなる。また、B. コロミーナらは道具を制作することの重要性について次のように述べている。

道具は人間がもたらした成果なのではなく、人間のための新しい機会となる。そうした道具がもたらす結果への、まさしく人間的な意図と期待は、道具を作る行為の中で生じる。人間の意図は道具を使うことよりも、道具を制作することで引き起こされる¹⁸。

ある決まった目的のために既定の道具を選んで使うというよりも、道具を制作することで新たな方向性が導き出され、創造的で発見的な生産活動を行うことができると指摘している。これは建築生産についても同様のことが言えると考えられる。

以上のように、デジタル・ファブリケーションは設計者が生産に接続することを可能にし、設計と生産が連続的につながるのではないかと期待されている。特に、設計者による「道具の制作」によって、設計者が自身の理想を具現化するための道具を自ら開発し、自由度の高い建築生産を行うことができる可能性がある。「道具の制作」は建築生産に限らず、創造的な生産活動をする上で重要な概念である。この「道具を制作する」という行為は、近代における設計・施工の分離によって失われたが、デジタル・ファブリケーションという新たな道具の出現によって再び可能になりつつある。

(2) デジタル・ファブリケーションの現状の課題

ここまで見てきたように、近年のデジタル・ファブリケーションの事例の多くは、設計者による「道具の制作」を行いながら自由度の高い形態・素材の実現することに重点を置いている。しかしながら、これらのプロジェクトのほとんどは建築生産に適用される前段階の実験的なプロジェクトにとどまっており、より広い実践につながりえていない。多くの場合、現状のデジタル・ファブリケーションで実践されている「道具の制作」は汎用性に欠け、巨大な建築市場に対してインパクトを持つモノとはなりえていない。一方で、在来木造住宅のプレカットのように、大量生産においてデジタル・ファブリケーションを実現した事例も見られるが、多くの場合、自由度の高い設計を実現するといった目的ではなく、コスト削減、精度向上、工期短縮といった生産性の向上に主眼が置かれている。

¹⁸ ビアトリス・コロミーナ、マーク・ウィグリー著、牧尾晴喜訳『我々は人間なのか？ーデザインと人間をめぐる考古学的覚書き』、ビー・エヌ・エヌ新社、2017、p.57

建築生産においてデジタル・ファブリケーションがインパクトを与えられていない原因の一つとして、「道具の制作」を行うコストが非常に高いという点が挙げられる。J. Buchli は現状のデジタル・ファブリケーションの問題点について次のように述べている。

ロボットは複雑な機械であり、設計から構築、プログラミング、運用、保守に至るまで、ライフサイクルのすべての段階で深い専門知識が必要とされる。そのため、建築のような少量多品種の領域では、非常に大きなオーバーヘッドが発生し、これらの投資やコストを大量生産の際の有利なコストスケーリングで相殺することができない。建築などの特定の分野で複合型ロボット技術を使えるようにするには、このオーバーヘッドを大幅に低減する必要がある。そのためには、設計からソフトウェアまで、汎用性が高く、モジュール化され、再利用可能なソリューションを提供することが必要である¹⁹。

想定した形態・素材を実現するためのロボットを一から開発するには高度な専門技能を必要とし、非常に高い開発コストがかかるということがわかる。建築は一品生産的な側面が強いため、開発したロボットが一度しか用いられず、その高い開発コストを回収できないという問題がある。

また、現場での施工に対応できる手法を見いだせていないという課題もある。J. Buchli は建設現場においてロボットによる施工を適用する問題点について次のように述べている。

建設現場のような複雑で開放的な環境を動き回る機械には、賢明な行動が求められます。このような行動は、複雑な状況に対処するための最低限の機械知能を備

¹⁹ 筆者翻訳、Buchli, Jonas, et al., Digital in situ fabrication-Challenges and opportunities for robotic in situ fabrication in architecture, construction, and beyond., *Cement and Concrete Research* 112, 2018, p.69

原文: *Robots are complex machines and currently require deep expertise in all steps of their life-cycle, from design to building, to programming, operation, and maintenance. This introduces a prohibitively large overhead in domains that have a small series, high-mix nature, such as architecture, in which one cannot offset these investments and costs with a favorable cost scaling in high volume series production. In order to enable certain domains, such as building construction, to use complex robotic technology we have to be able to significantly lower this overhead. This will be achieved through providing versatile, modular, and reusable solutions on all levels (design to software).*

えていると表現することができます。実際、「コーナーケース」、「不明確な問題」、「ファジーなルールとターゲット」の数は、機械とその環境の複雑さに応じて指数関数的に増加します。残念ながら、伝統的なエンジニアリングは、このような不定形でファジーな問題や、複雑なコーナーケースを扱うのに特に適していません²⁰。

建設現場は複雑性を極めており、これまで産業用ロボットが用いられてきた工場での加工のように整った環境ではない。そのため、建設現場のノイズや誤差に対応するために莫大な開発コストをかけなければいけない。しかしながら、人工による労務費とそのコストを比べた場合、現状ではそこまでのコストをかけて自動化することに合理性はないため、現場でのデジタル・ファブリケーションの適用はかなり困難な課題であると考えられる。

M. カルポはデジタル・ファブリケーションの建築生産への適用に関して、次のように述べている。

このようなデジタル環境におけるクラフツマンシップという新たな様態は、小さな物の製作にだけ適用可能だというような意義が頻繁に唱えられるのだが、それは理論的に関係がない。なぜなら大きな物も、デジタル技術によって製作された、より小さなパーツから組み立てることができるからだ²¹

M. カルポはスケールの大小は「理論的に」関係がないとしており、デジタル・ファブリケーションを建築のような大きなスケールのものにも適用可能であるとしているが、「道具の制作」を行うことで自由度の高い制作物を目指すデジタル・ファブリケーションの事例に関しては、「小さな物」のスケールにとどまり、建築生産にインパクトを与えられていない。また、J. Buchli が指摘しているような現場での組立の課題からわかるように²²、「小

²⁰ 筆者翻訳、Buchli, Jonas, et al., *Ibid.*, p.69

原文: *a machine moving around a complex, open environment, such as a construction site, has to exhibit sensible behavior. Such a behavior we could depict as having a minimal machine intelligence to deal with complexity of situations arising in an intelligent, and most importantly, safe and predictable way. In fact, the number of 'corner cases', 'ill defined' problems, and 'fuzzy rules and targets' exponentially increases with the complexity of the machine and its environment. Unfortunately, traditional engineering is particularly ill-suited in handling such amorphous, fuzzy problems and many complex corner cases.*

²¹ マリオ・カルポ、前掲書、p.67

²² Buchli, Jonas, et al., *op. cit.*, p.66-75

さなパーツから組み立てる」ことを実現するための技能やコストに関する困難さが建築生産への適用を考えるうえでの障壁となっており、M. カルポが主張するほどデジタル・ファブリケーションの建築生産への適用は容易ではないように思われる。

(3) 道具としてのデジタル・ファブリケーション

建築生産におけるデジタル・ファブリケーションによる「道具の制作」が抱える課題を考察する上で、このようなデジタル・ファブリケーションに用いる加工機械は、建築生産の道具（木工具、工業機械、電動工具など）の一種としてとらえる視点がある。竹中はデジタル・ファブリケーションの中でも特に産業用ロボットを新たな建築生産の道具とみなして次のように述べている。

人間の手の延長のようにして活躍していたかつての日本の大工道具のように、ロボットがモノと人間との密接な対話を促すことを可能にする。その姿は、手の仕事を支えていた昔ながらの道具の進化形であり、またそれらでは見ることでできなかった新しい世界をも切り開いてくれる、実に頼もしい様子なのである²³。

竹中は産業用ロボットを大工の木工具と同じ次元でとらえており、建築生産の道具の一種としてみなしているということがわかる。また、M. カルポはデジタル・ファブリケーションと道具の関係について次のように述べている。

デザインやファブリケーションのためのデジタル・テクノロジーは、そうした場合には、まだ道具的な媒介者とも見なしえるが、機能的にはそれらは青焼きや施工図面のように従来の表記法にしたがった数学のベクトルが集まったものと言うよりも、ハンマーやのみのような、物質的な道具に類似している²⁴。

ここでは、デジタル・ファブリケーションは図面の延長というよりも、手仕事の道具に類似した存在としてみなせると主張している。

デジタル・ファブリケーションに用いるデジタル加工機（CNC 加工機、3D プリンター、産業用ロボットなど）を建築生産の道具の一種として見ることで、他の建築生産の道具との比較を行うことができる。通常の工業的な機械を用いる加工を行う場合は設計者が介入

²³ 竹中司、岡部文「ロボットはコンピュータの夢をかたちにするか？ 1」、GA JAPAN 128 号、2014、P.194

²⁴ マリオ・カルポ、前掲書、p. 55

することは厳しいが、デジタル工作機は設計者が作成する 3D データと密接に結びついており、設計者が使いこなすことも可能である。また、産業用ロボットのように設計者自身が作りたい形態・素材に合わせてロボットのプログラムを制作することで道具を使いこなすことも実際に行われている。そのため、デジタル加工機はこれまでの工業的な加工機械に比べて「道具の制作」が行いやすい道具であるといえる。その意味では、竹中や M. カルポが指摘しているように工業的な機械よりも手仕事の道具に近い。

さらに範囲を広げ、デジタル・ファブリケーションを人間が生産活動のために用いる道具の一種としてとらえることもできる。このような建築生産に限らない広い意味での道具の言説からデジタル・ファブリケーションの道具を分析することで、現状の課題に対して道具として望ましい方向性を提示できる可能性がある。

例えば、人間が創造的な生産活動を行う上で重要であるとされている道具の要素として、専用化と汎用性のバランスというものがある。イリイチは「特定の需要（それをみたすために道具は特殊化するのだが）をつくりだすような道具と、自己実現を助ける補足的・援助的な道具とのあいだのバランスがとれていること²⁵⁾」の重要性を指摘している。デジタル・ファブリケーション事例にみられる道具の場合、ある特定の加工を達成するために道具を一から開発して専用化したことで、道具が汎用性を失ってしまうような事例が多くみられる。ある目的に特化させるために道具を制作しつつも、一度使っただけで終わらないような汎用性を獲得することが、建築生産に適用する上では必要である。このように、専用化と汎用性のバランスを考慮することが現状のデジタル・ファブリケーションの課題を考えるうえでは重要になる。

また、道具の開発コストも重要な要素である。西本は「簡単かつ低コストで（個別性に対して）適応可能とすること²⁶⁾」が望ましい道具であると述べた。現状のデジタル・ファブリケーションの道具は高いコストをかけて特定の目的のために特化した道具を制作しているが、一品生産の性質が強い建築生産では、高いコストをかけて道具を専用化しても、そのコストを回収できないことが多い²⁷⁾。そのため、低コストで道具の開発を行えるような道具の制作手法を模索することが必要である。

また、道具を使用・制作するために必要な技能を考慮することが重要である。J. Buchliらが指摘している²⁸⁾ように、現状のデジタル・ファブリケーションにおいては道具の制作に必要な技能のハードルが高いという問題は大きい。ここで建築生産に限らない広い意味での道具の言説に目を向けると、西野は人間と道具の関係について、人間のスキルと道具

²⁵⁾ イヴァン・イリイチ『コンヴィヴィアリティのための道具』、筑摩書房、2014、p.65

²⁶⁾ 西本一志、創造活動のためのユニバーサルな道具とは、エンタテインメントコンピューティング 2006 予稿集、2006

²⁷⁾ Buchli, Jonas, et al., *op. cit.*, pp. 66-75

²⁸⁾ Buchli, Jonas, et al., *Ibid.*, pp. 66-75

の性能の双方に一定の負担を要する「スキルトロニクス」な道具が望ましいと述べている²⁹。例えば工業的な機械は道具の性能の負担が大きく、人間はそれを反復的に操作するだけの主体となってしまっている。この状態では人間が創造的な工夫を行うことができず、既存の機械が行うことができる加工をもとに建築生産が行われてしまう。本来であれば設計者がつくりたい形態・素材があり、それを実現するために道具があるべきであるため、イリイチが言うように「自分の道具によって支配されている³⁰」状態になってしまっているといえる。市販の 3D プリンターのような機械も高性能ではあるが人間が関われる余地が少なく、道具の性能と人間の技能のバランスは悪い。

これらの建築生産に限らない人間の生産活動における道具に関して論じられている「道具の汎用性」、「道具の開発コスト」、「道具に必要な技能」といった要素は現在のデジタル・ファブリケーションが抱える課題に直結する重要な要素であるため、このような道具に関する言説から現状の課題を分析し、解決策を提示することは有効であると考えられる。

以上のように、デジタル・ファブリケーションを効果的に用いることで設計者が作りたいものに合わせて道具を自ら制作することで自由度の高い建築生産を実現できる可能性はあるが、現状では道具の汎用性や、道具の開発コスト、道具に必要な技能といった観点で課題が多いということがいえる。ここまで見てきたような道具の観点（道具の汎用性、道具の開発コスト、道具に必要な技能など）からデジタル・ファブリケーションを用いた道具の制作にみられる現状の課題を分析することで、道具として望ましいと考えられるデジタル・ファブリケーションの方向性を提示し、建築生産に適用可能な道具の制作手法を考察できると考えられる。

1. 2 目的

本研究の目的は、設計者がデジタル・ファブリケーションを用いて生産に接続し、「道具の制作」を行うことで自由度の高い設計・制作を行う創造的な建築生産の実現である。そのために、現状のデジタル・ファブリケーションを道具の観点から分析した上で、それが抱える課題に対応する道具の制作手法および建築生産プロセスを提案し、構造物の設計・制作を通じて実践することでその効果を検証する。

1. 3 方法・構成

本研究では以下の 3 点を行う。

まず、デジタル・ファブリケーションを俯瞰的に論じた既往研究および建築に用いられる道具に関連した既往研究を概観した上で（2 章）、近年のデジタル・ファブリケーション

²⁹ 西野順二、スキルトロニクスな道具のデザイン、人工知能学会全国大会論文集、1B2-9、2008

³⁰ イヴァン・イリイチ、前掲書、p.59

の事例を悉皆的に収集し、そこで用いられる道具について分類および分析を行う。これにより、現状のデジタル・ファブリケーションにおける道具の傾向と課題を明らかにするとともに、建築生産への適用において有効であると考えられる道具の制作手法を提示する(3章)。

次に、3章で得られた知見を元に、デジタル・ファブリケーションのより詳細な事例分析及び実際の加工メーカーへのインタビューを行う。これにより実際の建築生産において実践されている「道具の制作」の課題を明らかにし、その課題をもとに「道具の制作」を行うための新たな設計・制作プロセスを提示する。(4章)。

さらに、3章、4章で得られた有効であると考えられる道具の制作手法および設計・制作プロセスを具体的な構造物の設計・制作に適用し、主に制作物の自由度の観点からその効果を検証する(5章)。5章での構造物の設計・制作を通して得られた、道具の制作手法および道具の制作を取り入れた設計・制作プロセスの課題、実際の建築生産への適用可能性について考察する(6章)。7章では研究全体を総括し、今後の課題についてもまとめた。

1. 4 用語の定義

(1) デジタル・ファブリケーション

「デジタル・ファブリケーション」という語の定義に関して、J. de Freitas Pires らは「使用される機械がコンピューター制御である製造プロセスの一種³¹⁾」と定義しており、工場における製造に意味を限定している。その一方で、F. J. Lena-Acebo らは「数値制御やコンピューターによって、デジタル上の情報を現実の物理的なプロダクトへと変換する³²⁾」として定義しており、工場での加工に限らないより広い定義であるといえる。

これらの定義を踏まえ、本研究で用いる「デジタル・ファブリケーション」の語は、「図面のような二次元的な情報を介することなく、三次元的な設計情報を直接物理的なオ

³¹⁾ 筆者翻訳、de Freitas Pires, Janice, Luisa Dalla Vecchia, and Adriane Almeida da Silva Borda. "Transiting between Representation Technologies and Teaching/Learning Descriptive Geometry: Reflections in an Architectural Context." *Handbook of Research on Visual Computing and Emerging Geometrical Design Tools*. IGI Global, 2016, pp.250-273
原文: *Digital fabrication is a type of manufacturing process where the machine used is controlled by a computer.*

³²⁾ 筆者翻訳、Lena-Acebo, Francisco Javier, and María Elena García-Ruiz. "The FABLAB Movement: Democratization of Digital Manufacturing." *Organizational Transformation and Managing Innovation in the Fourth Industrial Revolution*. IGI Global, 2019, pp.125-142
原文: *Fabrication processes where the numerical controls and computers transforms digital information into real physical products.*

プロジェクトへと変換し、設計・制作を行う手法」として定義する。CNC 加工機や 3D プリンターのようなデジタル加工機だけでなく、FEM 解析や物理演算シミュレーションのような解析技術を用いて設計・制作を行う場合も含む。一般的な定義としては、CNC 加工機や 3D プリンターのようなデジタル加工機をもちいて生産を行うものに限定する場合もあるが、本研究で扱う事例は必ずしもそこまで直接的な情報と物質の変換ではないものもあるため、本研究ではより広い定義を採用する。

(2) 道具とその関連要素

「道具」の語の定義に関しては、その語が含む範囲に大きなばらつきがある。「コンヴィジュアルな道具」を提唱している I. イリイチは以下のようにかなり広い意味で「道具」という語を用いている。

私は“道具”という言葉、ドリル、ポット、注射器、箒、建築材料、モーターのような簡単なハードウェアだけを、また自動車や発電機のような大きな機械だけを包含するのではない、広い意味で用いる。すなわち私は、コーンフレークとか電流とか触知しうる商品を製造する工場のような生産施設と、“教育”とか“健康”とか“知識”とか“意志決定”とかを生みだす触知しえない商品の生産システムとを、道具のうちに含めるのである³³。

その一方で、村松貞次郎は道具と機械を明確に区別し、かなり限定的な意味で「道具」を用いている。村松は道具と機械の違いについて次のように述べている。

機械による生産（加工）は、道具のそのように材料に素直に対応するものではなく、材料そのものを機械に対応させるという一面を持つ。しかも機械加工が高効率化し、精密化し、大量生産化するに応じて、それに供給される材料は、ますますチェックされ、均質化される。これは機械による生産の発展原則であり、大きな特徴として指摘できるところであろう。材料の変化に従属して道具を換えるという方法と根本的に違う。

材料あるいは作業の目的に応じて“道具を作る”という点についても、機械も同じではないか、という意見もあろう。万能形の工作機械など、その最たるものと言えよう。しかし道具のようにキメ細かい対応は無理であり、もちろん生産者自身によって道具を作るように“機械を作る”ことは不可能である。機械による生産の

³³ イヴァン・イリイチ、前掲書、p.58

発展原理であり、宿命でもある大量生産の論理が貫徹すればするほど、できあがった機械を、作り変えることはますます不可能になろう³⁴。

村松は材料との関係および生産者によって制作可能かの二点で道具と機械を明確に区別している。しかしながら、村松は同時に、機械や電動工具でも道具として使いこなせる可能性があるとして次のように述べている。

機械や電動工具を使っても、きれいに、格調高くつくろうという心があれば、人はかならず、どこかに道具を持っているはずだ。オリンピック競技用のボートを造っていた老船大工の電気ガンナの鉄の台の裏は、ふつうの台ガンナのように微妙にヤスリで透いてあった。彼にとっては、機械もまた道具と変わらなかったのである。日本の宇宙工学や医療技術の最先端の仕事を支えている街工場の職人たちは、旧式の旋盤などの機械を道具のように手なずけて、手造りで原型となる部品をつくっている³⁵。

本研究で用いる「道具」という語は、「ものを加工したり組み立てたりする際に使用する補助的なツール」として定義する。さらに、村松の「作ると同時に、作られるものが道具である³⁶」という定義に沿って、操作者が単に与えられたものとして使うだけでなく、操作者によって一定の物理的な寄与（調整、改良、制作など）がされるものを道具として定義する。村松による定義では機械や電動工具を道具に含めていないが、本研究では、機械や電動工具でも操作者が一定の物理的な寄与を行うことは一般的にみられると考え、職人の工具、機械、電動工具、デジタル工作機械、ロボット等、幅広く道具としてみなすこととする。また、このような工具や機械にとどまらず、制作物を実現するために用いるもの（鋳型、治具など）および制作手法（カーフィング、コールドベントなど）も道具に含める。また、竹中が「情報の道具（コンピュータ）と物質の道具（ロボット）をインタラクティブに繋ぐ³⁷」ことがデジタル・ファブリケーションの本質であると述べているように、設計者が用いる制作を行う際に必要なデジタルツール（CAM ツール、パラメトリックモデリングツール、FEM 解析ツールなど）は物理的なデジタル加工機と切り離すことはで

³⁴ 村松貞二郎、道具と機械と人間の歴史的関係、日本機械学会誌、76 巻 654 号、日本機械学会、1973、p.727

³⁵ 村松貞次郎、前掲書、2014、p.246

³⁶ 村松貞二郎、前掲書、1973、p.726

³⁷ 竹中司、岡部文「ロボットはコンピュータの夢をかたちにするか？ 3」、GA JAPAN 130 号、2014、p.181

きない。そのため、このような情報を扱うツールは村松による道具の定義においては考慮されていないが、新たに登場した建築生産を補助するツールであり、道具としてみなす。

また、道具を評価するうえで重要な関連要素として以下の要素を定義する。

- ・道具に必要な技能（道具を制作する技能、道具を使う技能など）
- ・道具の開発コスト（機械設計のコスト、機械改造のコスト、鋳型制作のコスト、エンドエフェクターの設計・制作・プログラミングのコストなど）
- ・道具の機能（木を切る道具、金属を曲げる道具など、素材と動作により構成される。）
- ・道具の汎用性（機能が複数あるか、素材を複数扱えるか）
- ・道具の制作手法（既製品を用いるか、独自で開発をするのか、あるいはその中間的な手法をとるか）
- ・道具が用いられる工程（加工か組立か）

これらの要素から道具の評価を行うことを「道具の観点から分析する」と定義する。

2 章 先行研究

2. 1 デジタル・ファブリケーションの先行研究

建築生産におけるデジタル・ファブリケーションを俯瞰的に論じた言説としては、M. カルポの“The Alphabet and the Algorithm”（MIT Press、2011）や“The Second Digital Turn: Design Beyond Intelligence”（MIT Press、2017）がある。“The Alphabet and the Algorithm”では90年代のデジタル・テクノロジーの進歩を「デジタル・ターン」と名づけ、デザインと生産がシームレスになりつつあると指摘している³⁸。ここでは機械は同一的なコピーを作るのに対して、デジタル加工機はノンスタンダードなオブジェクトを作ることができるとして、機械とデジタル加工機を明確に区別している。“The Second Digital Turn: Design Beyond Intelligence”では、2010年代に情報技術の発展により設計者が扱える情報量が格段に増大した結果、全く別のパラダイムシフトである「セカンド・デジタル・ターン」が起こりつつあるとしている。これにより設計情報を図面に圧縮する必要がなくなり、情報量の多い3Dデータをそのまま出力することができるのと述べている。また、デジタル・ファブリケーションの潮流がCNC加工機のような減算的な加工方法から、3Dプリンターのような加算的な加工方法へ移りつつあり、制作物の自由度がより高まっていると述べている。

また、産業用ロボットを設計者にとっての新たな道具として論じているものとして、竹中らによる論考「ロボットはコンピュータの夢をかたちにするか？」（GA JAPAN 127-151号、2014-2018）がある。ここでは、産業用ロボットと木工具との類似性を指摘しているほか、産業用ロボットを扱う上での設計者に必要な技能についても論じている。

しかしながら、M. カルポが紹介している事例がパビリオンスケールのものに偏っていることからわかるように、建築生産への適用という観点で見るとデジタル・ファブリケーションに関する言説はかなり楽観的な見立てのものが多く、具体的に建築生産における適用可能性を検討しているものやデジタル・ファブリケーションの現状の課題を指摘しているものは少ない。

2. 2 道具の先行研究

（1）道具に関する言説

建築生産に限らない道具の人間の創造性に関する言説としては、I. イリイチの『コンヴィヴィアリティのための道具』（1989）がある。ここでは、道具は人間の能力を高めるに至る第一の分水嶺と、人間から能力を奪う第二の分水嶺があるとして、この二つの分水嶺の間にとどまるバランスを保つことが重要であるとしている³⁹。この第二の分水嶺を超えると、村松が機械生産の特徴として指摘しているような「人間のモノからの疎外、生産か

³⁸ マリオ・カルポ、前掲書

³⁹ イヴァン・イリイチ、前掲書、pp.21-35

らの疎外⁴⁰⁾」が起きてしまうといえるだろう。

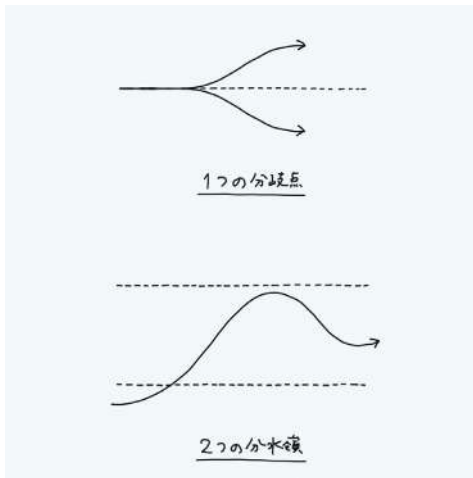


図5 二つの分水嶺のダイアグラム⁴¹⁾

さらにこの I. イリイチの言説における道具をテクノロジーに置き換えて論じたのが緒方紘一の『コンヴィヴィアル・テクノロジー 人間とテクノロジーが共に生きる社会へ』（ビー・エヌ・エヌ、2021）である。ここでは、イリイチの人間が道具を使うか、道具に使われるかという視点に加え、創造的な生産行為を行う上での人間が道具を「つくれる」、「つくりかえられる」ことの重要性について論じている。このほかに「道具をつくる」行為の重要性を指摘している言説としては、B. コロミーナ、M. ウィグリーによる『我々は人間なのか？ーデザインと人間をめぐる考古学的覚書き』（ビー・エヌ・エヌ新社、2017）などがある。

イリイチの言説は道具の専用性・汎用性の議論にも及ぶ。イリイチは「特定の需要（それをみたすために道具は特殊化するのだが）をつくりだすような道具と、自己実現を助ける補足的・援助的な道具とのあいだのバランスがとれていること」が重要であるとしており、これは専用性と汎用性のバランスに関する主張であるといえる。

また、道具の専用化を行う際のコストについて、西本は「利用開始時に利用者の特性に応じて最適な形態に簡単かつ低コストで適応可能とすること（adaptability）⁴²⁾」が重要であると述べている。このような適応可能性を備えた道具として「可塑的道具」を提示している。西本は「可塑的道具」の例として和包丁をあげ、次のように述べている

伝統的な道具には、この可塑性が実現手段としてうまく機能している例が見られ

⁴⁰⁾ 村松貞二郎、前掲書、1973、p.727

⁴¹⁾ 緒方壽人、前掲書、p.40

⁴²⁾ 西本一志、前掲書

る。たとえば「和包丁」である。和包丁は、一般に鋼製の刃と、木製の把手とでできている。刃については、what と how が明確であり、研ぐこと(how)によって自分の求める切れ味(what)に意図的に調整可能である。一方、把手の部分については、削ったりして意図的な変形を加えることは普通しない。しかしながら、日々の調理活動の中で握られ続けることによって、把手はわずかずつ変形していき、やがてその利用者の握り方・使い方の特徴に応じた形状に意図せずして変形する。こうして包丁は、その料理人に適応化し、他の包丁よりも良い仕事ができる道具に成長する。しかし、この最適な把手の形状は、予め明示的に示すことは一般にできない、暗黙的なものである。このように包丁には、意図的に適応化可能な要素と、暗黙的に適応化される要素とが絶妙なバランスで共存しており、それによって「単なる切る道具」以上の道具として料理という創造活動に寄与している⁴³

西本は意図的に適応可能な要素と暗黙的に適応化される要素を持つ道具が創造活動を行ううえで望ましいと述べている。これは伝統的な木工具にも見られる特徴である。

道具の技能に関する言説としては、西野による「スキルトロニクスな道具」という概念がある⁴⁴。これは人間と道具の関係について、人間のスキルと道具の技術の双方に一定の負担を要するのが望ましいという主張である。西野はスキルトロニクスな道具の実例を挙げて次のように説明している。

人間が移動するために用いる乗物を考える。靴、スキー、ソリはスキルフルな道具である。使いこなすことでパフォーマンスは上がるが、道具の果たす役割はむしろ小さい。自転車は、スキルトロニクスな道具であり、場合によって乗り手を選ぶ道具といえる。必要とされるスキルは、バランス制御と推力生成である。小回りが効く高い運動性能を持ち、スキルレベルによっては段差の昇降も可能となる。

⁴⁵

西野はスキルトロニクスな道具の実例として自転車を挙げているが、I. イリイチもコンヴィヴィアルな道具の実例として自転車を挙げている⁴⁶。このように、スキルトロニクスな道具は、機械の性能に依存しすぎず人間が関与する余地を残すという点でコンヴィヴィ

⁴³ 西本一志、前掲書

⁴⁴ 西野順二、前掲書

⁴⁵ 西野順二、前掲書

⁴⁶ イヴァン・イリイチ、前掲書

アルな道具と類似した考え方であるといえる。I. イリイチは「自分のかわりに働いてくれる道具ではなく、自分とともに働いてくれる新しい道具⁴⁷⁾」が望ましいと述べている。これらの言説から、道具に性能を求めすぎることではなく、かといって人間の技能に頼りすぎるのでもない中間的な道具が望ましいと考えられる。

このように、「道具の制作」、「道具の開発コスト」、「道具の汎用性」、「道具に必要な技能」に関して、建築生産に限らない広い範囲で、道具と人間の創造性の関係を分析した先行研究がみられた。

(2) 建築生産の道具に関する先行研究

建築生産の道具に関しては、日本の木工具の歴史的な研究が数多くみられる。村松は大工道具（ノコギリ、カンナ、砥石）の歴史を、その発明から現代にいたるまでまとめるとともに、西洋の木工具（硬い、強い、合理的、「機械」的）と日本の木工具（やわらかい、非合理的、「道具」的）の特性の違いについて指摘している⁴⁸⁾。この道具の違いは用いている木材の性質の違いからくるものであると述べており、道具と素材の強い結びつきについて指摘している。日野は弥生時代の石斧から 20 世紀の電動工具までの日本の木工具の歴史をまとめており、道具の今後の展望として、専門家が用いる伝統的な木工具と、素人が DIY のために用いる電動工具に二極化する可能性を指摘している⁴⁹⁾。黒川は 1943 年から終戦までの期間における大工道具を分析している⁵⁰⁾。ここでは必要かつ十分な大工道具を第一形式とし、179 の道具を用いるとしており、必要最低限の大工道具を第二形式とし、72 の道具を用いるとしている。

比較 形式別	墨掛道具 並びに 定規類	鋸	鉋	のみ	錐	玄能 槌	釘抜 釘締	毛引	ちょうな まさかり	雑道具	計
第一形式	14	12	40	49	26	6	9	3	2	18	179
第二形式	10	4	9	14	10	4	5	2	2	12	72

図 6 大工道具の数⁵¹⁾

⁴⁷⁾ イヴァン・イリイチ、前掲書、p.38

⁴⁸⁾ 村松貞次郎、前掲書、2014

⁴⁹⁾ 日野永一、日本の技術 木工具の歴史、日本産業技術史学会、1989、pp.129-132

⁵⁰⁾ 村松貞次郎監修 黒川一夫執筆『わが国大工の工作技術に関する研究』労働科学研究所、1948

⁵¹⁾ 黒川一夫、前掲書

建築生産における工業的な機械に関しては、村松が職人が用いる「道具」と工業的な「機械」を明確に区別するとともに、その歴史的な関係性について論じている⁵²。機械生産によって熟練した職人の条件であった「材料に合わせて徹底的に道具を換えること」、「自ら道具をつくること」、「作業姿勢を規定すること」は失われつつあると指摘している⁵³。

電動工具に関しては、井上らが電動工具が大工道具に与えた影響を大工への聞き取り調査を通じて分析している⁵⁴。

このように、木工具、工業機械、電動工具に関する研究は見られるが、デジタル・ファブリケーションをはじめとした電動工具以降の道具を詳細に分析している研究はほとんどみられない。そのため、デジタル・ファブリケーションが新たな設計者および施工者の道具として加わることで、建築生産にどのような影響を与えるのか（熟練技能者の技能を補完できるのか、制作物の自由度を高める方向へ向かうのかなど）を分析することが必要であると考えられる。

(3) 道具の分析手法に関する先行研究

道具の類型化に関する先行研究としては、永田らが道具を動作で分類する手法を用いている⁵⁵（図7）。

表2 道具の機能分類

機能分類	機能動作	道 具	機能分類	機能動作	道 具
武具	攻める・守る	刀、刀掛、刀拭箱、弓、弓掛、弓箭、矢、胡弓、的、巻簾台、鉄砲掛、具足、具足櫃、鎧、鎧箱、組掛、甲立、兜掛、櫓、竹束、井掛、旗、指物、軍太鼓、首札、首桶、首机	茶湯具	点てる	棚、台子、空室、卓、茶室箱、茶弁当、風炉先板、板（大板、長板他）、茶箱、炭灰、水指、茶通箱他
	移動する	鞍箱、鞍掛、櫓、塩手、肌付、切付、木馬、肝舟、馬櫓、櫓、馬尺、馬柄杓、すそ置、櫓、しかり杖		しつらう	釘、伊縁、自在竹、竹輪、榎木、花台、板、花生（尺八）、上杖他
家什具	収める	長持、箱（櫃、唐櫃、手箱、角赤他）、広蓋、厨子、櫓	飲食具	調理する	杵、臼、組板（板、小高板、中板、鯉板、鶴板、白鳥板）、包丁、包丁箱、まな板
	架ける	衣桁（衣架）、手拭掛		食べる	台盤、膳、皿、折敷、縁高、盆、杯、碗、瓶、壺、匙
	整える	帯、座取、座著、束杖、熨斗、自在、炬燵	商工具	計量する	銭箱、秤、秤
遊具	あそぶ（屋内）	双六盤、碁盤、将棋盤、駒箱、貝合、香炉箱、盆石、太鼓台、笛箱		つくる	すり刀、きり、鋸、曲尺、鋸、金灰、墨竹心、下墨、錐、鑿、新、鉋、墨、櫓、大尺、鉄錐、界方・界尺、規、準
	あそぶ（屋外）	鷹鉈、雀鉈、鳥局、餌箱、餌こし、鞠、鞠竿	祭礼具	つとめる	仏前卓、櫓、私子、縁鈴、法螺貝、中塔、経机、冠帽、笏、幕木、再拝、陰扇、抱衣刀
交通具	移動する	車、籠、輿、舟、笠	燈火具	灯す	灯台、燭台、行灯、炬燵、蔵地行灯、灯籠
	運ぶ	提箱、笥、形箱	屏障具	隔てる（屋内）	屏風（風呂先屏風、網代屏風、風炉先屏風、勝手屏風）、ふい、障子、几帳、簾
文房具	読む	文箱、状箱、文台、柳箱、見台、硯屏	容飾具	隔てる（屋外）	簾、幕串、幔
	書く	短冊、短冊箱、色紙、筆、筆箱、硯、硯箱、文台、机		清める	小手掛、手水桶、面桶、爪切箱、櫓子
座臥具	座る	曲櫓、床子、床几、胡床、脇息（寄懸、気安）、筵、茵、畳	雑具	装う	鏡台、鏡立、鏡、櫓、櫓箱、鉄漿、乱箱
	寝る	筵、茵、畳、枕		その他	札（制札、下馬札、御門札、長札）、梯子、影時計、下駄、節（熊節、虎節、符節、背節）

注：機能分類は史料に記載のあらわれるものを年代順、項目記載順に示し、雑具を最後としている。道具の細分類については表中に示していないものがある（注4参照）。

図7 動作による道具の分類⁵⁶

⁵² 村松貞二郎、前掲書、1973

⁵³ 村松貞二郎、前掲書、1973、p.726

⁵⁴ 井上雄介 横山晋一、近現代における道具史の基礎的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、2017、pp. 367-368

⁵⁵ 永田 恵子ほか、建築書系道具雛形の基本型と発展型：建築書系道具雛形の歴史的変遷過程、日本建築学会計画系論文集、66 巻 539 号、日本建築学会、2001、pp.241-246

⁵⁶ 永田 恵子ほか、前掲書、p.243

道具の仕組みに関する分析手法として、Function Analysis と呼ばれる手法では（図 9）、道具の主たる機能を副次的な機能に分解し、それら相互でインプット、アウトプットを記述することによって、どのような物質、情報、エネルギーのやり取りが行われているかを明らかにする。V. Gheorghiță らは「機能分解を行うことで、物質、情報、エネルギーとして定義された入出力の流れを伴う機能を記述する、プロダクトの重要な特徴および属性を見つけることができる⁵⁷⁾」と述べている。この手法を建築生産の道具の分析に用いれば、あらゆる生産の道具に対してどのような技能やデータ、素材がインプットとして必要で、どのような形状がアウトプットとしてでてくるかを記述することができると考えられる。

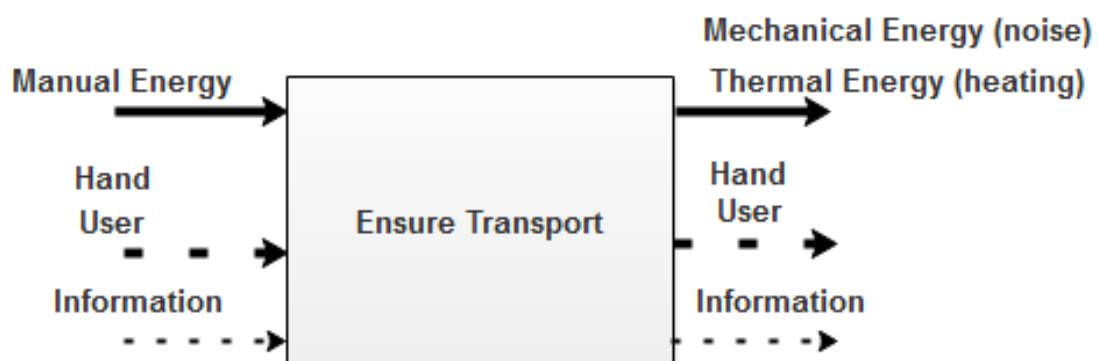
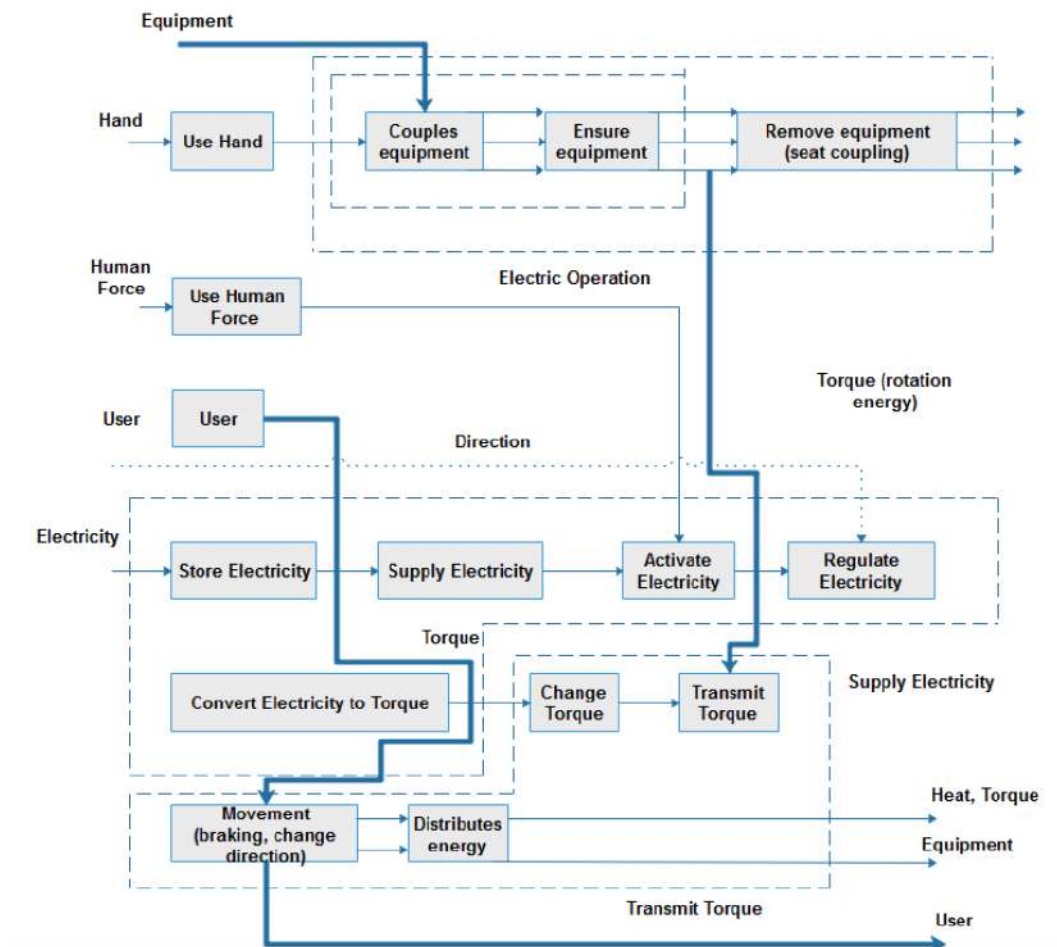


図 8 Function Analysis による道具のモデル化⁵⁸⁾

⁵⁷⁾ 筆者翻訳、Gheorghiță, Vlad, and Cătălin Gheorghiță. "Applying of a design methodology for a new mobility product." *MATEC Web of Conferences*. Vol. 178. EDP Sciences, 2018.
原文: *Functional decomposition finds critical product features and attributes that describe functions with input and output flows defined as material, information, and energy.*

⁵⁸⁾ Gheorghiță, Vlad, and Cătălin Gheorghiță, *Ibid.*, p. 3



・ 図 9：Function Analysis の適用例⁵⁹

本研究においては、これらの道具の分析手法に関する先行研究を参照し、3 章でのデジタル・ファブリケーション事例の分析に取り入れる。道具の機能による分類により、道具が扱う素材と動作を明らかにする。ここで示された道具の素材と動作から道具の汎用性の分析を行う。また、Function Analysis の手法を用いて、道具のインプットとアウトプットを明らかにし、道具に必要な技能を規定する。

⁵⁹ Gheorghîță, Vlad, and Cătălin Gheorghîță, *Ibid.*, p. 5

3 章 近年のデジタル・ファブリケーションにおける道具

本章では、過去のデジタル・ファブリケーション事例を道具の観点から俯瞰的に分析することで、現状のデジタル・ファブリケーションの道具に見られる傾向と課題を明らかにする。主に、「制作物のスケール」、「道具の汎用性」、「道具に必要な技能」といった道具に関する重要な評価項目と道具の制作手法との関係を分析する。また、分析の結果望ましいと考えられる道具の制作手法を提示し、4 章・5 章の詳細分析、開発につなげる。

3. 1 分析の手法

(1) 事例の収集

本章ではまず、1990 年から 2021 年までに以下の媒体において掲載されたデジタル・ファブリケーションの事例（全 65 事例）を収集し、リスト化した。同じ事例の中で複数の機能の道具を用いている場合、それぞれ別の道具としてみなした。

・研究論文

（期間：2001-2021 年 キーワード：Digital Fabrication in Architecture, Digital Manufacturing in Architecture, Robotic Fabrication 計 20 本程度）

・デジタル・ファブリケーション事例を取り上げた書籍

（期間：2001-2021 年、キーワード：Digital Fabrication in Architecture, Mass Customization in Architecture 計 10 冊程度）

・建築系ウェブ記事


















（期間：2011-2021 年、キーワード：Digital Fabrication in Architecture, Digital Manufacturing in Architecture, Robotic Fabrication 計 10 誌程度）

1990 年以降としたのは、M. カルポが 1990 年代にファースト・デジタル・ターン（デジタル工作機械の発展を伴うパラダイムシフト）が起こったとしている⁶⁰ほか、1992 年の世界初の光造形 3D プリンターの発売、1997 年のビルバオ・グッゲンハイム美術館の竣工など、1990 年代はデジタル・ファブリケーションの萌芽が起こったといえるためである。事例収集の手法としては研究論文だけでなく、書籍やウェブ雑誌を参照することで、プロダクトスケール及びバビリオンスケールの事例から建築スケールの事例まで偏りなく事例収集を行った。



















また、比較のためにデジタル・ファブリケーション以外の道具 33 事例（木工具・工業機械・電動工具・自動化施工）も収集し、リスト化した。

⁶⁰ マリオ・カルポ、前掲書、2014


3章 近年のデジタル・ファブリケーションにおける道具

道具の種類		道具・プロジェクト	年代	素材	機能	道具の制作手法	汎用性（動作・素材の複数性）	技能	スケール	工場/現場
D（デジタル・ファブリケーション）		Gehry Partners, Guggenheim Museum Bilbao	1997	石・レンガ	切削する	既製品を改造	複数の動作	第五類型	L	工場
D		Gehry Partners, Guggenheim Museum Bilbao	1997	金属	曲げる	既製品を改造	単一の動作・素材	第五類型	L	工場
D		Gehry Partners, Neuer Zollhof	1999	コンクリート	キャスト	型・治具を制作	複数の動作	第四類型	L	工場
D		Gehry Partners, Neuer Zollhof	1999	金属	切削する	既製品	複数の動作	第五類型	L	工場
D		B. Franken, BMW Pavilion	2000	スタイロフォーム	削る	型・治具を制作	複数の動作	第四類型	L	工場
D		Alvaro Siza, Serpentine Gallery Pavilion 2005	2005	木	切削する	エンドエフェクターを制作	複数の動作	第五類型	S	工場
D		ZHA, Hungerbühnenbahn	2005	プラスチック	切削する	既製品	複数の動作	第五類型	L	工場
D		日建設計, 木材会館	2009	木	切削する	既製品	複数の動作	第五類型	L	工場
D		IAAC, Fablab House	2010	木	切削する	既製品	複数の動作	第五類型	M	工場
D		Matter Design, Foam Tower	2010	発泡スチロール	切削する	エンドエフェクターを制作	単一の動作・素材	第二類型	M	工場
D		Shigeru Ban, Centre Pompidou Metz	2010	木	切削する	既製品	単一の動作・素材	第二類型	L	工場
D		Architecture 00, Wikihouse	2011	木	切削する	既製品	複数の機能	第五類型	M	工場
D		Jurgen Mayer, Metropol Parasol	2011	木	切削する	既製品	複数の動作	第五類型	L	工場
D		Snohetta, Norwegian Wild Reindeer Centre Pavilion	2011	木	切削する	既製品	複数の動作	第五類型	S	現場
D		ZHA, Dongdaemun Design Plaza	2011	金属	曲げる	既製品を改造	単一の動作・素材	第二類型	L	工場
D		Stuttgart ICD, Stuttgart ICD/ITKE Pavilion 2011	2011	木	切削する	エンドエフェクターを制作	単一の動作・素材	第二類型	M	工場
D		Precious Plastic	2012	プラスチック	キャスト	型・治具を制作	単一の動作・素材	第四類型	SS	工場



















3章 近年のデジタル・ファブリケーションにおける道具

D		Stuttgart ICD, ICD/ITKE Pavilion 2012	2012	ファイバー	編む	エンドエフェクターを制作	単一の動作・素材	第二類型	S	工場
D		Michael Hansmeyer, Digital Grotesque	2013	小石・砂・土	押し出す	既製品	単一の動作・素材	第五類型	S	工場
D		Cyclic Design, ROBOTIC INFILTRATION	2013	プラスチック	引き延ばす	エンドエフェクターを制作	単一の動作・素材	第二類型	SS	現場
D		IAAC, MiniBuilders	2013	コンクリート	押し出す	独自制作	単一の動作・素材	第二類型	S	現場
D		T_ADS, STIK Pavilion	2014	木	積む	独自制作	単一の動作・素材	第三類型	S	現場
D		Gehry Partners, Fondation Louis Vuitton	2014	ガラス	曲げる	既製品	単一の動作・素材	第五類型	L	工場
D		Gehry Partners, Fondation Louis Vuitton	2014	コンクリート	キャスト	型・治具を制作	複数の動作	第四類型	L	工場
D		Gramazio Kohler Research, Remote Material Deposition	2014	粘土	投げる	独自制作	単一の動作・素材	第三類型	S	現場
D		AA School, Osteobotics AADRL 2015	2015	プラスチック	引き延ばす	エンドエフェクターを制作	単一の動作・素材	第二類型	SS	現場
D		AA school, LOCI, 2016	2016	金属	編む	エンドエフェクターを制作	単一の動作・素材	第二類型	S	工場
D		三井礦、日本橋旧テラー堀屋改修	2016	金属	キャスト	型・治具を制作	単一の動作・素材	第四類型	L	工場
D		Block Research Group, Armadio Vault	2016	石・レンガ	切削する	エンドエフェクターを制作	複数の動作	第五類型	S	工場
D		AA School, Wood Chip Barn	2016	木	切削する	エンドエフェクターを制作	複数の動作	第二類型	S	工場
D		ETH ITA, ITA-Roof	2016	木	積む	エンドエフェクターを制作	複数の素材	第二類型	L	工場
D		Archi-Union Architects, Chi She	2016	石・レンガ	積む	エンドエフェクターを制作	複数の素材	第二類型	M	現場
D		Gramazio Kohler Research, Robotic Pavilion	2016	木	ビス・釘を打つ	エンドエフェクターを制作	単一の動作・素材	第二類型	S	工場
D		HENN and DOU, Communication Landscapes	2017	樹脂	切削する	エンドエフェクターを制作	単一の動作・素材	第二類型	S	工場
D		Gramazio Kohler Research, The Brick Labyrinth	2017	石・レンガ	積む	エンドエフェクターを制作	単一の動作・素材	第二類型	S	工場

3章 近年のデジタル・ファブリケーションにおける道具

D		Stuttgart ICD, ICD Aggregate Wall	2017	プラスチック	積む	独自制作	単一の動作・素材	第三類型	S	工場
D		ETH Zurich, DFAB House	2017	金属	編む	エンドエフェクターを制作	単一の動作・素材	第二類型	S	工場
D		Robotic Fabrication LAB of HKU, Ceramic Information Pavilion	2017	土	押し出す	エンドエフェクターを制作	単一の動作・素材	第二類型	S	工場
D		T_ADS, PAFF	2017	繊維素材	投げる	独自制作	単一の動作・素材	第三類型	S	現場
D		Embodied Computational Lab, The Living	2018	木	切削する	既製品の組み合わせ	単一の動作・素材	第五類型	L	工場
D		Gramazio Kohler Research, Gradual Assemblies	2018	木	ビス・釘を打つ	エンドエフェクターを制作	単一の動作・素材	第二類型	S	工場
D		Gramazio Kohler Research, Gradual Assemblies	2018	木	位置を固定する	エンドエフェクターを制作	複数の素材	第二類型	S	工場
D		Gramazio Kohler Research, Rock Print Pavilion	2018	小石・砂・土	積む	エンドエフェクターを制作	単一の動作・素材	第二類型	S	現場
D		MX3D, MX3D Bridge	2018	金属	押し出す	独自制作	単一の動作・素材	第二類型	M	工場
D		Alisa Andrasek, Cloud Pergola	2018	プラスチック	押し出す	エンドエフェクターを制作	単一の動作・素材	第二類型	S	工場
D		Apis Cor 3D printer	2018	コンクリート	ノズルから出す	独自制作	単一の動作・素材	第二類型	M	現場
D		Phillip Yuan, Cloud Village	2018	プラスチック	押し出す	エンドエフェクターを制作	単一の動作・素材	第二類型	S	現場
D		ME-ST, Bending Bridge	2018	木	曲げる	型・治具を制作	単一の動作・素材	第五類型	S	現場
D		Gramazio Kohler Research, Human-machine collaboration	2018	金属	位置を固定する	エンドエフェクターを制作	複数の素材	第二類型	S	現場
D		竹中工務店, EQ House	2019	金属	切削する	既製品	複数の動作	第五類型	M	工場
D		T_ADS, UROCO	2019	木	切削する	既製品	複数の動作	第五類型	S	工場
D		Forogram, Steampunk Pavilion	2019	木	位置を固定する	独自制作	複数の素材	第二類型	S	工場

3章 近年のデジタル・ファブリケーションにおける道具

D		Gramazio Kohler Research, Concrete Choreography	2019	コンクリート	押し出す	エンドエフェクターを制作	単一の動作・素材	第二類型	S	工場
D		MEAN, Deciduous	2019	プラスチック	押し出す	エンドエフェクターを制作	単一の動作・素材	第二類型	S	工場
D		Neri Oxman, Aguahoja	2019	プラスチック	押し出す	エンドエフェクターを制作	単一の動作・素材	第二類型	S	工場
D		VUILD, まれびとの家	2019	木	切削する	既製品	複数の動作	第五類型	M	工場
D		CO-LAB, Luum Temple	2019	竹	切削する	独自制作	単一の動作・素材	第二類型	S	工場
D		IAAC, ARCHITECTURE OF CONTINUITY	2019	粘土	押し出す	エンドエフェクターを制作	単一の動作・素材	第二類型	S	現場
D		IAAC, On Site Robotics	2019	粘土	押し出す	エンドエフェクターを制作	単一の動作・素材	第二類型	S	現場
D		Carl Fredrik Svenstedt Architect, the Delas Frères Winery	2020	石・レンガ	切削する	既製品	複数の動作	第二類型	S	工場
D		ITE, Shotcrete 3D Printing	2020	コンクリート	塗る	エンドエフェクターを制作	単一の動作・素材	第二類型	S	現場
D		WASP, Tecla	2021	土	押し出す	独自制作	単一の動作・素材	第二類型	M	現場
D		ITE, Robotic Rammed Earth	2021	土	塗る	エンドエフェクターを制作	単一の動作・素材	第二類型	SS	現場
D		ITE, Robotic Rammed Earth	2021	土	積む	エンドエフェクターを制作	複数の素材	第二類型	SS	現場
D		ZHA and Block Research Group, Striatum Bridge	2021	樹脂	押し出す	エンドエフェクターを制作	単一の動作・素材	第二類型	S	工場
A (自動化施工)		Hadrian X		レンガ	積む	独自制作	複数の素材	第五類型	L	現場
A		SAM 100		レンガ	積む	エンドエフェクターを制作	複数の素材	第五類型	L	現場
A		T-iROBO Slab Finisher		コンクリート	塗る	既製品	単一の動作・素材	第六類型	L	現場
A		Tybot		金属	縛る	既製品	単一の動作・素材	第六類型	L	現場
E (電動工具)		レシプロソー		金属、木など	切削する	既製品	複数の素材	第六類型		現場

3章 近年のデジタル・ファブリケーションにおける道具

E		電気鉋		木	切削する	既製品	単一の動作・素材	第六類型		現場
E		サンダー		木	切削する	既製品	単一の動作・素材	第六類型		現場
E		電動ドライバー		木	穴をあける	既製品	高	第六類型		現場
E		ハンマードリル		コンクリート 石・レンガ	穴をあける	既製品	複数の動作	第六類型		現場
E		シャーレンチ		金属	ボルトを締める	既製品	単一の動作・素材	第六類型		現場
E		丸鋸		木	切削する	既製品	単一の動作・素材	第六類型		現場
E		ディスクグラインダー		コンクリート 金属	切削する	既製品	複数の動作	第六類型		現場
E		ヒートカッター		プラスチック	切削する	既製品	単一の動作・素材	第六類型		現場
H (木工具・その他)		カットチゼル		コンクリート	切削する	既製品	複数の素材	第六類型		現場
H		鉋		木	切削する	既製品	単一の動作・素材	第一類型		現場
H		鑿		木	切削する	既製品	複数の動作	第一類型		現場
H		錐		木	穴をあける	既製品	複数の素材	第六類型		現場
H		リベッター		金属	ボルトを締める	既製品	単一の動作・素材	第六類型		現場
H		鍍		コンクリート・モルタル	塗る	既製品	高	第一類型		現場
H		クランプ		木	位置を固定する	既製品	複数の素材	第六類型		現場
H		コーキング工具		プラスチック	押し出す	既製品	単一の動作・素材	第六類型		現場
H		ガラス切り		ガラス	切削する	既製品	単一の動作・素材	第六類型		現場
H		金切り鋏		金属	切削する	既製品	単一の動作・素材	第六類型		現場










H		鋸		木	切削する	既製品	単一の動作・素材	第一類型		現場
H		やすり		金属	切削する	既製品	複数の素材	第六類型		現場
H		テーパリーマ		金属	穴をあける	既製品	単一の動作・素材	第六類型		現場
M (工業機械)		鉄筋ベンダー		金属	曲げる	既製品	単一の動作・素材	第六類型		現場
M		高速カッター		金属	切削する	既製品	単一の動作・素材	第六類型		工場
M		シャーリング		金属	切削する	既製品	単一の動作・素材	第六類型		工場
M		ボール盤		金属	穴をあける	既製品	単一の動作・素材	第六類型		工場
M		アルミ押し出しプレス機		金属	押し出す	型・治具を制作	単一の動作・素材	第四類型		工場
M		タイル押出成形機		土	押し出す	型・治具を制作	単一の動作・素材	第四類型		工場
M		バンドソー		金属	切削する	既製品	単一の動作・素材	第六類型		工場

図 10 収集した道具のリスト

(2) 分類の項目・分析の内容

まず第一に、デジタル・ファブリケーションに用いられている道具の基本的な機能（木を削る、レンガを積むなど）を整理するために、それぞれの道具において素材（木、コンクリート、レンガなど）と動作（削る、積むなど）を規定し、分類を行う。第二に、道具の制作手法（道具として既製品が用いられているか、独自に道具が制作されているか、あるいはその中間に位置するか）によって分類する。これに着目した理由としては、本研究では道具の使い手（設計者、施工者、生産者）がどれだけ道具に手を加えているかという指標が、どれだけ自由度の高いものづくりを実現できているかに関係すると考えられるからである。第三に、デジタル・ファブリケーションの道具が建築生産においてインパクトを持ちうるかという点を考察するため、その道具に汎用性があるか（扱える素材が複数あるか、機能が複数あるか）によって分類を行う。第四に、操作者に必要な技能を明らかにするために Function Analysis (2.2 (3)参照) と呼ばれる手法を用いて道具のインプットとアウトプットを整理する。

以上で得られた項目と「道具の制作手法」との関係性を二軸分析によって明らかにする。

まず、「道具の制作手法」と「制作物のスケール」の二軸分析を行うことで、建築スケールに適用可能な道具の制作手法を明らかにする。次に、「道具の制作手法」と「汎用性」の二軸分析により、汎用性が高い道具の制作手法を明らかにする。さらに、「道具の制作手法」と「道具に必要な技能」の二軸分析を行い、設計者が適切な技能のハードルの範囲内で行うことのできる道具の制作手法を明らかにする。最後に、「道具の制作手法」と「道具の動作」の二軸分析を行うことで、道具の動作による制作手法の違いについて明らかにする。

3. 2 事例の概要

年代別の事例数としては、90年代の事例が4事例、2000年代が4事例、2010年代以降が57事例となっており、2010年代以降にデジタル・ファブリケーション事例は急増しているということがわかる。これはETHやStuttgart ICD、IAACのようなデジタル・ファブリケーション施設を持った研究機関による実験的なプロジェクトの増加によるものである。2010年以前の8事例中7事例が建築スケール（住宅または公共建築）である一方で、2010年代以降の57事例のうち建築スケールのプロジェクトは13事例のみであり、建築生産への適用に関しては課題があるといえる。

2010年以前の事例は既製品のCNC加工機を用いる事例が多いが、2010年代の事例の特徴として、産業用ロボットのエンドエフェクターの開発及びプログラミングを行うことで新規性の高い素材・構法・形態を実現する事例が多い。設計者による「道具の制作」を行うことで、既存の道具を使うよりも自由度の高い制作を行うことを目指すような傾向があるということが言える。

また、2010年以前の事例では複雑な自由曲面形状のような「連続的」でなめらかな形態が多いが、2010年代以降の事例では、小さな部材を積層させた形状のような、情報量が多い「離散的」な形態が多い。このような形態に関する特徴の傾向はM. カルボの”The Second Digital Turn” (2017)でも指摘されている。M. カルボはここで2010年代に大きなパラダイムシフトであるセカンド・デジタル・ターンが起きたと述べているように、2010年以前と2010年代以降のデジタル・ファブリケーション事例には用いられている道具の制作手法および形態的特徴の観点で異なる傾向がみられるということがわかる。

2010年代後半の傾向としては、K. Dörflerらが指摘しているように⁶¹、工場加工用のロボットだけではなく、現場での組立を行うロボットにも注目が集まっている。産業用ロボットによる加工を建築スケールの現場での組立に適用することを目指し、ロボット自体を移動させることで大きなスケールの構造物でも作ることができるようにする事例や、現場で生じる誤差をセンシングによって吸収する事例がその一例である（図11）。

⁶¹ Dörfler, Kathrin, et al. "Mobile robotic fabrication beyond factory conditions: Case study Mesh Mould wall of the DFAB HOUSE." *Construction Robotics 3.1*, 2019, pp.53-67

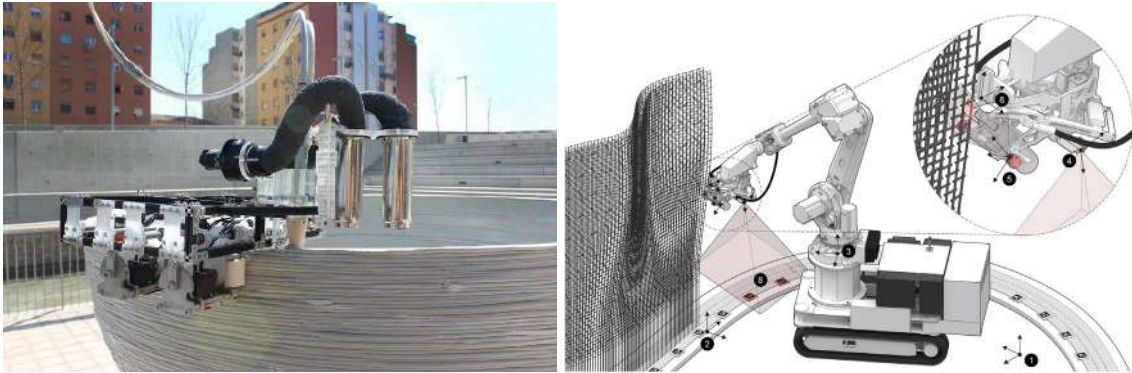


図 11 MiniBuilders (IAAC, 2014)⁶², DFAB House (ETH Zurich, 2017)⁶³

また、日本の事例は 65 事例中 7 事例で、事例数としてはかなり少ない。日本では 3D プリンティングの法規制が厳しいということもあり、CNC 加工機を用いた事例が中心である(7 事例中 4 事例)。

3. 3 分類項目

(1) 素材

道具が持つ機能は、木を削る道具、レンガを積む道具など、素材と動作の組み合わせで表すことができる(表 1)。このうち、素材に関しては事例数が多いものから順に、「木」、「プラスチック・樹脂」、「小石・砂・土」、「金属」、「コンクリート・モルタル」、「石・レンガ」、「スタイロフォーム」、「繊維素材」、「ガラス」、「スタイロフォーム」という 10 項目に分類した。

⁶² “MINIBUILDERS”, Iaac, (<https://iaac.net/project/minibuilders/> 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)

⁶³ Dörfler, Kathrin, et al., *op. cit.*, p.61

表 1 道具の機能（素材と動作）による分類

	切削する	押し出す	積む	曲げる	キャスト	ビス・ 釘を打 つ	塗る	位置を 固定す る	編む	引き延 ばす	投げる
木	Metropol Parasol UROCO まれびとの家 Serpentine Gallery Pavilion 2005 Wikihouse Fablab House 木材会館 Norwegian Wild Reindeer Centre Pavilion Centre Pompidou Metz ICD/ITKE Pavilion 2011 The Living Wood Chip Barn プレカット加工機 丸鋸 鋸 鋸 鋸 電気鋸		STIK Pavilion ITA-Roof	Bending Bridge Steampunk Pavilion 曲木プレス機		Robotic Pavilion Gradual		Gradual			
プラスチッ ク・樹脂	Hungerburbahn	Deciduous Cloud Pergola Aguahoja Communication Landscapes Cloud Village ポリカーボネー ト押出成形機	ICD Aggregate Wall		Precious Plastic	電動ドラ イバー				Robotic	
小石・砂・ 土		Ceramic INformation Pavilion Tecla Architecture of Continuity On Site RObotics タイル押出成形	Rock Print Pavilion Digital Grotesque Robotic Rammed Earth				Robotic Rammed Earth 鋸				Remote Material
金属	EQ House Neuer Zollhof シャーリング ディスクグラインダー 高速カッター バンドソー 金切り鋸	MX3D Bridge アルミ押し出し プレス機		Dongdaemun Design Plaza Guggenheim Museum Bilbao ロールベンダー 鉄筋ベンダー	日本橋旧テ ラー屋根改修			Human Machine	DFAB House LOCI Tybot		
コンクリー ト・モルタ ル	ディスクグラインダー カットチゼル レスブロソー	Concrete Choreography Apis Core 3D printer Stratus Bridge MiniBuilders			Fondation Louis Vuitton Neuer Zollhof	ハンマー ドリル	T-iROBO Slab Finisher Shotcrete 3D Printing 鋸				
石・レンガ	the Delas Frères Winery Bilbao Guggenheim ディスクグラインダー	真空押出成形機	The Brick Labyrinth Chi She Hadrian X SAM 100			ハンマー ドリル					
繊維素材	Luum Temple								ICD/ITKE Pavilion 2012		PAFF
ガラス				Fondation Louis Vuitton BMW Pavilion							
スタイロ フォーム	Form Tower										

■ 木工具 ■ 電動工具・工業機械 ■ 自動化施工 ■ デジタル・ファブリケーション

収集した 65 事例のうち「木」を扱っているものは 20 事例、「プラスチック・樹脂」は 10 事例、「小石・砂・土」は 9 事例、「金属」は 9 事例、「コンクリート・モルタル」は 7 事例、「石・レンガ」は 4 事例、繊維素材は 3 事例、ガラスは 2 事例、スタイロフォームは 1 事例であった。事例数としては木を用いたものが圧倒的に多かったが、Serpentine Gallery Pavilion 2005 (Alvaro Siza, 2005)やまれびとの家 (VUILD, 2019) で用いられたよ

うな CNC 切削機の道具が 12 事例と大部分を占めた。これらはパビリオンだけでなく木材会館（日建設計、2009）や Metropol Parasol (Jurgen Mayer, 2011)のような大規模建築においても適用されている。また、近年ではパビリオンスケールの構造物中心ではあるが、ICD/ITKE Research Pavilion 2011 (Stuttgart ICD, 2011)や Wood Chip Barn (AA school, 2016)のような 5 軸以上の CNC 加工ロボットを用いて 3 次元的に切削を行う事例も見られる。

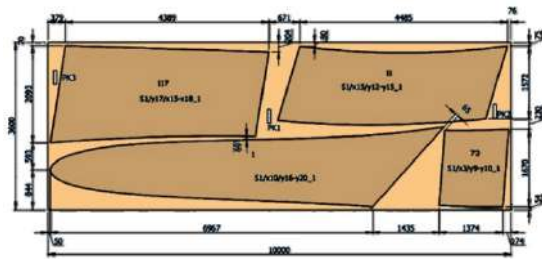


図 12 Metropol Parasol (Jurgen Mayer, 2011)の切削データ⁶⁴



図 13 ICD/ITKE Pavilion 2011 (Stuttgart ICD, 2011)の 3 次元 CNC 加工⁶⁵

また、2 番目に多かったプラスチック・樹脂（10 事例）および 3 番目に多かった「小石・砂・土」（9 事例）は、2010 年代に 3D プリント系の道具を用いた実験的試みによって増加していると考えられる。特に、「小石・砂・土」は工業的な建築生産においてはほとんど使われてこなかった素材であり、デジタル・ファブリケーション特有の傾向である

⁶⁴ Koppitz, Jan-Peter, et al. "Metropol parasol-digital timber design." *Computational Design Modelling*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011, pp.249-257

⁶⁵ Krieg, Oliver David, et al. "Biomimetic lightweight timber plate shells: computational integration of robotic fabrication, architectural geometry and structural design." *Advances in architectural geometry 2014*. Springer, Cham, 2015, pp.109-125

といえる。

(2) 動作

動作による分類に関しては、事例数が多いものから順に「切削する」、「押し出す」、「積む」、「曲げる」、「キャスト」、「ビス・釘を打つ」、「塗る」、「位置を固定する」、「編む」、「引き延ばす」、「投げる」という 11 種類に分類した。もっとも多かったのは「切削する」の 19 事例で、これは CNC 加工機が普及した結果によるものと思われる。次に多かったのは「押し出す」の 14 事例で、これは 2010 年代の 3D プリンティングを用いた実験的な試みの増加によるものである。デジタル・ファブリケーションに固有な動作（ほかの道具には見られない動作）も多く見られた。「積む」（8 事例）、「位置を固定する」（3 事例）、「引き延ばす」（2 事例）、「投げる」（2 事例）は既存の道具ではあまり見られない新しい動作の道具であるといえる。このような新しい動作を伴う道具は、レンガを 3D 上で設計した複雑な形状通りに配置するエンドエフェクターを開発した The Brick Labyrinth (Gramazio Kohler Research, 2017)、Steampunk pavilion (Fologram, 2019) など、そのほとんどがペブリオンスケールにとどまっている。その一方で、「積む」や「位置を固定する」といった動作は、マテリアルによる制約がないため、汎用性を持ち建築に応用されていく可能性もあるといえる。実際、レンガを配置するエンドエフェクターを住宅に適用した Chi-She (Archi-Union Architects, 2016) のように、建築スケールで応用される事例も一部見られる。

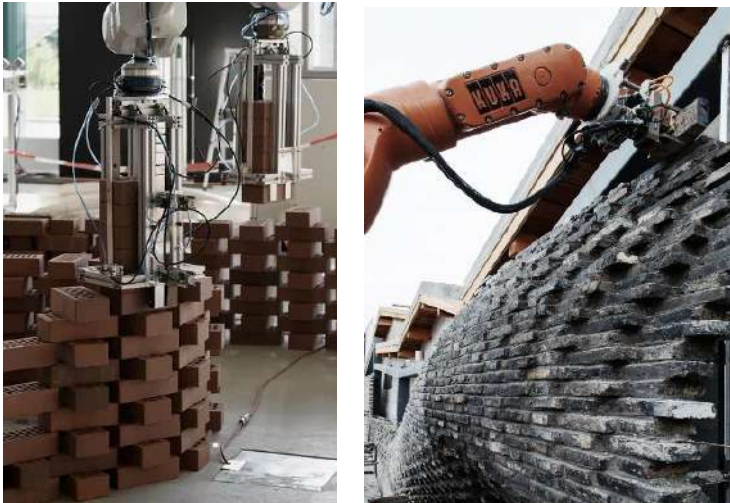


図 14 積む道具: The Brick Labyrinth (Gramazio Kohler Research, 2017)⁶⁶, Chi She (Archi Union Architects, 2016)⁶⁷

⁶⁶ “MAS 2016 / 17“, MAS ETH DFAB (<https://www.masdfab.com/work-1617-bricklabyrinth> 閲覧日 2022 年 1 月 15 日)

⁶⁷ Yuan, Philip F., and Keke Li. "Novel Bricks: A Scenario of Human–Machine

(3) 道具の制作手法

道具の制作手法（既製品か独自に制作するか）に着目し、「既製品」、「既製品の組み合わせ」、「型・治具を制作」、「既製品を改造」、「エンドエフェクターを制作」、「独自制作」の5種類に分類した。（図 15）



図 15：道具の制作手法による分類

「既製品」の事例は、作りたい形態・素材に合わせて設計者が道具を制作することはせず、既存の道具を使って制作を行うような事例である。複雑曲面形状を大型 CNC 加工機で実現した Norwegian Wild Reindeer Centre Pavilion (Snohetta, 2011) や $4 \times 2 \times 1\text{m}$ の砂型 3D プリンターを用いた Digital Grotesque (Michael Hansmeyer, 2013) のような、パビリオンスケールで既存の CNC 加工機や 3D プリンターを使用しているもののほか、木材会館

(日建設計、2009) やポンピドゥー・センター・メス(坂茂, 2010)など、大規模建築にも適用されている。既存の道具を使うため、制作物の自由度は比較的低いといえる。



図 16 既製品の道具の利用: The Norwegian Wild Reindeer Centre Pavilion (Snøhetta, 2011)⁶⁸, Digital Grotesque (Michael Hansmeyer, 2013)⁶⁹

「既製品の組み合わせ」は、新しい道具を独自で開発するというよりも、既存の道具を組み合わせることで道具の開発コストを抑えながら自由度の高い制作物を実現するというものである。The Living (Embodied Computational Lab, 2017)は、既存の CNC サンドブラスターを機械学習ソフトウェアと組み合わせることで、手作業でしかできなかった板材の節だけを削るという機能に、手作業にはない効率性を付与させた道具を開発している⁷⁰。また、Bending Bridges (ME-ST, 2018)はパラメトリックに設計されたジョイントによるアクティブ・ベンドと既存のスチームベンドを組み合わせることで曲率の大きな二次曲面構造物を実現している⁷¹。

⁶⁸ Cajsja Carlson, “Snøhetta “managed to push the world forward through architecture” says Jenny B Osuldsen in VDF talk”, Virtual Design Festival (<https://www.dezeen.com/2020/05/18/snohetta-push-the-world-forward-architecture-jenny-b-osuldsen-vdf/> 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)

⁶⁹ Digital Grotesque —Printing Architecture (<http://digital-grotesque.com/about.html> 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)

⁷⁰ a+u 2020 年 4 月号、2020、pp.58-65

⁷¹ “Bending Bridges —Double-Layered Lightweight Load-Bearing Structures”, ME-ST (<https://www.me-st.com/Bending-Bridges> 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)

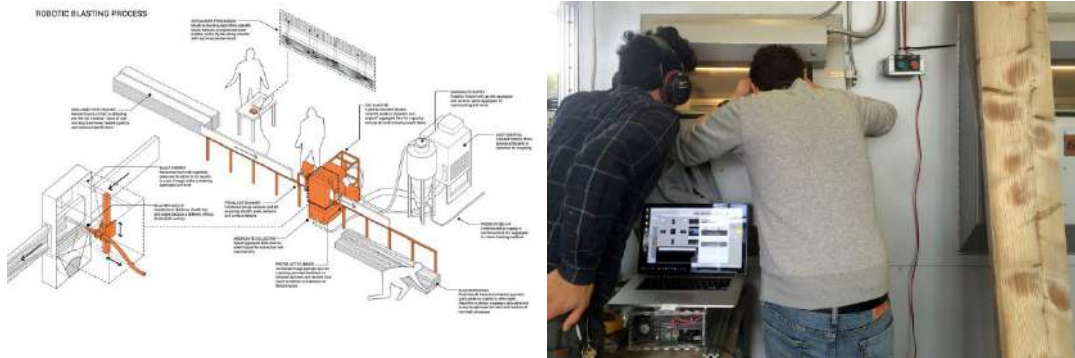


図 17 既製品の道具の組み合わせ: The Living (Embodied Computational Lab, 2017)⁷²

「型・治具の制作」の事例は、道具を一から開発するのではなく、型や治具の部分だけをデジタル・ファブリケーションを用いて制作する事例である。Neuer Zollhof (Gehry Partners, 1999)や Fondation Louis Vuitton (Gehry Partners, 2014)では、複雑曲面の PC コンクリート型枠をスタイロフォームの CNC 切削により制作している⁷³⁷⁴。ここでは一度使った型枠を少しずつ削っていくことで型枠の再利用を可能にし、低コストでの複雑曲面の制作を実現している。このようなスタイロフォーム型枠の利用は、BMW Pavilion (B. Franken, 2000)のようなガラスの二方向曲げにも用いられており、様々な種類の加工において適用されている。



図 18 型・治具を制作: Fondation Louis Vuitton, Gehry Partners, 2014⁷⁵

「既製品を改造」の事例は、特定の素材や形状を制作する目的に合わせて既存の道具を

⁷² a+u 2020 年 4 月号、2020、pp.58-65

⁷³ Aubry, Simon, et al. "A UHPFRC cladding challenge: the fondation Louis Vuitton pour la création "Iceberg"." *2nd RILEM-fib-AFGC International Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete*. 2013

⁷⁴ Kolarevic, Branko, *Digital fabrication: manufacturing architecture in the information age*, 2001

⁷⁵ Aubry, Simon, et al., *op. cit.*

改造しているものであるが、Guggenheim Museum Bilbao (F. O. Gehry, 1997) や Dongdaemun Design Plaza (ZHA, 2011) といった大規模な公共建築の事例がみられる。Guggenheim Museum Bilbao では二種類の道具の制作を行っている。まず、キルト模様のチタンパネルの圧延曲げを実現するために、自動車産業で用いられていた油圧緩衝器を改造して独自のロールベンダーを開発している。さらに、金属用の CNC 加工機を石材用に改造し、二次曲面形状の石材パネルを実現している⁷⁶。いずれも既存の加工機を改造して特定の素材や形状に特化した機械を開発した事例であるとえる。Dongdaemun Design Plaza では、既存の引張曲げ成形機 (Stretch Forming Machine) を改造して MPSF Machine (Multi Point Stretching Forming Machine) を開発し、一枚一枚形状が異なる二方向曲げアルミパネルを低コスト、短工期で加工することに成功している⁷⁷ (図 19)。

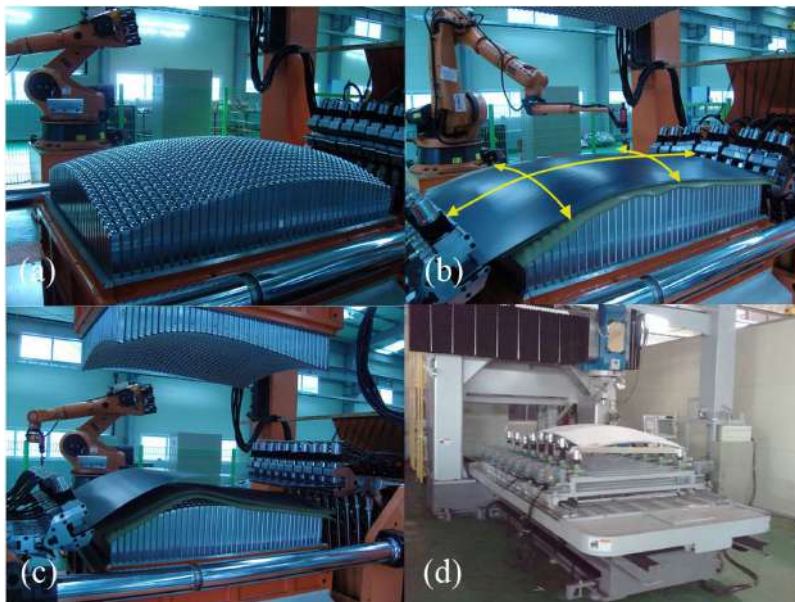


図 19 既製品の改造: Dongdaemun Design Plaza (ZHA, 2011)⁷⁸

「エンドエフェクターのみを制作」の事例は、既存の産業用ロボットを使用しつつ、ロ

⁷⁶ Ackley, L., et al., Managing the construction of the Museum Guggenheim Bilbao, Boston: Center for Design Informatics, Harvard Design School, 2002

⁷⁷ Lee, Ghang, and Seonwoo Kim. "Case study of mass customization of double-curved metal façade panels using a new hybrid sheet metal processing technique." *Journal of Construction Engineering and Management* 138.11, 2012, pp. 1322-1330.

⁷⁸ Castañeda, E., et al. "Free-form architectural envelopes: Digital processes opportunities of industrial production at a reasonable price." *Journal of Facade Design and Engineering* 3.1, 2015, p.10

ボットのエンドエフェクターの部分の設計・制作およびプログラミングを設計者が行う事例である。Rock Print Pavilion (Gramazio Kohler Research, 2018)では、小石を糸で補強しながら積層させていく新たな構法を実現するために、独自のエンドエフェクターを開発している（図 20）。このような道具の制作手法を行っている事例は、制作物の自由度は非常に高い傾向にあるが、エンドエフェクターの制作およびプログラミングにあたってかなり高度な専門技能を必要とするという側面もある⁷⁹。

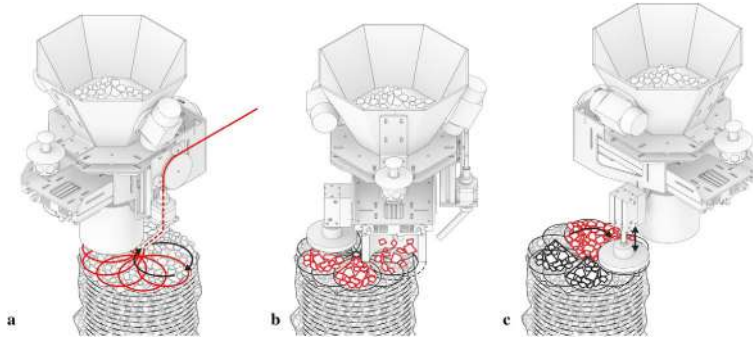


図 20 エンドエフェクターを制作: Rock Print Pavilion (Gramazio Kohler Research, 2018)⁸⁰

「独自制作」の事例は、新しい素材や複雑な形態を実現するために、設計者がオリジナルな道具を制作する事例である。独自でスティック型の木材に接着剤をつけて積層させる「ディスペンサー」と呼ばれる道具を独自に開発した⁸¹STIK Pavilion (T_ADS, 2014)や、竹専用の CNC 加工機を開発した Luum Temple (CO-LAB Design Office, 2019)などがある（図 21）。制作物の自由度は非常に高いといえるが、その一方で道具の開発コストは高くなるといえる。



図 21 独自制作の道具の利用: Luum Temple (CO-LAB Design Office, 2019)⁸²

⁷⁹ Buchli, Jonas, et al. *op. cit.*, pp.66-75

⁸⁰ Aejmelaesus-Lindström, Petrus, et al., *op. cit.*, pp.97-113

⁸¹ Hironori Yoshida, et al., *op. cit.*

⁸² Zach Mortice, “建材としての竹が実現するカーボンネガティブな建築”, Redshift

緒方の以下の指摘にもとづき、設計者が道具をつくる行為がみられるほど、つまり道具の制作手法が「独自制作」に近づくほど、制作物の自由度は上がり、創造的な建築生産を行うことができると考えられる。

何かをつくるときに使う人の立場に立つことは必要不可欠だが、それもまた行き過ぎれば、つくる人と使う人を暗黙のうちに分断し、使う人自身がつくったり、つくりかえたりできる可能性を排除し、テクノロジーをブラックボックス化してしまうことにもつながる。未来のテクノロジーは、「使える」道具であるだけでなく、「つくれる」道具や「つくりかえられる」道具でもあるべきだろう⁸³。

その一方で、道具の開発コストを考慮すると、「既製品」に近づくほど道具を制作するコストは下がるが、同時に制作物の自由度は低くなる。その一方で、「独自制作」に近づくほど制作物の自由度は高くなるが、その分道具を制作するコストが大きくなるといえる。

今回収集した 65 事例のうち、14 事例が既製品、10 事例が「独自制作」であり、その中間的な段階と考えられる事例である「既製品の組み合わせ」が 2 事例、「型・治具を制作」が 6 事例、「既製品を改造」が 2 事例、「エンドエフェクターのみを制作」が 31 事例見られた。「既製品の組み合わせ」、「型・治具を制作」、「既製品を改造」のような中間的な制作手法はあまり見られず、「既製品」あるいは「エンドエフェクターを制作」・「独自制作」に二極化する結果となった。

(4) 汎用性

本文において用いる道具の「汎用性」は以下の定義に準拠する。

「汎用(versatile)」とは、特定の用途に限定した専用のものではなく、複数の用途に利用可能なことを意味しており、「万能(almighty)」とは異なる。本論文で「汎用性が高い」というのは、「用途限定の度合いが低い」という意味であり、他の同程度の汎用性のあるものと比べて、精度・操作性・信頼性の面で優れているという意味ではない⁸⁴。

(<https://redshift.autodesk.co.jp/bamboo-construction/> 閲覧日 2020 年 1 月 15 日)

⁸³ 緒方壽人、前掲書、pp.195-196

⁸⁴ 木村朝子, et al., 空間型作業での選択・移動操作に適した道具型デバイスの機能設計と評価, 情報処理学会論文誌 51.2, 2012, pp. 314-323

I. イリイチは「特定の需要（それをみたすために道具は特殊化するのだが）をつくりだすような道具と、自己実現を助ける補足的・援助的な道具とのあいだのバランスがとれていること⁸⁵⁾」を挙げており、専用化と汎用性のバランスは創造的な建築生産を行う上で重要であると考えられる。

例えば、電動工具のような先端のビットを付け替えられる道具はかなり汎用性が高い。インパクトドライバーには木材用、金属用、石材用のビットがあり、様々な素材を扱うことができ、穴開け用ビット、ビス打ち用、ボルト締め用のビットを付け替えることで複数の機能に対応している。電動工具が普及している要因の一つはこの汎用性の高さにあると考えられる。また、近年では RMT (Reconfigurable Machine Tool) と呼ばれる汎用性の高い工業機械もある⁸⁶⁾。これは交換可能なモジュールによって機械を構成することで生産の柔軟性を高めるというものであり、工業機械の分野においても汎用性が重要視されていることがわかる。また、J. Buchli らは「汎用性が高く、モジュール化され、再利用可能なソリューション⁸⁷⁾」がデジタル・ファブリケーションを建築生産に適用する上では必要不可欠であると述べている。

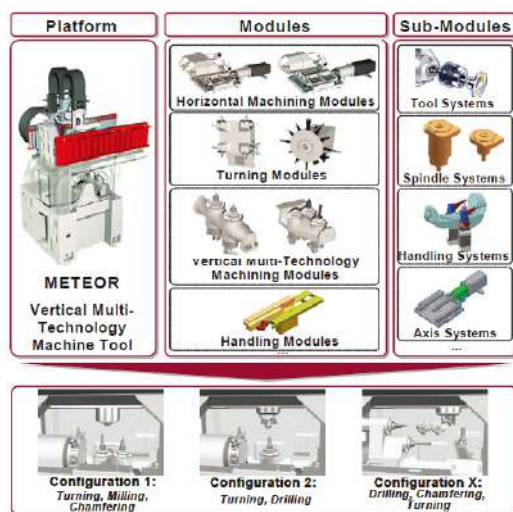


Figure 3.2: Reconfigurable Machine Tool [1].

図 22 Reconfigurable Machine Tool⁸⁸⁾

⁸⁵⁾ イヴァン・イリイチ、前掲書、p.65

⁸⁶⁾ Wiendahl, H-P., et al. "Changeable manufacturing-classification, design and operation." *CIRP annals* 56.2 , 2003, pp. 783-809

⁸⁷⁾ 筆者翻訳、Buchli, Jonas, et al., *op. cit.*, p.69

原文: *providing versatile, modular, and reusable solutions*

⁸⁸⁾ Wiendahl, H-P., et al., *op. cit.*, p.790

汎用性の有無を判断する方法として、その道具が機能を複数持つかに注目し、「動作が複数ある道具」、「動作は単一だが複数の素材を扱える道具」、「動作・素材が単一である道具」という 3 つのグループに分類する。動作の種類が複数ある道具としては、まれびとの家 (VUILD, 2019) で用いられた CNC 加工機のような、外形を切りだす、接合部を削る、穴をあけるなど多様な加工を行うことができる道具が挙げられる (図 23)。機械に取り付けるエンドミルを変えることで、目的に合わせて道具の動作を使い分けることができる。素材を複数扱える道具としては、一つのロボットで木材を複雑な 3D モデル通りの位置に固定し、別のロボットでビスを打っていくエンドエフェクターを開発した Gradual Assemblies (Gramazio Kohler Research, 2018)における位置を固定するロボットのような、素材の制限を受けない道具が挙げられる (図 24)。動作・素材が単一である道具としては、LOCI (AA school, 2016)で用いられているロボットのような、一つの素材、一つの動作に特化して開発された道具が挙げられる (図 25)。

分類の結果、動作の種類が複数ある道具は 23 事例、素材を複数扱える道具は 5 事例、動作・素材が単一である道具は 37 事例となった。全事例のうち半分以上が動作・素材が単一である道具に分類されており、汎用性がデジタル・ファブリケーションの課題になっているということがわかる。



図 23 動作が複数ある道具: まれびとの家 (VUILD, 2019) ⁸⁹

⁸⁹ “まれびとの家”, VUILD Architects (<https://architects.vuild.co.jp/works/house-for-marebito/> 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)



図 24 素材が複数扱える道具: Gradual Assemblies (Gramazio Kohler Research, 2018)⁹⁰、ITA Roof (ETH ITA, 2016)⁹¹



図 25 動作・素材が単一の道具: LOCI (AA school, 2016)⁹²

(5) 操作者に必要な技能

道具の性能と道具に必要とされる技能のバランスも道具としてのデジタル・ファブリケーションを考えるうえで重要である。イリイチは「自分のかわりに働いてくれる道具ではなく、自分とともに働いてくれる新しい道具⁹³」が望ましいと述べている。また、西野は人間と道具の関係について、人間のスキルと道具の技術の双方に一定の負担を要する「スキルトロニクス」な道具が望ましいと述べている⁹⁴。

道具を使うのに必要な技能に関する考察を行うために、道具のインプットとアウトプットについて分類を行った。道具のインプットとしては、道具を用いるために使うエネルギー、道具が扱う物質、道具に入力される情報の三つがある。道具のアウトプットも同様に、道具を用いたことで生み出されるエネルギー、道具を用いたことで結果として生じる

⁹⁰ “Gradual Assemblies, Rome, 2018”, Gramazio Kohler Research

(<https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/lehre/353.html> 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)

⁹¹ “Digital assembly of a complex roof structure”, ETH Zurich

(<https://ita.arch.ethz.ch/archteclab/sequential-roof-.html> 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)

⁹² “LOCI”, AA 2016 (<https://pr2016.aaschool.ac.uk/Loci> 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)

⁹³ イヴァン・イリイチ、前掲書、p.38

⁹⁴ 西野順二、前掲書

物質、道具を用いたことで生まれる情報の三つがある。ここでは Function Analysis の手法（2.2 (3)参照）を用い、道具のインプットとアウトプットを詳細に分析した。これにより、技能を必要とするインプットの有無及びアウトプットの自由度の高さが明らかになると考えられる。分析の結果、技能を必要とされると考えられるインプットの種類により、すべての道具を6つのグループに類型化した。（図26）。

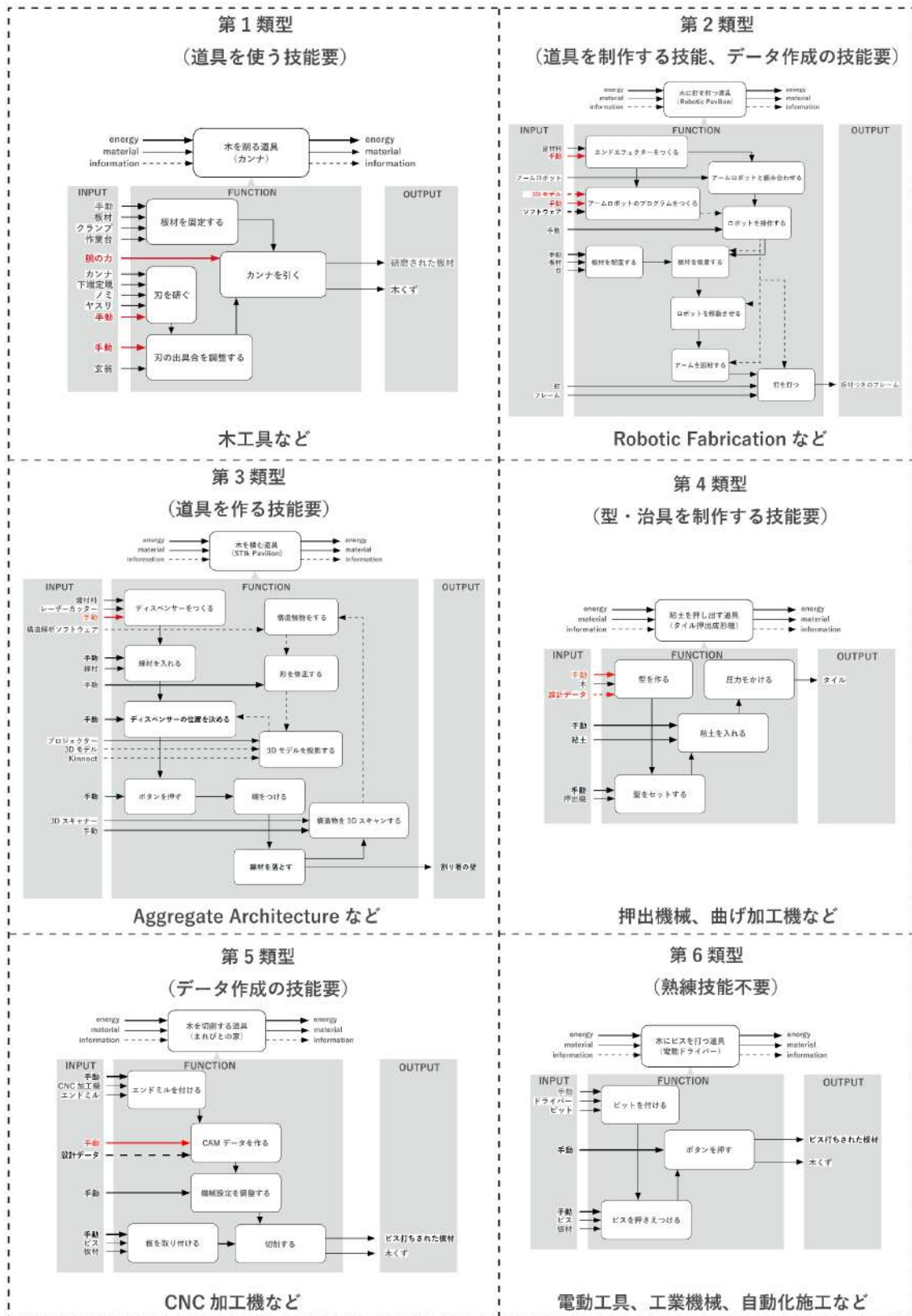


図 26 : Function Analysis による道具の分類 (赤字は技能を要するインプット)

第 1 の類型として、伝統的な木工具のように、多様な身体的動作をインプットすることで、多様なアウトプットを生成する道具あげられる (図 27)。この多様な身体的動作のインプットは、実際に道具を使う際の身体的動作と、道具の調整を行う際の身体的動作が含まれる。例えば、熟練した職人が鉋を用いる際の身体的動作は、長年の訓練から生まれる技能を要する作業である。また、職人は鉋を常に手入れすることで質の高い加工を行う。そのため、この第 1 類型の道具には、道具を調整する技能および道具を使う技能が必要であると考えられる。

第 2 の類型は、産業用ロボットのように、設計者が制作したエンドエフェクターおよびロボットのプログラムをインプットすることで、多様な形態を生成する道具である (図 28)。エンドエフェクターの制作やロボットのプログラミングには機械工学の知識を用いるため、J. Buchli らが指摘している⁹⁵ように非常に高度な専門技能を要する。このように、第 2 類型の道具には道具を制作する技能およびデータを制作する技能が必要となる。

第 3 の類型は、K. Dierichs らが Aggregate Architecture と呼んでいる⁹⁶ような、インプットは単一でも、操作者の不正確さや自然発生的なランダムさによって多様な形を生み出す道具である。例えば STIK Pavilion (T ADS, 2014) では、道具の操作者が実際に作った壁の形状と 3D モデルとのずれをスキャンし、構造解析を再び行って 3D モデルを修正し、再びそのデータに基づいて道具の操作者に指示するというシステムを作っている⁹⁷ (図 29)。結果として生成される形は道具の使用者の施工の不正確さを吸収したランダムな形となる。道具はどんな操作者でも使うことができるように制作されており、精度の高い加工も要求されていないため、道具を使う技能は必要としない。その一方で、そのような非熟練技能者でも使用可能な道具を制作する技能が必要となる。

第 4 の類型は曲げ加工機や押出機械のように、設計情報に基づいた型や治具をインプットすることで、多様なアウトプットを生成する道具である (図 30)。このような道具は、機械そのものは単一の加工を行うため、道具を使う技能は必要としない。その一方で、作りたいものに合わせて交換可能な型や治具といった部品を作る技能が必要である。

第 5 の類型は、CNC 加工機のように、多様な情報をインプットして、多様な形を生成する道具である (図 31)。ここでは道具を使う技能のハードルは低い、データを生成する技能が必要とされる。

第 6 の類型は、電動工具、工作機械、自動化施工ロボットのような、インプットが単一である結果、アウトプットも単一の形を生成するというものである (図 32)。電動工具は

⁹⁵ Buchli, Jonas, et al., *op. cit.*, p.66-75

⁹⁶ Dierichs, Karola, and Achim Menges. "Towards an aggregate architecture: designed granular systems as programmable matter in architecture.", *Granular Matter* 18.2, 2016, p.25

⁹⁷ Hironori Yoshida, et al., *op. cit.*

エンドビットの交換によってバリエーションを生み出すため、特別な技能を必要としない。工作機械や自動化施工ロボットは道具を使うために必要な技能に比べて道具の性能への負担が大きいため、操作者には特別な技能が必要とされないと考えられる。

第 1 類型から第 6 類型に向かうほど、道具の操作者が必要とする技能のハードルは低くなっていくが、その分道具に求められる性能が増大していく。西野は必要な技能と道具の性能のバランスに関して、必要技能と道具の性能の双方に一定の負担を要する道具が創造的な生産活動を行う上で望ましいと述べている⁹⁸。例えば、必要技能に負担の大きい第 1 類型の道具は操作者によって得られる効果が大きく変わるという欠点があり、第 2 類型に関しても高度な専門技能を要すると指摘されており、必要技能の負担は大きいといえる。また、操作者が主体的に介入できる余地が少なく、道具の性能に負担が大きい第 6 類型の道具は操作者による創造性を発揮することが難しい。このことから、自由度の高い建築生産を行う上では両者のバランスがよい第 3、第 4、第 5 類型に可能性があるのではないかと推察される。第 3 類型の道具に関しては、道具を制作する技能に対する解決策を提示できれば、操作者の技能を必要としないため有効な道具の制作手法となると考えられる。第 4 類型の道具に関しても、デジタル・ファブリケーションの普及により設計者が型・治具を制作するハードルが下がっているため、設計者による道具の制作手法として有効になりえる。



図 27 第 1 類型の例: ノミ⁹⁹

⁹⁸ 西野順二、前掲書

⁹⁹ “ノミの使い方”, KAKURI

(<http://www.kakuri.co.jp/howtouse/%E3%83%8E%E3%83%9F%E3%81%AE%E4%BD%BF%E3%81%84%E6%96%B9/> 閲覧日 2022 年 1 月 15 日)



図 28 第 2 類型の例: Rock Print Pavilion (Gramazio Kohler Research, 2018)

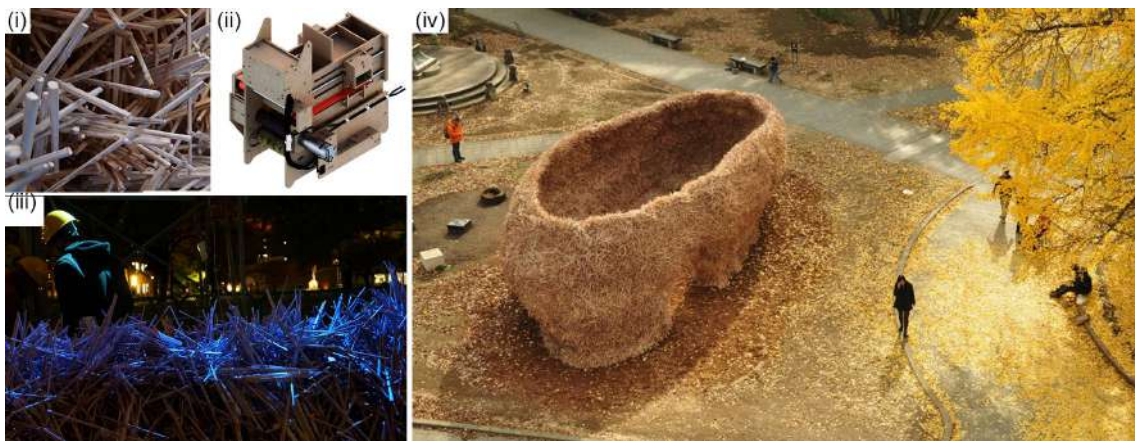


図 29 第 3 類型の例: STIK Pavilion (T_ADS, 2014) ¹⁰⁰



図 30 第 4 類型の例: 曲木プレス機 ¹⁰¹

¹⁰⁰ Hironori Yoshida, et al., *op. cit.*

¹⁰¹ “曲木 / まげる”, 浜本工芸

(<https://www.hamamotokougei.co.jp/concept/technique/mageru/> 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)



図 31 第 5 類型の例: Wikihouse (Architecture 00, 2013)



図 32 第 6 類型の例: ボール盤¹⁰²

デジタル・ファブリケーションが出現する以前では、伝統的に用いられている職人用の道具（操作者のスキル必要）と、電動工具のような素人向けの道具（操作者のスキル不要）に二極化するという見通しもあった¹⁰³（図 33）。

¹⁰² “A technician operating a drill press”, Wikimedia Commons

(<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1391089> 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)

¹⁰³ 日野永一、前掲書、1989

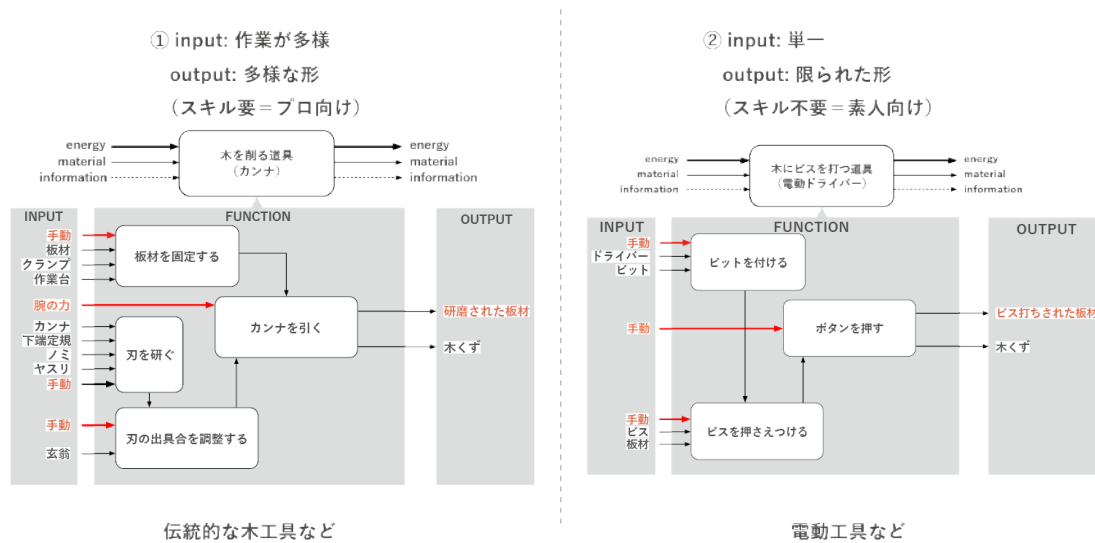


図 33：デジタル・ファブリケーション以前の道具の見通し（「日本の技術 木工具の歴史」（日野、1989）をもとに筆者作成）

しかしながら、技能が必要なインプットの種類という共通の軸を通じて、工業機械やデジタル・ファブリケーションも含めて分類を行うと、道具はより多様化しているということがわかる。そして、道具を扱うのに必要な技能は、道具を使う技能だけではなく、道具を制作する技能、交換可能な部品を作る技能、インプットする情報を生成する技能、など多岐にわたるということがわかる。

道具のアウトプットに関して整理を行うと、第 1 種類の道具が最もアウトプットの多様性が高く、第 6 類型に向かうほどアウトプットは単一になっていくと考えられる。第 6 類型に向かうほど操作者に必要な技能は少なくなっていくので、アウトプットの多様さと必要な技能はある程度トレードオフであるということが言えるだろう。

インプットされる設計情報がどのように道具に付与されるかに関して整理すると、第 1 の類型は、設計情報が道具の操作者の身体的動作に直接インプットされる。第 2、第 5 の類型では機械やロボットに設計情報が送られる。第 3 の類型ではその両方がみられる。第 4 の類型では、設計情報が一度型や治具といった物理的なものに付与され、そこから機械に情報が伝わっていく。この第 4 の類型においては設計情報を直接ものに変換するという過程が存在するため、この過程にデジタル・ファブリケーションを適用する方向性があると考えられる。この過程がデジタル・ファブリケーションによって可能になれば、型や治具を作るといった専門技術者の技能は不要となり、設計者の技能の延長として道具の調整が行われると想定される。例えば、日本橋旧テラー堀屋改修（三井嶺建築設計事務所、2016）では、複雑な鋳鉄の鋳型を 3D プリンターで制作することで、自由度の高い形状の耐震ブレースを実現している（図 34）。この複雑な鋳型を既存の技術で作ると高いコスト

がかかるが、設計者がデジタル・ファブリケーションを用いることで、型を作る技能を担保しているといえる。また、Precious Plastic という廃棄プラスチックから家具やプロダクトを制作するコミュニティでは、プラスチック射出成型の型の部分だけをユーザーが CNC 加工を活用して制作することで、ユーザーが作りたい形状を自由に作るができる (図 35)。これもデジタル・ファブリケーションを用いた型を作る技能の補完 であるといえる。

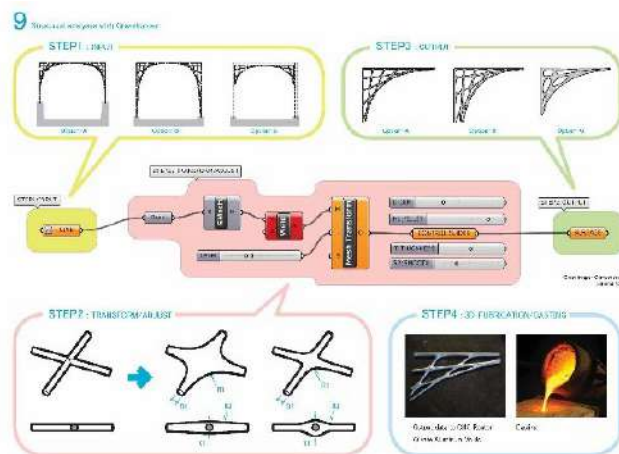


図 34 設計者による型の制作: 日本橋旧テーラー堀屋改修 (三井嶺建築設計事務所、2016) ¹⁰⁴

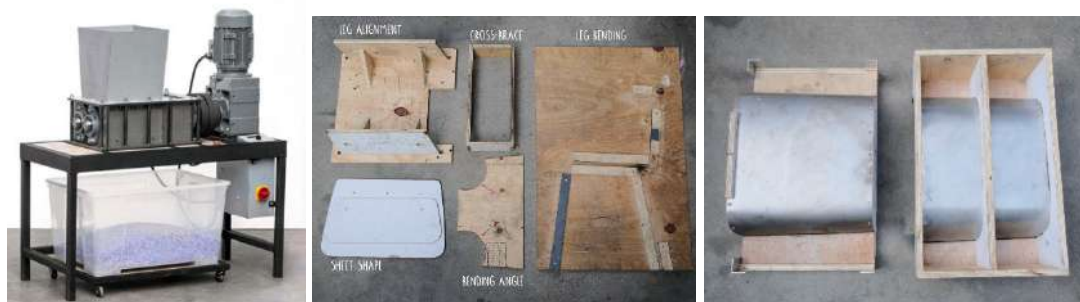


図 35 ユーザーによる型の制作: Precious Plastic¹⁰⁵

3. 4 二軸分析

(1) 道具の制作手法と制作物のスケール

まず、建築スケールで実装可能な道具の制作手法を明らかにするため、道具の制作手法

¹⁰⁴ “日本橋旧テーラー堀屋改修”, 三井嶺建築設計事務所

(<https://reimitsui.com/nihombashi.html> 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)

¹⁰⁵ Precious Plastic (<https://community.preciousplastic.com/academy/intro.html> 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)

と制作物のスケールをプロットした（表 2）。独自制作の手法をとっているプロジェクト 11 事例のうち 9 事例はパビリオンスケール以下となっている。さらに、エンドエフェクターの制作を行っているプロジェクト 29 事例のうち 27 事例がパビリオンスケール以下である。一方で、既製品の道具を用いている事例は、14 事例中 2 事例がパビリオンスケール以下となっており、比較的建築スケールで実現している割合が高い。ここからわかるように、道具の制作手法が独自制作に近いものほど制作物のスケールは小さいものが多く、道具が既製品に近づくほど建築スケールで実現しやすい傾向にあるということがわかる。制作物のスケールと道具の使いこなしはある程度トレードオフの関係にあるといえる。その一方で、「既製品の組み合わせ」、「型・治具を制作」、「既製品を改造」による手法を用いているプロジェクトでは、10 事例中 8 事例が建築スケールで実現しており、「独自制作」、「エンドエフェクターを制作」に比べて建築スケールで実現している割合が高いということがわかる。これは既製品の道具をうまく活用しつつ目的に合わせた道具の専用化を行うことで、道具の開発コストを抑えられているためだと推測される。ゆえに、これらの制作手法は建築生産に適用できる可能性が高いと考えられる。

表2 道具の制作手法と制作物のスケールの関係

	既製品	既製品の組み合わせ	型・治具を制作	既製品を改造	エンドエフェクターを制作	独自制作
L (公共建築)	Neuer Zollhof (金属) Hungerburgbahn (プラスチック) Centre Pompidou Metz (木) Fondation Louis Vuitton (ガラス) the Delas Frères Winery (石) 木材会館 (木) Metropol Parasol (木)	The Living (木)	Neuer Zollhof (コンクリート) Fondation Louis Vuitton (コンクリート) BMW Pavilion (ガラス) 日本橋旧テラー堀屋改修 (金属)	Dongdaemun Design Plaza (金属) Guggenheim Museum Bilbao (石) Guggenheim Museum Bilbao (金属)	ITA-Roof (木)	
M (住宅)	まれびとの家 (木) Wikihouse (木) Fablab House (木) EQ House (金属)				Chi she (石など)	Apis Core 3D Printer (コンクリート) Tecla (粘土)
S (パビリオン)	Norwegian Wild Reindeer Centre Pavilion (木) UROCO (木)	Bending Bridge (木)			The Brick Labyrinth (レンガなど) Robotic Pavilion (木) Gradual Assemblies (木) Foam Tower (発泡スチロール) Rock Print Pavilion (小石) Concrete Choreography (コンクリート) Deciduous (プラスチック) Aguahoja (プラスチック) Cloud Pergola (プラスチック) ICD/ITKE Pavilion 2012 (カーボンファイバー) Ceramic Information Pavilion (粘土) Cloud Village (プラスチック) On Site Robotics (粘土) Striatum Bridge (コンクリート) ICD/ITKE Pavilion 2011 (木)	STIK Pavilion (木) ICD Aggregate Wall (プラスチックなど) Steampunk Pavilion (木など) MX3D Bridge (金属) Luum Temple (竹) Remote Material Deposition (粘土) PAFF (繊維素材) Remote Material Deposition (粘土)
SS (モックアップ、プロダクト)	Digital Grotesque (砂)		Precious Plastic (プラスチック)		Architecture of Continuity (粘土) Shotcrete 3D Printing (コンクリート) Robotic Rammed Earth (土) Robotic Rammed Earth (土) Human Machine Collaboration (金属) DFAB House (金属) LOCI (金属) Communication Landscapes (樹脂) Osteobotanics (プラスチック) Robotic Infiltration (プラスチック)	Mini Builder (コンクリート)

(2) 道具の制作手法と汎用性

次に道具の汎用性を確保することができる道具の制作手法を明らかにするために、道具の制作手法と汎用性の有無の関係を考察するために、この二つの軸によるクロス集計を行った (表3)。

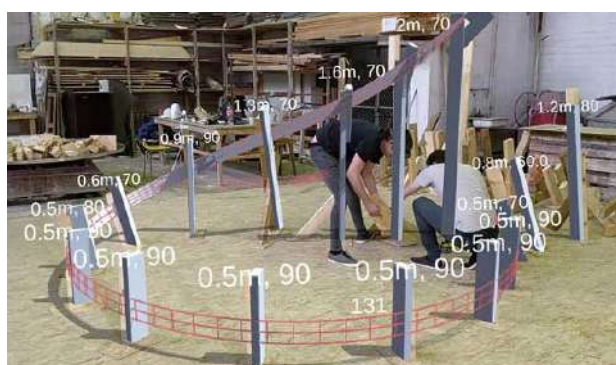
表 3 道具の制作手法と汎用性の関係

	既製品	既製品の 組み合わせ	型・治具を 制作	既製品を 改造	エンドエフェクター を制作	独自制作
動作の汎用性がある	Neuer Zollhof (金属) Hungerburbahn (プラスチック) Wikihouse (木) the Delas Frères Winery (石) まれびとの家 (木) Fablab House (木) Metropol Parasol (木) 木材会館 (木) Norwegian Wild Reindeer Centre Pavilion (木) EQ House (金属) UROCO (木)		Neuer Zollhof (コンクリート) Foundation Louis Vuitton (コンク リート) BMW Pavilion (ガラス) 日本橋旧テー ラー榎屋改修 (金属)	Guggenheim Museum Bilbao (石)	ICD/ITKE Pavilion 2011 (木) Serpentine Gallery Pavilion 2005 (木) Wood Chip Barn (木) Armadiro Vault (石) Robotic Rammed Earth (土) Gradual Assemblies (木)	
素材の汎用性がある					Chi she (石など) ITA-Roof (木) The Brick Labyrinth (レン ガなど) Human Machine Collaboration (金属) Robotic Pavilion (木) Foam Tower (発泡スチロー ル) Rock Print Pavilion (小石) Concrete Choreography (コンクリート) Deciduous (プラスチック) Aguahoja (プラスチック) Cloud Pergola (プラスチ ック)	Steampunk Pavilion (木など)
汎用性が低い	Foundation Louis Vuitton (ガラス) Centre Pompidou Metz (木) Digital Grotesque (砂)	The Living (木) Bending Bridge (木)	Precious Plastic (プラス チック)	Guggenheim Museum Bilbao (金 属)	ICD/ITKE Pavilion 2012 (カーボンファイバー) Ceramic Information Pavilion (粘土) Cloud Village (プラスチ ック) On Site Robotics (粘土) Striatum Bridge (コンク リート) Shotcrete 3D printing (コ ンクリート) Architecture of Continuity (粘土) DFAB House (金属) Communication Landscapes (樹脂) LOCI (金属) Osteobotics (プラスチ ック)	STIK Pavilion (木) ICD Aggregate Wall (プラスチック など) Apis Core 3D Printer (コンクリ ート) Tecla (粘土) MX3D Bridge (金 属) Luum Temple (竹) MiniBuilders (コンクリート) Remote Material Deposition (粘土) PAFF (繊維素材) Remote Material Deposition (粘土)

独自制作の道具 11 事例のうち 10 事例は素材や動作の複数性がなく、汎用性が低いとみなされる。ここから、設計者が道具に手を加えることで制作物の自由度が高くなれば、それだけその道具の汎用性が低くなるという問題があることがわかる。設計者が作る道具はまず素材を決定し、その素材を加工するのに特化した道具をつくるため、用途が限定された汎用性は低くなると推定される。その一方で、既製品を用いている道具は 14 事例中 11 事例が素材・動作の複数性を持っているとみなすことができ、比較的汎用性が高いと考えられる。既製品はできるだけ多くの用途に対応できる方が望ましいため、汎用性は高くなると考えられるが、制作物の自由度はあまり高くないといえる。このように、汎用性は高いが制作物の自由度は低い既製品と、汎用性が低い制作物の自由度は高い独自制作の

道具の間で極端な二極化が起こっているということがこの表からわかる。

一方で、「エンドエフェクターを制作」の道具で汎用性があると分類されている 10 事例のうち 5 事例は「積む」や「位置を固定する」といった用途の道具である。これらの道具は、素材によって制約を受けることがないため、その分汎用性を持つという傾向にある。例えば、Fologram 社が Steampunk Pavilion (2019)において用いた、3D モデルを実空間において MR で投影して墨出しを行うツールは、スマートフォンのアプリケーションとして開発され、特定の用途に縛られることなく汎用的に用いることができる道具となっている



☒ 36 Steampunk Pavilion (Fologram, 2019)¹⁰⁷

また、「エンドエフェクターを制作」において汎用性があると分類された 10 事例のうち、4 事例は CNC 切削に分類される。これらの道具は、独自制作であっても先端のビットを交換すれば様々な素材に対応し、複数の動作（削りだし、切り出し、穴あけ）に対応できると考えられるため、汎用性を獲得できると考えられる。西本が創造活動において使用される道具のあり方について、低コストで適応可能であることが重要であると指摘している¹⁰⁸ように、エンドビットの交換可能性の重要度は高い。このように、一定の交換可能性をもった道具は、制作物の自由度の高さと汎用性を両立させる可能性を持っているといえる。

既製品と独自制作の間に位置する「既製品を改造」では 3 事例中 2 事例、「型・治具を制作」では 5 事例中 4 事例が機能の複数性を持っており、汎用的な道具の制作手法となる

¹⁰⁶ Adam Williams, “Stunning Steampunk pavilion bends wood into weird and wonderful shapes”, NEW ATLAS (<https://newatlas.com/architecture/steampunk-pavilion-fologram/>
閱覽日: 2022 年 1 月 15 日)

¹⁰⁷ Adam Williams, “Stunning Steampunk pavilion bends wood into weird and wonderful shapes”, NEW ATLAS (<https://newatlas.com/architecture/steampunk-pavilion-fologram/>
閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)

108 西本一志、前掲書

可能性がある。「既製品を改造」を行っている Dongdaemun Design Plaza (ZHA, 2011)で開発されたアルミパネルの二方向曲げを行う MPSF Machine は、同プロジェクトにおける複雑曲面 RC の鋼製型枠の制作にも用いられている。さらに、Yeosu Expo Theme Pavilion (H Architecture, 2012)のような他の建築物においても繰り返し用いられるとともに、船舶や航空機の製造のような他産業にも応用されており、非常に高い汎用性を獲得しているといえる。



図 37 MPSF Machine で制作した PC 鋼製型枠¹⁰⁹

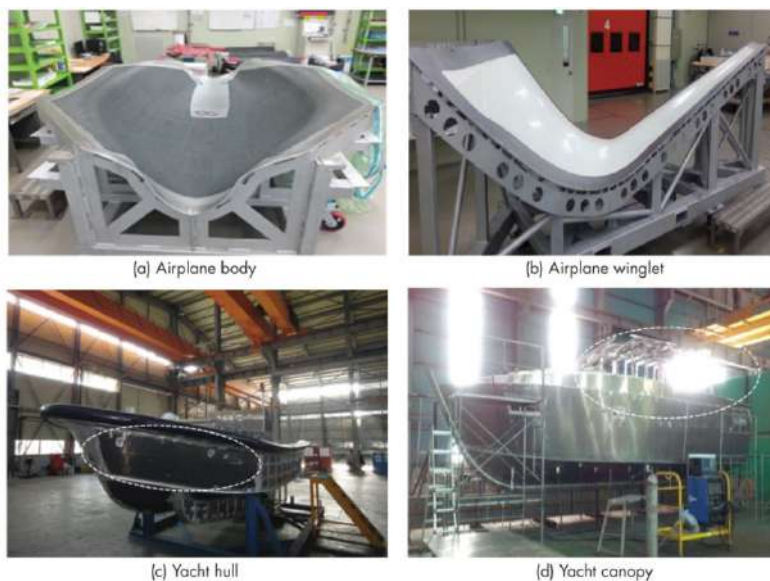


図 38 MPSF Machine の他産業への適用例¹¹⁰

「型・治具の制作」を行っている Neuer Zollhof (Gehry Partners, 1999)や Fondation Louis Vuitton (Gehry Partners, 2014)の PC 型枠に用いられているスタイロフォーム型枠

¹⁰⁹ Sacks, Rafael, et al. *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers*. John Wiley & Sons, 2018, p.464

¹¹⁰ Sacks, Rafael, et al., *Ibid.*, p.465

は、BMW Pavilion (B. Franken, 2000)においてはガラスの曲げ加工の型としても用いることができる。このように、型をデジタル・ファブリケーションで制作する場合は直接個別の素材を加工するわけではないため、素材・動作にかかわらず汎用性を持つことができると考えられる。

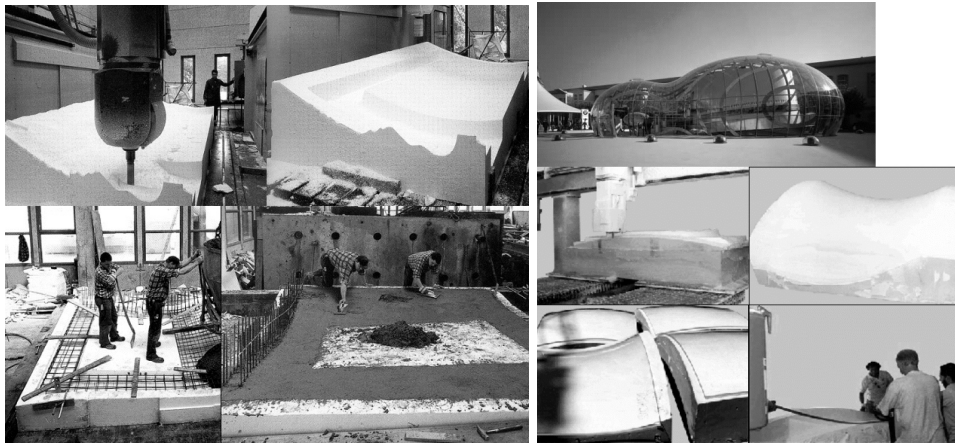


図 39 Neuer Zollhof (Gehry Partners, 1999)、BMW Pavilion (B. Franken, 2000)のスタイロフォーム型枠¹¹¹

(3) 道具の制作手法と必要な技能

設計者にも適用可能な技能の範囲内で行うことのできる道具の制作手法を明らかにするため、「道具に必要な技能」と「道具の制作手法」の二軸のクロス集計を行った(表 4)。3 章 3 節で技能によって分類した種類のうち、デジタル・ファブリケーションの道具は第 2 類型(道具を制作する技能およびデータを作成する技能が必要)、第 3 類型(道具を制作する技能が必要)、第 4 類型(型・治具を制作する技能が必要)、第 5 類型(データを作成する技能が必要)のいずれかに該当する。第 2 類型が最も技能のハードルが高く、第 5 類型が最もハードルが低い。西野による道具の性能と操作者の技能の双方が一定の負担を担うことが望ましいという言説から、この二つのバランスが良いと考えられる第 3 類型、第 4 類型、第 5 類型が建築生産に適用できる可能性が高いと考えられるため、この 3 つのいずれかに分類される道具の制作手法を明らかにする。

¹¹¹ Kolarevic, Branko., *op. cit.*

表 4 道具の制作手法と必要な技能の関係

	既製品	既製品の 組み合わせ	型・治具を 制作	既製品を 改造	エンドエフェクターを 制作	独自制作
第二類型 (道具を制作 する技能 ・データを作成 する技能)				Dongdaemun Design Plaza (金属) Guggenheim Museum Bilbao (石) Guggenheim Museum Bilbao (金属)	Chi she (石など) The Brick Labyrinth (レン ガなど) Robotic Pavilion (木) Gradual Assemblies (木) Foam Tower (発泡スチロー ル) Rock Print Pavilion (小石) Concrete Choreography (コ ンクリート) Deciduous (プラスチック) Aguahoja (プラスチック) Cloud Pergola (プラスチッ ク) ICD/ITKE Pavilion 2012 (カーボンファイバー) Ceramic INformation Pavilion (粘土) Cloud Village (プラスチッ	Apis Core 3D Printer (コンク リート) Tecla(粘土) Steampunk Pavilion (木) MX3D Bridge (金属) MiniBuilders(コ ンクリート) Luum Temple (竹)
第三類型 (道具を 制作する技能)						STIK Pavilion (木) ICD Aggregate Wall (プラスチッ ク) Remote Material Deposition (粘 土) PAFF (繊維素材)
第四類型 (型・治具を 制作する技能)			Neuer Zollhof (コンクリート) Fondation Louis Vuitton(コンク リート) BMW Pavilion (ガラス) 日本橋旧デラー 堀屋改修(金属) Precious Plastic (プラスチック)			
第五類型 (データを作成 する技能)	Fondation Louis Vuitton(ガラス) Centre Pompidou Metz (木) Digital Grotesque (砂) Neuer Zollhof (金 属)	The Living (木) Bending Bridge (木)				

「独自制作」の道具は 10 事例中 6 事例が第 2 類型に分類され、道具と作る技能及びデータを作る技能が必要とされる技能のハードルが高い傾向にあるということがわかる。「エンドエフェクターを制作」の道具もすべてが第 2 類型に分類され、技能のハードルが高い道具の制作手法であるといえる。一方で、既製品を用いた道具はすべて第 5 類型に分類されており、技能のハードルは低い傾向にある。このように、ここでも独自制作の道具と既製品の道具の間で二極化が見られる。また、「既製品を改造」の道具に関しては、Dongdaemun Design Plaza (ZHA, 2011)と Guggenheim Museum Bilbao (Gehry Partners, 1997)において行われている。前者は既存の引張成形機を改造し、型を変形することができ多点成形機と組み合わせて形状が 1 枚 1 枚異なる二次曲面曲げ加工を行うことができ

る MPSF Machine を開発し¹¹²、後者は金属用の CNC 加工機の改造による石材用 CNC 加工機の開発¹¹³および自動車製造用の油圧緩衝器を改造したキルト模様のチタン圧延用のロールベンダーの開発を行っている¹¹⁴。これらは既存の道具の機構そのものに手を加える必要があり、機械工学の見地を必要とするため、必要な技能のハードルが高くなってしまっていると考えられる。

一方で、「独自制作」の 10 事例のうち第 3 類型に分類されている 4 事例は道具の性能と道具に必要な技能のバランスが良いといえる。例えば STIK Pavilion (T_ADS, 2014)は、施工情報から設計情報へのフィードバックを行い、制作物を柔軟に変更しているため、組み立て時の精度が求められておらず、道具の操作者に特別な技能を必要としない。このような施工から設計へのフィードバックを行うことで操作者の技能を低減している事例が「独自制作」の事例において複数見られた。また、「型・治具の制作」を行っている事例ではそのすべてが第 4 類型に分類されるが、工法そのものは既存のものと同じで、型だけをデジタル・ファブリケーションで制作しているため、必要な技能のハードルは比較的低いと考えられる。「既製品の組み合わせ」を行っている The Living (Embodied Computational Lab, 2018)や Bending Bridges (ME-ST, 2018)に関しても、すべて第 5 類型に分類されており、必要な技能のハードルは低いといえる。

以上の分析から、「型・治具の制作」および「既製品の組み合わせ」、そして「独自制作」の一部の道具が制作物の自由度と必要な技能のハードルを両立できる可能性があり、建築生産に適用できる可能性が高い道具の制作手法であるといえる。

(4) 道具の制作手法と動作

道具の制作手法と動作の関係をプロットしたのが表 5 である。これまでの分析から、「既製品の組み合わせ」、「型・治具を制作」、「既製品を改造」といった中間的な制作手法が有効であると予想される。この制作手法に該当している事例は切削する道具で 2 事例、キャストの道具で 4 事例、曲げる道具で 4 事例みられた。すべての制作手法に対する割合でみると、切削する道具では 20 事例中 2 事例、キャストの道具では 4 事例中 4 事例、曲げる道具では 6 事例中 4 事例ということになる。このことから、キャストや曲げる道具は他の道具に比べてこのような中間的な制作手法を実現しやすい傾向にあるということがわかる。「キャスト」や「曲げる」の道具のうちこのような中間的な制作手法をとっている事例としては、Fondation Louis Vuitton (2014)や BMW Pavilion (2000)のように、CNC 切削による再利用可能なスタイロフォーム型枠の制作により、低コストで 1 つ 1 つ異なる

¹¹² Lee, Ghang, and Seonwoo Kim., *op. cit.*, pp.1322-1330

¹¹³ Ackley, L., et al., *op. cit.*, 2002

¹¹⁴ リチャード・セネット著、高橋勇夫訳『クラフツマン 作ることは考えることである』、筑摩書房、2016、pp.378-383

形状の二次曲面パネルを実現している例が挙げられる。

表 5 道具の制作手法と動作の関係

	既製品	既製品の 組み合わせ	型・治具を 制作	既製品を 改造	エンドエフェクターを 制作	独自制作
切削する	Neuer Zollhof (金属)	The Living (木)		Guggenheim Museum Bilbao (石)	Foam Tower (発泡スチロール) ICD/ITKE Pavilion 2011 (木) Serpentine Gallery Pavilion 2005 (木) Wood Chip Barn (木) Armadiro Vault (石)	Luum Temple (竹)
押し出す					Concrete Choreography (コンクリート) Deciduous (プラスチック) Aguahoja (プラスチック) Cloud Pergola (プラスチック) Ceramic Information Pavilion (粘土) Cloud Village (プラスチック) On Site Robotics (粘土) Striatum Bridge (コンクリート) Architecture of Continuity (粘土) Communication Landscapes (樹脂)	Tecla (粘土) Apis Core 3D Printer (コンクリート) MX3D Bridge (金属) MiniBuilders (コンクリート)
積む	Digital Grotesque (砂)				Chi She (石) The Brick Labyrinth (レンガ) Rock Print Pavilion (小石) ITA-Roof (木) Robotic Rammed Earth (土)	ICD Aggregate Wall (プラスチック) STIK Pavilion (木)
曲げる	Fondation Louis Vuitton (ガラス)	Bending Bridge (木)	BMW Pavilion (ガラス)	Dongdaemun Design Plaza (金属) Guggenheim Museum Bilbao (金属)		Steampunk Pavilion (木など)
キャスト			Neuer Zollhof (コンクリート) Fondation Louis Vuitton (コンクリート) Precious Plastic (プラスチック) 日本橋旧テラー堀屋改修 (金属)			
位置を固定する					Gradual Assemblies (木) Human Machine Collaboration (金属)	
編む					ICD/ITKE Pavilion 2012 (カーボンファイバー) DFAB House (金属) LOCI (金属)	
釘・ビスを打つ					Robotic Pavilion (木) Gradual Assemblies (木)	
塗る					Shotcrete 3D Printing (コンクリート) Robotic Rammed Earth (土)	

3. 5 小結

収集した事例の概観としては、2010 年以前の事例と 2010 年以降の事例で、制作物のス

ケール、道具の制作の有無および形態的な特徴に関して異なる傾向がみられた。特に、2010 年以前は道具の制作を行わず既存の道具を用いている事例が多い代わりに、大規模なスケールで実現できているものが多い。2010 年代以降の事例は道具の制作による自由度の高い制作を行っている代わりに、小規模なスケールのものが多いという二極化があるといえる。

制作物のスケールから見た分析では、「独自制作」や「エンドエフェクターを制作」の道具は制作物の自由度は高いがスケールは小さく、「既製品」の場合は大規模なスケールで実現しているものも多いが、制作物の自由度が低いという二極化がみられた。その一方で、「既製品の組み合わせ」、「型・治具を制作」、「既製品を改造」では制作物のスケールと自由度を両立できている傾向にあった。

道具の汎用性の観点による分析では、「エンドエフェクターを制作」の事例、「独自制作」の事例のほとんどが特定の素材・特定の動作に特化した結果汎用性を持たないことが多かったが、「位置を固定する」や「積む」といった素材による制約を受けない動作の道具や、CNC 切削のような交換可能性を持つ道具には、汎用性が伴う可能性も見出せた。また、「型・治具を制作」および「既製品を改造」を行っている事例では汎用性を獲得できている割合が高かった。

また、道具に必要な技能による分析から、「独自制作」や「エンドエフェクターを制作」の道具は制作物の自由度は高いものの技能のハードルが高く、「既製品」に分類される事例は技能のハードルが低い制作物の自由度は低いという二極化が起こっていた。その一方で、「既製品の組み合わせ」や「型・治具を制作」を行っている事例、そして「独自制作」のうち施工から設計へのフィードバックを行っている事例では制作物の自由度と技能のハードルを両立できているということがわかった。

以上のような分析から、「既製品」と「独自制作」の中間に位置する道具の制作手法である、「既製品の組み合わせ」、「型・治具を制作」、「既製品を改造」が建築生産に適用できる可能性が高いと考えられる。これらの制作手法を「**道具の拡張**」として定義し、建築生産に適用しうる道具の制作手法として提示する。既製品をそのまま使う場合は道具の性能と人間の技能のバランスが悪く、道具を独自制作する場合は高度な専門技能が必要となってしまう。そこで、既製品をうまく「ハック」することで低い技能のハードルで道具を制作することが有効であると考えられる。また、専用化と汎用性のバランスや道具の開発コストといった側面から見ても「道具の拡張」は建築生産において有効であると推測される。この「道具の拡張」による道具の制作手法の有効性を検証するため、4 章で「道具の拡張」を実践している事例を中心としたより詳細な分析を行い、5 章で「道具の拡張」を取り入れた構造物の設計・制作を行う。

また、道具の動作と制作手法の関係の分析により、キャストや曲げの道具において「道具の拡張」を行いやすい傾向にあるということが分かった。その中でも特に過去に建築スケールで実現している事例が多い曲げの道具に絞って 4 章・5 章で詳細分析・開発を行う。

4 章 建築生産にみられる「道具の拡張」

3 章では過去のデジタル・ファブリケーション事例における道具の制作手法の傾向を分析し、建築生産に適用可能性が高い道具の制作手法として「道具の拡張」を提示した。3 章での道具の制作手法と動作の関係の分析からわかるように、曲げやキャストのような型を用いる道具が「道具の拡張」を行える可能性が高いということが分かった。4 章、5 章ではこのうち過去の実例も多い曲げの道具を用いたデジタル・ファブリケーションに絞ってより詳細な分析を行い、分析によって明らかになった課題を踏まえて曲げの道具の制作を含む曲面構造物の開発を行う。本章では、曲げの道具に関して「道具の拡張」を行っている事例にみられる課題を分析し、その課題を踏まえて「道具の拡張」を行う上での新たな設計・制作プロセスを提示する。

4.1 調査事例の概要

本章では「道具の拡張」を用いた過去のデジタル・ファブリケーション事例の詳細な分析を行うために、金属曲げ加工メーカーK社へのインタビューから得られた2事例および3章で収集した事例のうち「道具の拡張」を行っている曲げの道具に該当する2事例をとりあげ、「道具の拡張」にみられる現状の課題を分析する。

表6 調査事例の概要^{115, 116}

対象建築物	拡張された道具	調査手法
四季十楽 (田根剛、2016)	インクリメンタル装置	インタビュー (金属加工メーカーK社)
青森ねぶたの森ワ・ラッセ (Molo Design, d/dt Arch, Frank la Riviere Architects, 2010)	ツイスト加工機	インタビュー (金属加工メーカーK社)
Dongdaemun Design Plaza (ZHA, 2011)	MPSF Machine	文献調査 (G. Lee et al., 2012)
Guggenheim Museum Bilbao (Gehry Partners, 1997)	ロールベンダー	文献調査 (R. Sennett, 2008)

図40 四季十楽¹¹⁷ (田根剛、2016)、青森ねぶたの森ワ・ラッセ¹¹⁸ (Molo Design, d/dt Arch, Frank la Riviere¹¹⁵ Lee, Ghang, and Seonwoo Kim., *op. cit.*, pp.1322-1330¹¹⁶ Sennett, Richard. *The craftsman*. Yale University Press, 2008.¹¹⁷ “四季十楽（門扉）”, KIKUKAWA, (<https://www.kikukawa.com/product/shikijuraku/>)
閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)

Architects, 2010)、Dongdaemun Design Plaza¹¹⁹ (ZHA, 2011), Guggenheim Museum Bilbao¹²⁰ (Gehry Partners, 1997)

対象事例は、金属曲げ加工メーカーK社へのインタビューで得られた四季十楽、青森ねぶたの森ワ・ラッセの2事例と、3章で収集した事例のうち「曲げる」動作の道具および「道具の拡張」による制作手法をとっている道具に該当した Dongdaemun Design Plaza、Guggenheim Museum Bilbao の2事例である。K社へのインタビューでは、特殊な加工を依頼された際、新たに機械の設備投資を行わず、「既存の機械を改造」して自由度の高い制作物を実現した事例が複数見られた。

四季十楽（田根剛、2016）の3次元曲面の門扉に用いられているインクリメンタルフォーミングと呼ばれる曲げ加工に「道具の拡張」がみられる。ここではFWS（摩擦攪拌接合）を行うための溶接機械を改造して、インクリメンタルフォーミング（型を用いない曲げ加工）を実現している。かなり大きな設備投資をしたのちあまり活用できていなかった機械を拡張して、まったく別の加工を行えるようにした例である。

また、青森ねぶたの森ワ・ラッセ（Molo Design, d/dt Arch, Frank la Riviere Architects, 2010）の長尺スクリーンルーバーのツイスト加工にも「道具の拡張」がみられる。K社では手すりのねじり加工を行う機械を保持していたが、長尺ルーバーのツイスト加工の依頼が来た際に、この手すりのツイスト加工機を改造してより大きな部材の加工を行っている（図42）。ここでは加工の種類は同じであるが、「道具の拡張」を行うことで、より大きなスケールに対応することに成功している。これら2事例のように、K社では新しい設備投資をするよりも既存の機械を拡張することで、道具を一度使って終わりにするのではなく、汎用的な道具の使いこなし方を可能にしている。このように、「道具の拡張」は実際の建築生産において適用されており、有効な道具の制作手法であるということがわかる。

3章で該当した2事例のうち、Dongdaemun Design Plaza（以下DDP、ZHA、2011）では、1枚1枚形状が異なる2方向曲げアルミパネルを製造するために、既存の引張曲げ加工機に多数点制御の型を組み合わせで改造したMPSF Machine (Multi-Point Stretch-Forming Machine)を用いられている（図43）。MPSF Machineはつくりたい曲面形状に合わせて長さを調整した多数のピンにより型を生成し、この可変的な型を用いて一枚一枚形

¹¹⁸ “青森市文化観光交流施設「ねぶたの家ワ・ラッセ」”, KIKUKAWA (<https://www.kikukawa.com/product/nebutanoie-warasse/>) 閲覧日: 2022年1月15日)

¹¹⁹ “ZAHA HADID ARCHITECTS DONGDAEMUN DESIGN PLAZA”, DIVISARE (<https://divisare.com/projects/328000-zaha-hadid-architects-julien-lanoo-dongdaemun-design-plaza>) 閲覧日: 2022年1月15日)

¹²⁰ Hammad, Numan Abu, and Mutasem Abu Hammad. "Sustainable design thinking: Adaptability, resilience, and productivity at the core of regionally responsive architecture.", 2017

状が異なる金属パネルの曲げ加工を行うものである。ここでは、既存の引張成形機（Stretch Forming Machine）に多数点成形（Multi-Point Forming）を組み合わせて改造をおこなっており、「既製品を改造」の手法による「道具の拡張」を行っているといえる。この事例の調査手法としては、G. Lee らによる DDP の報告書¹²¹を主要な文献として調査する。

Guggenheim Museum Bilbao（以下 GMB、Gehry Partners、1997）では、外装材のチタンをキルト模様に圧延して建物に反射する光を波状にすることが設計者の希望であったが、既存のロールベンダーでは精密な模様を制作することができなかった。そこで、自動車産業で用いられていた油圧緩衝器を改造して、キルト模様のチタンの圧延曲げに特化したロールベンダーを開発するという「道具の拡張」を行っている。この事例の調査手法としては、設計者である F. O. ゲーリーと曲げ加工メーカーとのやり取りを記録した “The craftsman”（Sennett, Richard, 2008）を主要な文献として調査する。

以上 4 事例の調査から「道具の拡張」にみられる現状の課題を調査したところ、「道具に必要な技能」、「道具の開発コスト」、「設計・制作プロセス」の 3 つの課題が見られた。



図 41 K 社の手すりのツイスト加工（筆者撮影）、ツイスト加工したルーバー¹²²

¹²¹ Lee, Ghang, and Seonwoo Kim., *op. cit.*, pp.1322-1330.

¹²² “ツイスト（ひねり）加工”, KIKUKAWA (<https://www.kikukawa.com/topics-twisting/>)
閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)



図 42 FWS（摩擦攪拌接合）¹²³、インクリメンタルフォーミング¹²⁴



図 43 Multi-Point Stretch-Forming Machine¹²⁵

4.2 道具に必要な技能

今回調査した 4 事例はすべて工場加工用の機械における「道具の拡張」であるが、その多くで道具に必要な技能に関する課題がみられた。

DDP のアルミパネルの曲げ加工で浮き彫りになった課題の一つは、曲面形状に応じて曲げ工法を選択し、コストを算出することの難しさである。すべてのパネルを MPSF Machine で曲げるのは経済的ではなく、例えば一方向曲げであれば従来の曲げ工法で十分であるため、曲面形状によってその都度曲げ工法を選択する必要がある。DDP のプロジ

¹²³ “FSW（摩擦攪拌接合 / Friction Stir Welding）”, KIKUKAWA,
(<https://www.kikukawa.com/technology/fsw-friction-stir-welding/> 2022 年 1 月 15 日)

¹²⁴ “インクリメンタルフォーミング”, KIKUKAWA
(<https://www.kikukawa.com/technology/incremental-forming/> 2022 年 1 月 15 日)

¹²⁵ “Designing with Digital Fabrication”, ARUP
(<https://www.arup.com/perspectives/publications/promotional-materials/section/designing-with-digital-fabrication> 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)

ェクトでは曲面形状を 6 種類に分類し、曲面のタイプ別に工法を決定することを目指している（表 7）。例えば、単調増加する曲線断面の一方向曲げであれば既存のロールベンダー、単調増加する曲線断面の二方向曲げであれば既存の液圧成形機、単調増加ではない曲線断面の二方向曲げであれば開発した MPSF Machine を用いるといった計画である。しかしながら、同じタイプでも曲がり具合が変われば曲げ工法が変わるため、曲面形状と工法を一対一で対応させることはできず、最終的な曲げ工法とコストの決定は技能者の個人的な判断によってなされた。このように、一枚一枚形状が異なる二方向曲げを含むパネルの曲げ加工においては、熟練技能者に頼らずに曲面形状を分類し、曲げ工法を決定し、コストを算出する方法をいかにして体系化するが今後の課題となると考えられる。

この DDP の曲げ加工にみられるように、MPSF のようなマスカスタマイゼーション的な生産方法をとったとしても、作りたい形状に合わせて「道具を選ぶ」技能というものが必要となり、その技能は結局熟練技能者に依存してしまうことがわかる。

表 7 DDP でのパネル形状の分類と対応する曲げ工法¹²⁶

パネルの種類	分類基準	曲げ工法
カットパネル	フラットパネル	せん断
	10000mm以上の曲率半径を持つ曲面パネル	
	最高点と最低点の高低差が5mm以下のエッジに囲まれた曲面パネル	
	現場でコールドベントできる薄い曲面パネル	
	頂点の高低差が10mm以下の折り返しパネル	
単一の右上がり曲線から構成される一方向曲げパネル	可展曲面	ロール成形、プレス成形
	直線とみなせる（最高点と最低点の高低差が5mm以下）二つの向かい合うエッジと、単一の右上がり曲線からなる他二つの向かい合うエッジで囲まれた二次曲面パネル	プレス成形、液圧成形、爆発成形、MPSF
右上がり曲線と右下がり曲線の組み合わせ（波状曲線）から構成される一方向曲げ	直線とみなせる（最高点と最低点の高低差が5mm以下）二つの向かい合うエッジと、複数の右上がり曲線と右下がり曲線（波状曲線）からなる他二つの向かい合うエッジで囲まれた二次曲面パネル	プレス成形、MPSF
折り返しパネル	二つの隣接する直線と二つの隣接する曲線からなるエッジで囲まれた二次曲面パネル	コールドベント、ロール成形、MPSF
単一の右上がり曲線からなる二方向曲げパネル	そのすべてが単一の右上がり曲線からなる4つのエッジに囲まれた、単一の凹凸を持つ二次曲面パネル	液圧成形、爆発成形、プレス成形、MPSF
複数の曲線や凹凸から構成されるに二方向曲げパネル	複数の凹凸を持つ二次曲面パネル	液圧成形、爆発成形、プレス成形、MPSF

K 社へのインタビューにおいても、二方向曲げの曲げ加工を自動化することは難しく、様々な曲げ工法の中からつくりたい形に合った工法を選ぶ技能が必要であるということがわかった。

このように、複雑形状の曲げ加工においては形状に合わせて曲げ工法を選ぶ必要があるが、曲率や曲面形状から曲げ工法を自動的に決定する手法を確立されておらず、「道具を

¹²⁶ 筆者翻訳、Lee, Ghang, and Seonwoo Kim., *op. cit.*, p.1328

選ぶ技能」が必要となる。この「道具を選ぶ技能」は現状では熟練技能者に依存してしまっており、非熟練技能者による自由度の高い制作物を実現する上では解決すべき課題であるといえる。

4.3 道具の開発コスト

DDP および GMB で行われている「道具の拡張」においては、道具の開発コストに関する課題がみられた。

DDP では最終的な MPSF Machine の開発に至るまでに、3 種類の曲げ加工機を検討している。最初の候補となった加工機は、アルミパネルとコンピューター制御の支柱の間にゴムパッドを挟んだ多点成形機で、これは既存の多点成形法をわずかに改良したものであった。しかしながら、薄くやわらかいアルミパネルこの加工機を用いるとしわが生じてしまい、品質に問題があるとみなされたため採用されなかった。二つ目の候補は、液圧成形法と多数点成形を組み合わせたものであった（図 44）。しかしながら、アルミパネルの柔らかさに対して液圧が強すぎることが原因で、支柱によるへこみが生じてしまうということがわかった。三つ目の候補として引張成形機と多数点成形を組み合わせた MPSF Machine が提案され、採用された。ここでは 4mm アルミパネルという薄く柔らかい素材を精度良く扱うことができる道具を発見するために開発コストがかかっているということわかる。

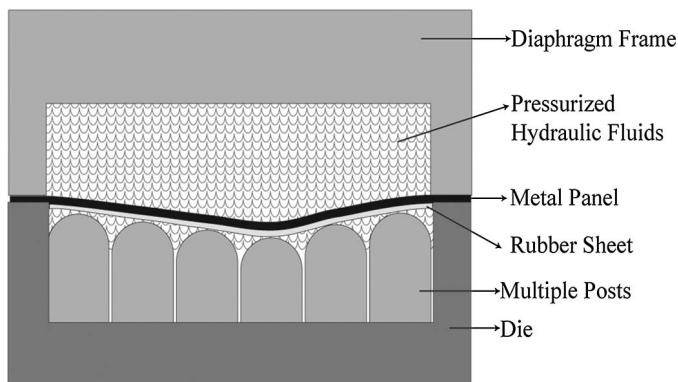


図 44 液圧成形機と多数点成形を組み合わせた加工機の検討¹²⁷

MPSF Machine の採用が決まった後に機械の改良を重ねながら 4 つのモックアップ制作を行った結果、最終的な MPSF Machine の開発には約 2 年を要した¹²⁸。このような長期間にわたる開発を要した一因として、設計者の ZHA による非常に高い精度の要求があった。ZHA はパネル間の 25mm の隙間の許容差を 2mm 以下にすることをメーカーに要求し

¹²⁷ Lee, Ghang, and Seonwoo Kim., *op. cit.*, p.1326

¹²⁸ Sacks, Rafael, et al., *op. cit.*, p.462

ており、このような高い精度を実現するために道具の性能の改善とモックアップ制作が繰り返し行われた（図 45）。

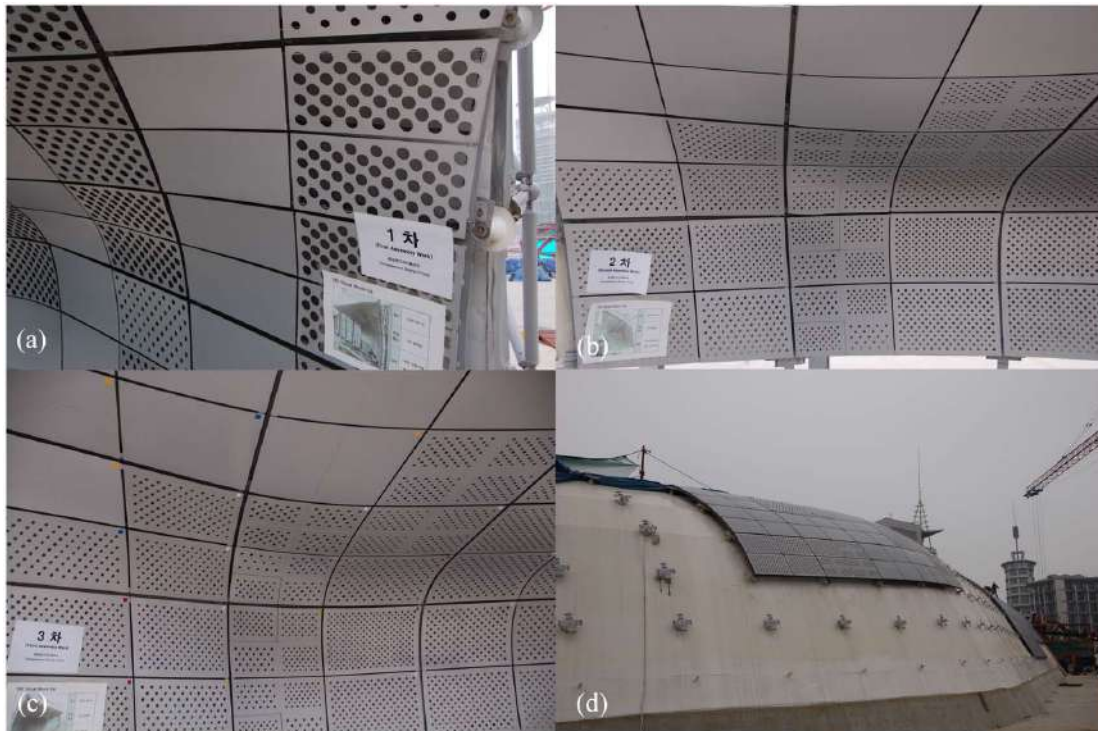


図 45 DDP の 4 つのモックアップ制作¹²⁹

また、GMB のキルト模様のチタン用ロールベンダーの開発には、使用するチタンの金属組成を同時に検討する必要がある、最適な道具と素材の組み合わせの発見に約 1 年を要している。このような長期間の開発を要した原因として、自動車の油圧緩衝器という他産業の別素材を扱う機械を改造して開発を行ったため、この機械をチタンの加工に適合させる必要があったからであると考えられる。設計者の F. ゲーリーは、「我々はメーカーに、我々の求めている素材を完成させるために、油、酸、圧延、熱をちょうどよい配合で加える方法を開発するように求めた¹³⁰」と述べているが、このような設計者にとって理想的な道具をメーカーが新たに開発する難易度は非常に高く、コストは莫大なものになると推察される。

GMB ではチタン用ロールベンダーの開発と同時に、二次曲面形状の石材用の CNC 加工機の開発も行われている¹³¹。これは金属用の CNC 加工機を石材用に改造したものである

¹²⁹ Lee, Ghang, and Seonwoo Kim., *op. cit.*, p. 1327.

¹³⁰ リチャード・セネット著、前掲書、p.380

¹³¹ Ackley, L., et al., *op. cit.*, 2002

が、こちらも開発に 1 年程度を要している。この場合もまったく別の素材を加工する機械に拡張する必要があるため、最適な道具と素材の組み合わせを発見するのに時間を要したと推察される。

以上のように、「既製品を改造」の手法による道具の拡張を行った場合は、既存の道具の機構そのものに手を加えなければならず、道具と素材の最適な関係性を再構成する必要があるため、莫大な道具の開発コストが課題になる。また、設計者が提案した理想的な道具の難易度の高い要件をそのまま満たすように制作側が「道具の拡張」を行ったことで、長期間にわたる開発が必要になったと考えられる。J. Buchli が指摘しているように¹³²、建築のような一品生産の生産方式において高いコストをかけて専用性の高い道具を開発しても、そのコストを回収できない場合が多い。ゆえに、建築生産への適用を考えるうえでは、道具の開発コストを抑えられるような「道具の拡張」の手法を検討する必要がある。

4.4 設計・制作プロセス

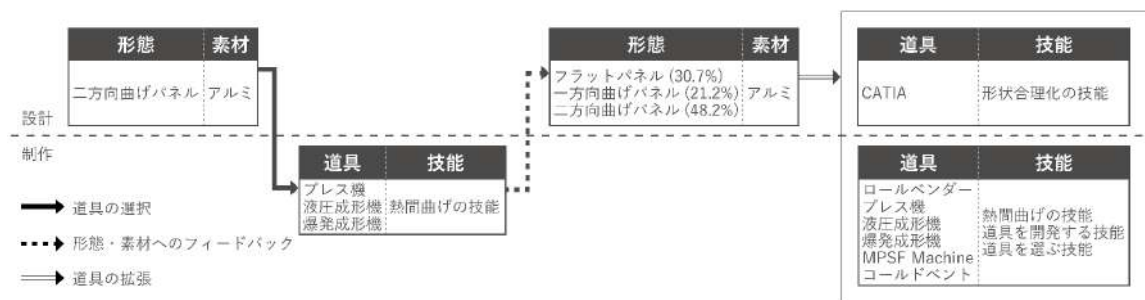


図 46 DDP の設計・制作プロセス

ここまでデジタル・ファブリケーションを用いた加工・組立における技能の課題を見てきた。次に、最終的な形態・素材を決定するまでに至る設計・制作プロセスについて見ていく。図 16 は DDP の報告書¹³³をもとに作成した DDP の設計・制作プロセスのダイアグラムである。上段が設計側の関与する工程、下段が制作側の関与する工程になっている。決定すべき要素としては、形態、素材、道具の 3 つがあり、道具にはそれに必要な技能が伴う。形態・素材が設計側で決定され、その決定をもとに制作側によって道具・技能が決定されるというのが基本的なプロセスである。このような通常のプロセスであれば、「道具の拡張」は行われず、形態・素材を基に「道具の選択」が行われる。DDP や GMB のような事例では、設計者が決定した形態・素材をそのまま実現できる既存の道具は存在しないため、設計者が決定した形態・素材を実現するために「道具の拡張」が行われる。こ

¹³² Buchli, Jonas, et al., *op. cit.*, pp. 66-75

¹³³ Lee, Ghang, and Seonwoo Kim., *op. cit.*, pp.1322-1330.

の「道具の拡張」は設計者が介入する道具の制作であるため、設計と制作の両方が関与することになる。

まず、DDP では 45133 枚のすべて形状が異なる二次曲面パネルから始まったが、製造コストの点からすべての二次曲面で制作するのは不可能であると判断した。そこで、モデルの形状合理化を行い、フラットパネル 30.7%、一方向曲げパネル 21.2%、二方向曲げパネル 48.2%としてより安価なコストで加工ができるフラットパネルと一方向曲げの割合を増やしている。Walt Disney Concert Hall (Gehry Partners, 2003)や Guggenheim Museum Bilbao (Gehry Partners, 1997)のように、すべてのパネルが一方向曲げパネルやフラットパネルに形状合理化されている二次曲面構造物の事例が多いが、DDP では半分近くが二次曲面パネルという稀有な事例である¹³⁴。これは、設計者の ZHA が 25mm のパネル間の隙間に 2mm 以下の許容差を要求したためで、二方向曲げを行わなければこの高い精度を実現できなかったためである¹³⁵。このように形状合理化を行って形状が決定されたのちに、一枚一枚曲面形状が異なる二方向曲げパネルを低コストで加工できるように、MPSF Machine を開発した。ここでは、既存の Stretch Forming Machine (引張曲げ成形機)を改造しており、「既製品を改造」の手法による道具の拡張を行っている。

その一方で、最終的に用いられた道具を分析すると、ロールベンダー、プレス機、液圧成形機、爆発成形機、MPSF、コールドベントという非常に多くの道具を用いているということがわかる。G. Lee が指摘しているように、曲面形状から適した道具を選ぶ必要があり、この道具を選ぶ技能は自動化することができず、熟練技能者に依存する¹³⁶。また、工場での曲げ加工と現場での曲げ（コールドベント）が混ざっており、工場で曲げるか現場で曲げるかの判断が難しい¹³⁷。このような技能に関する問題が生じている原因として、最初に設計側で形状を確定した後に制作側で「道具の拡張」を行うという設計から制作への一方向的なプロセスをとっているため、道具から形態・素材へのフィードバックが十分ではなく、道具の技能の問題を解決しきれていないと考えられる。また、形状が決定された後に「道具の拡張」を行い、設計者が提示した形態・素材をそのまま実現することを目指せば、「道具の拡張」に莫大な開発コストがかかることは明らかである。

「道具の拡張」は道具を独自開発する場合と異なり、「既製品の組み合わせ」、「型・治具の制作」、「既製品を改造」といった汎用性・コスト・技能を考慮した道具の制作手法であり、想定した形態・素材をそのまま実現できるとは限らない。想定した形態・素材を実現できるような道具を一から独自制作することができればよいが、道具の開発に高いコストと高度な専門技能を必要とし、さらにその道具に汎用性がなければその開発コストを回

¹³⁴ Sacks, Rafael, et al., *op. cit.*, pp.454-455

¹³⁵ Sacks, Rafael, et al., *Ibid.*, pp.455

¹³⁶ Lee, Ghang, and Seonwoo Kim., *op. cit.*, p.1328

¹³⁷ Lee, Ghang, and Seonwoo Kim., *Ibid.*, p.1328

収することができないため、建築生産に適用することは難しい。そのため、最初に決定された形態・素材をそのまま実現するために高いコストをかけて道具を制作するのではなく、「道具の拡張」を行う工程と道具から「形態・素材へのフィードバック」を行う工程を交互に繰り返していきながら、柔軟に形態・素材・道具の組み合わせを決定するプロセスが必要であると考えられる。

通常では、形態・素材が設計側で決定され、それがそのまま制作側に降りてくるようなウォーターフォール型のプロセスか、設計側で形態・素材を繰り返し検討し、それが最終的に制作側に降りてくるようなプロトタイピング型のプロセスが一般的である（図 47）。

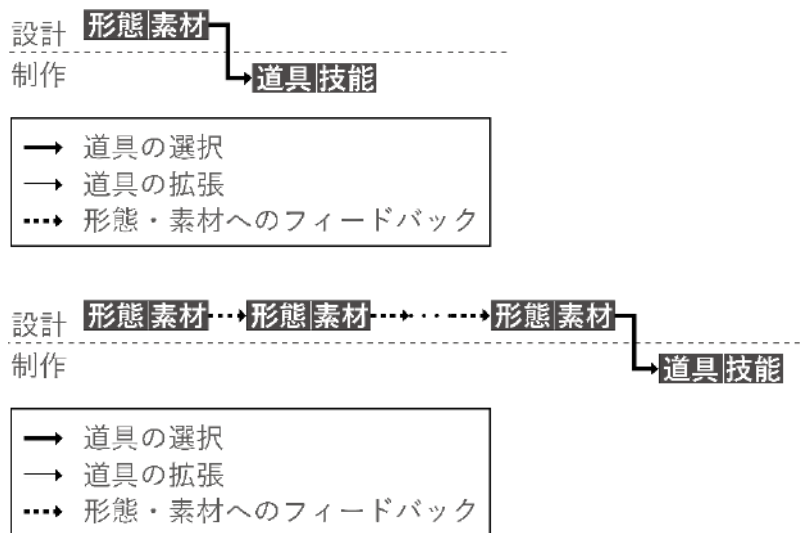


図 47 通常の設計・制作プロセス（ウォーターフォール型、プロトタイピング型）

今回調査した事例においても、設計から制作への一方向的なプロセスとしての特徴が大いにみられる。GMB では、設計者の F. ゲーリーが「我々はメーカーに、我々の求めている素材を完成させるために、油、酸、圧延、熱をちょうどよい配合で加える方法を開発するように求めた¹³⁸⁾」と述べているように、制作側は設計者が決定した形態・素材に合わせて、設計者が要求する理想的な道具をそのまま制作することが必要であり、制作側から設計側へのフィードバックは行われていないとみられる。その結果として莫大な開発コストが必要になるという課題が生じている。DDP では、25mm のパネル間の隙間の許容差を 2mm 以下にするというかなり厳しい精度の要求を行ったために難易度が高くコストが高い道具の開発となってしまったと考えられる。また、DDP で設計者が決定した形状をそのまま実現するためには、工場曲げ加工の道具と現場曲げの道具が入り混じった複数の道具を用いる必要があり、熟練技能者による「道具を選ぶ技能」が必要となってしまった。

¹³⁸⁾ リチャード・セネット著、前掲書、p.380

このように、従来のウォーターフォール型やプロトタイピング型のプロセスのままで「道具の拡張」を行おうとすれば、形態・素材へのフィードバックが不十分で、GMB や DDP のように道具の技能の問題や道具の開発コストの問題を解決しきれないと推測される。そこで、「道具の拡張」と「形態・素材へのフィードバック」を交互に繰り返していくことで、柔軟に形態・素材・道具を決定していきながら制作物の自由度を高めていくアジャイル型の設計・制作プロセスを提案する（図 48）。これにより、道具の制作にコストをかけすぎることなく、また技能のハードルを高くしすぎることなく、既存の道具を組み合わせたり、一部分だけ製作したりしながら制作物と制作手法が徐々に組み合っていくような設計・制作プロセスを実現できると考えられる。

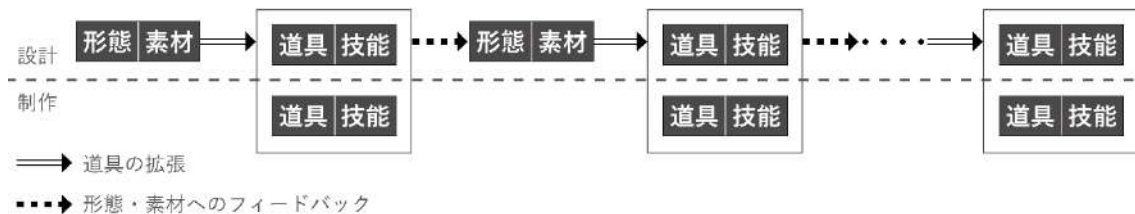


図 48 「道具の拡張」および「形態・素材へのフィードバック」を繰り返すアジャイル型の設計・制作プロセス

このような設計から制作への方向性と制作から設計へのフィードバックを繰り返しながら建築を作るプロセスについて、建築家の R. ピアノは次のように述べている。

建築家であるならば、クラフトマンでなくてはならない。道具は何でもかまわない。今日的にコンピュータであったり、実験モデルであったり、高度な数式であったりするだろう。しかし、頭と手の作業を分かťことを拒否するのは、依然クラフト的なありかたなのだ。そこに見られるのは、アイディアからドローイングに、ドローイングから実験に、実験から建設に、そして建設から再びアイディアと戻る円環作業である¹³⁹。

R. ピアノが主張しているこの円環状のプロセスはまさに、本研究において提案するアジャイル型のプロセスである。この言説からもわかるように、設計者がクラフトマン的に道具を制作しながら自由度の高い制作物を実現していくためには、制作側が設計側で決定さ

¹³⁹ 竹中司、岡部文「ロボットはコンピュータの夢をかたちにするか？ 3」、GA JAPAN 130 号、2014、p.180（原文: Piano, Renzo. *Process, Architecture*. No. 100. Process Architecture Publishing Company, 1992, p.13）

れたものをそのまま実現しようとするのではなく、設計者が設計と制作を行き来しながら制作物と制作手法を同時に思考するプロセスが必要であるということが推察される。

4.5 小結

以上の詳細な事例分析から明らかになったように、3 章で提示した「道具の拡張」の手法は、溶接機械を改造して曲げ加工機として用いたインクリメンタルフォーミング、よりスケールの大きな加工ができるように拡張を行ったツイスト加工機、引張成形機に多数点成形を組み合わせて改造した DDP の MPSF Machine、他産業の機械を改造した GMB のロールベンダーのように、スケールの大きな事例において実際に適用されているということがわかった。

その一方で、DDP の曲げ加工や、K 社のインタビューで分かったように、作りたい曲率や曲面形状の情報から曲げ工法を自動的に決定することは難しいということがわかった。MPSF Machine のようなデジタル加工機を開発したとしても、曲面形状に合わせて「道具を選ぶ」技能はかならず必要になってくるため、結局は熟練技能者の判断に任せるしかなくなってくる。このように、3 次元曲面を作るための曲げ加工は他の加工にくらべて自動化によって熟練技能を補うことが難しいという課題が明らかとなった。

また、DDP や GMB の分析でわかったように、「既製品を改造」による道具の制作手法をとっている場合、既存の道具の機構そのものに手を加えなければならず、高い道具の開発コストを要するという課題がある。特に、GMB のように他産業の別の素材を扱っている機械を改造する場合は道具と素材の最適な関係性を一から構築する必要があり、莫大なコストを要する道具の開発が必要であるということが明らかとなった。

さらに、DDP のプロセスの検証から、設計から制作への一方向的なプロセスが原因で技能やコストの問題を解決できていないのではないかと考察した。そこで、設計側で最初に決定された形態・素材をそのまま実現するために制作側で高いコストをかけて道具を開発するのではなく、「道具の拡張」と「形態・素材へのフィードバック」を繰り返しながら、低い技能のハードルおよび低コストで制作物の自由度を高めていくアジャイル型のプロセスが有効ではないかという仮説を立てた。

これら 3 つの課題を踏まえて、5 章では「道具の拡張」を実践しながら曲面構造物の設計・制作を行い、技能、開発コスト、プロセスに関する課題に対する解決策を提示するとともにその有効性を検証することを目指す。

5 章 開発

本章では4章で明らかになったデジタル・ファブリケーションを用いた「道具の拡張」が抱える課題に対する解決策を実践するために、曲げの道具に関して「道具の拡張」を行いながら曲面構造物の設計・制作を行う。具体的な道具の拡張手法を提示するとともに、4章で提案したアジャイル型の設計・制作プロセスを実践し、その効果を検証する。

5.1 開発の概要

(1) デジタル・ファブリケーションを用いた弾性曲げの可能性

4 章でみてきたように、工場での複雑な二次曲面曲げ加工は曲面形状によって道具を変えることが必要であり、その際に熟練技能者でなければ臨機応変に対応することが難しく、完全に自動化することは現実的ではない。

近年では、工場での型や熱を用いた加工により二次曲面を作るという手法に加えて、現場における弾性曲げを用いて複雑な二次曲面を作る手法が注目されている。例えば Julian Lienhard が提唱したアクティブ・ベンディング (Bending-Active) と呼ばれる手法では、まず Kangaroo や SOFiSTiK といった FEM ソフトウェアを用いて弾性曲げの挙動を推測し、結果的にできた形状に合わせて部材を CNC 加工で切り出し、現場で曲げを固定するというプロセスがとられている¹⁴⁰。ここではオフサイトでの型や熱を用いた曲げ加工は一切行われておらず、現場での弾性曲げだけで曲面が形成されている。

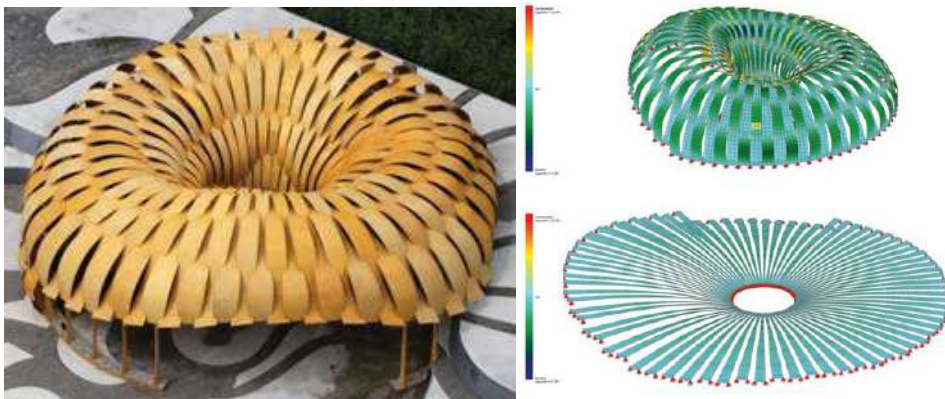


図 49 ICD/ITKE Research Pavilion 2010 (Stuttgart ICD, 2010)¹⁴¹

ガラス曲げの分野では、コールドベントと呼ばれる曲げ工法が注目されている。ガラスは通常作りたい形状に合わせた型を制作し、その型に合わせて炉で熱しながら曲げるという手法をとるが、このコールドベントは現場で常温のままフレームに押し当てて曲面を形成する工法である。これにより、型の制作や熱加工にかかるコストを大幅に削減することができる¹⁴²。

¹⁴⁰ Lienhard, Julian, and Jan Knippers. "Bending-active structures." Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen der Universität Stuttgart, *Forschungsbericht* 36, 2014

¹⁴¹ Lienhard, Julian, and Jan Knippers., *Ibid.*, pp.67-69

¹⁴² Belis, Jan, et al. "Cold bending of laminated glass panels." *Heron* 52.1-2, 2007, pp.123-

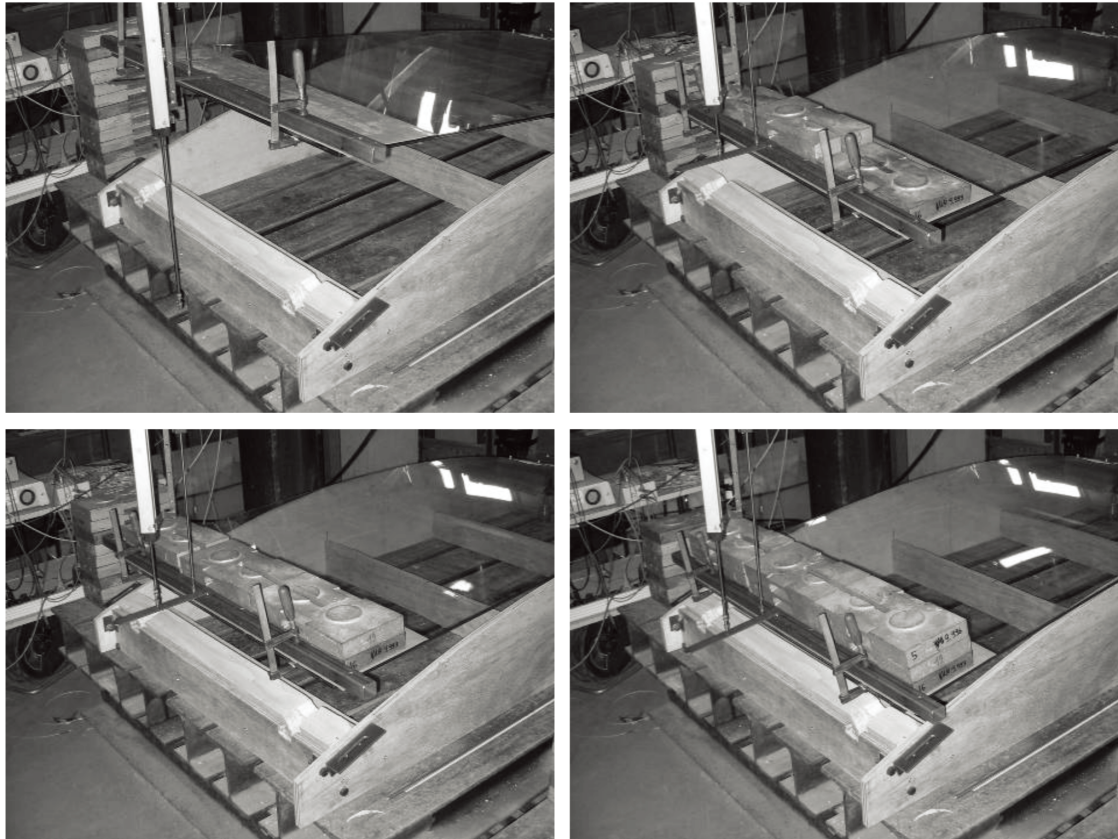


図 50 コールドベントによるガラス曲げ¹⁴³

以上のような、工場での加工に頼りすぎるのではなく、弾性曲げを駆使しながら現場で曲げる手法が近年多くみられる。これらの手法は、加工の段階では特別な熟練技能を必要としない。ゆえに、現場での曲げ工法を工夫すれば、熟練技能に頼らずに複雑曲面を作ることができる可能性がある。また、FEM 解析や物理演算シミュレーションのような解析技術によって曲げをコントロールできるため、設計者が形態、構造、加工までを統合的に扱うことができ、設計者が制作に積極的にかかわることができるという特徴がある。

本研究では、木材の弾性曲げを用いて、設計者が曲げを制御することで低コストで複雑な二次曲面を制作する手法を提案する。さらに、組み立ての際に非熟練技能者が用いることができる道具を制作し、組み立てのルールさえ決めれば特別な技能を要せずに複雑な曲面をつくることのできるような工法を開発する。ここで制作する道具には、本研究で論じていた「道具の拡張」を適用し、既存の道具を組み合わせたり、既存の道具の一部を制作したりすることで、低コスト・低い技能のハードルで道具の制作を行う。

(2) 制作物の概要

4 章を踏まえて、曲げの道具に関する「道具の拡張」には以下の 3 つの課題があるということがわかった。

課題 1. 加工における熟練技能への依存：複雑曲面の曲げ加工の場合、曲率や曲面形状に合わせて曲げ工法を自動的に決定することは難しく、熟練技能者による「道具を選ぶ技能」が必要となる。

課題 2. 莫大な道具の開発コスト：「既存の機械を改造」の制作手法をとった場合、既存の機械の機構そのものに手を加えなければならず、莫大な道具の開発コストを要する。一品生産の建築生産においてはこのコストを回収することが難しい場合がある。

課題 3. 一方向的なプロセス：想定した形態・素材を実現するために道具を制作するという一方向のプロセスをとるために、道具の開発コストが非常に高く、技能の問題を解決しきれない。形状の合理化を行っている事例は多くみられるが、熟練技能・開発コストを補うには不十分である。

本開発では曲面構造物の設計・制作を通してこれらの課題の解決策を提示し、その効果を検証する。課題 1 への解決策として、工場での曲げ加工に頼りすぎるのではなく、非熟練技能者が現場で柔軟に曲げていく曲げ工法を実践する。課題 2 への解決策として、莫大な開発コストを要すると考えられる「既製品を改造」ではなく、「既製品の組み合わせ」や「型・治具を制作」による「道具の拡張」を採用する。課題 3 への解決策として、「道具の拡張」と「形態・素材へのフィードバック」を繰り返すことで低い技能のハードルおよび低コストで自由度の高い制作物の実現を目指すアジャイル型の設計・制作プロセスを実践する。以上を踏まえ、開発する構造物は以下の条件を満たすものとする。

- ・ 曲率が大きな二次曲面の複雑曲面
- ・ 木材の弾性曲げを用いた曲面構造物
- ・ 低コスト、熟練技能に頼らない曲げ工法
- ・ ほかの支持材を用いずに大スパンを飛ばす

本開発に際してガラス曲げ加工メーカー（S 社）、型枠曲げ加工メーカー（H 社）、金属曲げ加工メーカー（K 社）へのインタビューを行った結果として、ガラス、合板、金属などどの材料でも二次曲面を作ることは難しく、一次曲面に比べて大きなコストがかかるということがわかった。また、曲率が大きくなるほどそれに従ってコストも高くなる傾向にあることがわかった。このような課題を踏まえて、自由度が高い形状である曲率の大きな二次曲面を低コストで、熟練技能に頼らず制作することを本開発の目標とする。

また、本開発では構造物の部材の加工を行う一次道具および道具の制作を行う二次道具

として Shopbot Desktop MAX (加工可能範囲: 935×635×140mm) および CAM ソフトウェアの V Carve Pro の使用を前提とする。また、3D 上の生産設計に関しては Rhinoceros + Grasshopper を主要な道具として用いる。

(3) 制作物の自由度の評価方法

本研究においては、制作物の自由度に関して、1) 一方向曲げか二方向曲げか, 2) 最大曲率の 2 点から評価を行う。二方向曲げの曲面（二次曲面）は一方向曲げの曲面（一次曲面）よりも自由度は高く、最大曲率が大きいほど形状の自由度は高い。

自由度の評価は、3D 上で設計した形状および実際に制作したモックアップに関して行い、自由度の高い設計形状を実際にモックアップで実現できているかを確認する。3D 上で設計した形状の最大曲率に関しては、Rhinoceros の Curvature Analysis の機能を用いて最大曲率の算出を行う（図 51）。平均曲率の最大値を最大曲率としてみなす（図 51 の形状の最大曲率は 0.60 [rad/m]）。本研究で示す制作物の形態図の色表示はこの平均曲率の大きさを表しており、赤色が最も曲率が大きく、青が最も曲率が小さい部分を表している。

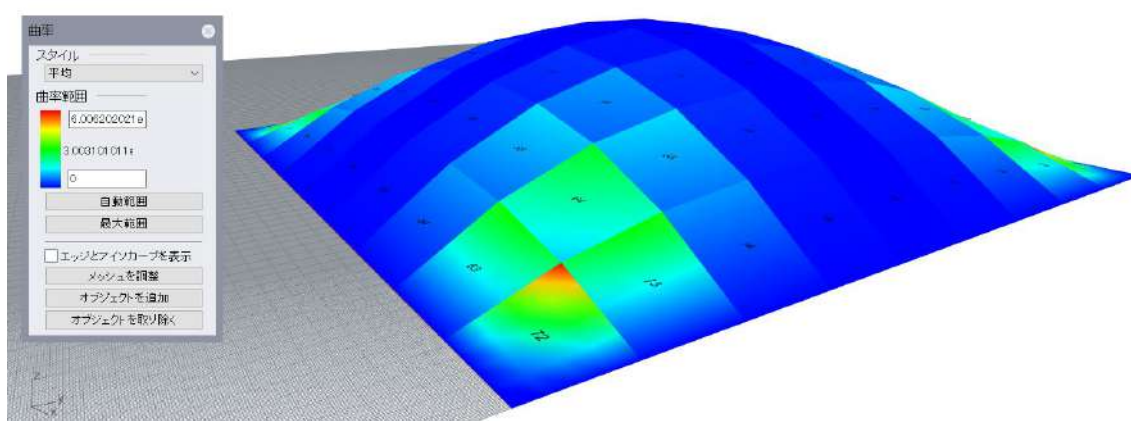


図 51 設計形状からの最大曲率の算出

制作したモックアップの最大曲率の計測方法としては、まずの図 52 のように対象物を限界まで曲げ、曲面の幅 (L [m]) とライズ (H [m]) を計測する。さらにこのモックアップで制作した曲面を円弧に近似し、 $\phi [\text{rad/m}] = \frac{8H}{L^2 + 4H^2}$ によって曲率を算出する。この値が大きくなるほど制作物の形状の自由度は高いとみなす。

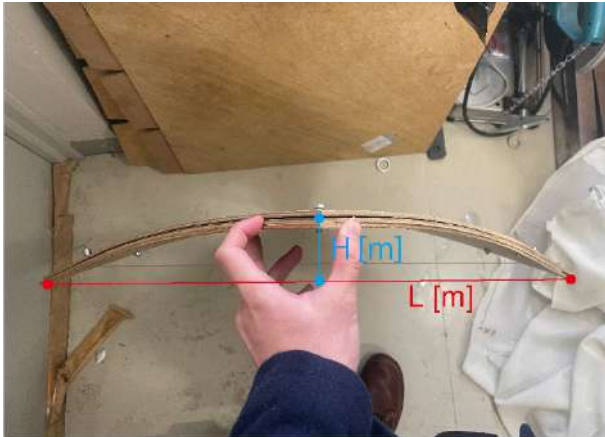


図 52 モックアップの最大曲率の計測

5.2 「道具の拡張」の具体的手法

3 章、4 章を踏まえた具体的な「道具の拡張」の手法として、以下の 3 つの手法を実践した。

- ・手法①: 既存の道具を新しい設計技術と組み合わせる

例: カーフィング+FEM 解析

- ・手法②: 複数の既存の道具を組み合わせる

例: ダボ+カーフィング

- ・手法③: 既存の道具の一部（型・治具など）を制作する

例: 多数点制御の型を制作する

4 章で調査した「既製品を改造」による道具の拡張は、既存の道具の機構そのものに手を加えなければならず、莫大なコストを要するということがわかったため、比較的道具の開発コストが低いと考えられる上記の手法を実践する。具体的に本開発で試行した「道具の拡張」をまとめたのが表 8 である。3 章で規定した「既製品の組み合わせ」に分類される道具の制作手法は、設計側の道具と制作側の道具を組み合わせた手法①、複数の生産の道具を組み合わせた手法②にさらに分けられる。今回試行した「道具の拡張」のうち、カーフィングと FEM 解析を組み合わせた道具、ワイヤーと形状合理化を組み合わせた道具は手法①に分類される。ダボとカーフィングを組み合わせた道具は手法②に分類される。曲木用の多数点制御の型を制作した道具、ワイヤーを巻き取るための治具を制作した道具は、手法③に分類される。

手法①で試行した道具で生じた問題として、情報空間上の設計が実際の挙動とは異なるという点が挙げられる。カーフィングと FEM 解析を組み合わせた道具の場合、無垢材を FEM 解析でモデル化することが難しく、カーフィングによる無垢材の局所的な挙動を設計

することができなかった。また、ワイヤーと形状合理化を組み合わせた道具の場合、曲率の大きな自由度の高い形状を実現することはできたが、情報空間上で想定したよりも大きな誤差が実際のモックアップで出てしまった。このような情報空間と実空間の齟齬をどう修正していくかが手法①の課題であると考えられる。



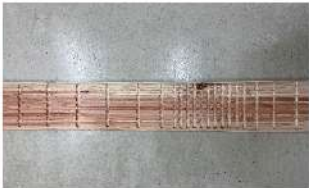


手法②で試行した道具で生じた問題点として、二つの道具の相性が問題となった。カーフィングはかなり大きな曲率を実現できるものの、ダボは小さな曲率の曲げに適しているということがわかった。モックアップ制作の結果、カーフィングで実現できた曲率は $1.71[\text{rad/m}]$ で、ダボで実現できた曲率は $0.88 [\text{rad/m}]$ であった。そこでこれら二つの道具を組み合わせると実現できる曲率は $0.88 [\text{rad/m}]$ であるため、結局小さな曲率の曲げしか実現できないという結果となった。

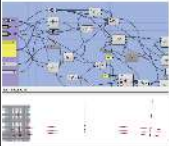
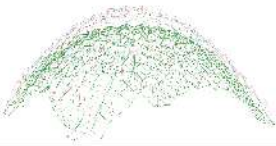

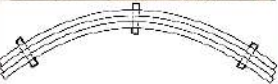



手法③で試行した道具のうち、曲木用の多数点制御の型を制作した道具の場合、作ることができる形状の自由度は高くなったものの、結局熱曲げの技能が必要となってくることが分かった。ここでは型・熱を用いた二次曲面の曲げ加工に熟練技能が必要となってしまうという課題が顕著にみられた。

一方で、ワイヤーを巻き取るための治具を制作した道具の場合、非熟練技能者でも使うことができ、現場での形状の調整も可能な道具をつくることができた。ここから、簡易的な治具を付属させることで非熟練技能者が現場で組み立てに用いることができる道具を制作することが、二次曲面の曲げには有効なのではないかと考えられる。実際に実現できた曲率も $1.65 [\text{rad/m}]$ となり、非常に自由度の高い形状を実現することができた。

以上の結果から、現場での組立を行うための道具に関して手法③の「型・治具を制作」による道具の拡張を行うことが有効であるということが確認できた。

表 8 実践した道具の拡張

道具の拡張	カーフィング + FEM 解析	ワイヤー + 形状合理化	曲げ木用の 多数点制御の型
道具 (設計側)			
道具 (制作側)			
拡張の種類	①既存の道具 + 新たな設計技術	①既存の道具 + 新たな設計技術	③型・治具を制作
制作物の 自由度	一次曲面 曲率 $0.44[\text{rad/m}]$	一次曲面 曲率 $1.20 [\text{rad/m}]$	二次曲面 曲率 $0.95 [\text{rad/m}]$

道具の拡張	ダボ +カーフイング	ダボ+パラメ トリックモデ リング	ワイヤー 巻取り機 (電動)	ワイヤー巻取り機(手 動)+物理演算シミュ レーション
道具 (設計側)				
道具 (制作側)	 			
拡張の種類	②既存の道具の 組み合わせ	①既存の道具 +新たな設計 技術	③型・治具を 制作	③型・治具を制作
制作物の 自由度	二次曲面 曲率 0.88 [rad/m]	二次曲面 曲率 0.79 [rad/m]	二次曲面 曲率 1.65 [rad/m]	二次曲面 曲率 1.65 [rad/m]

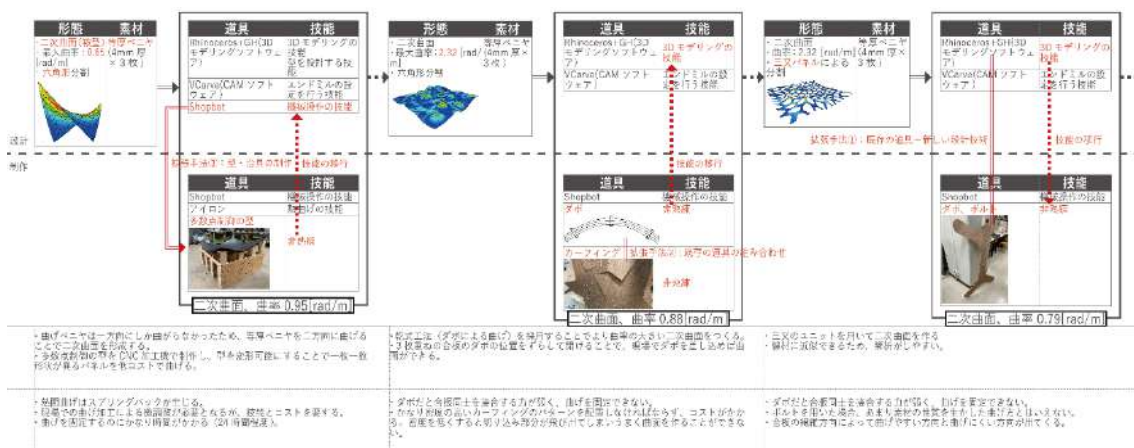
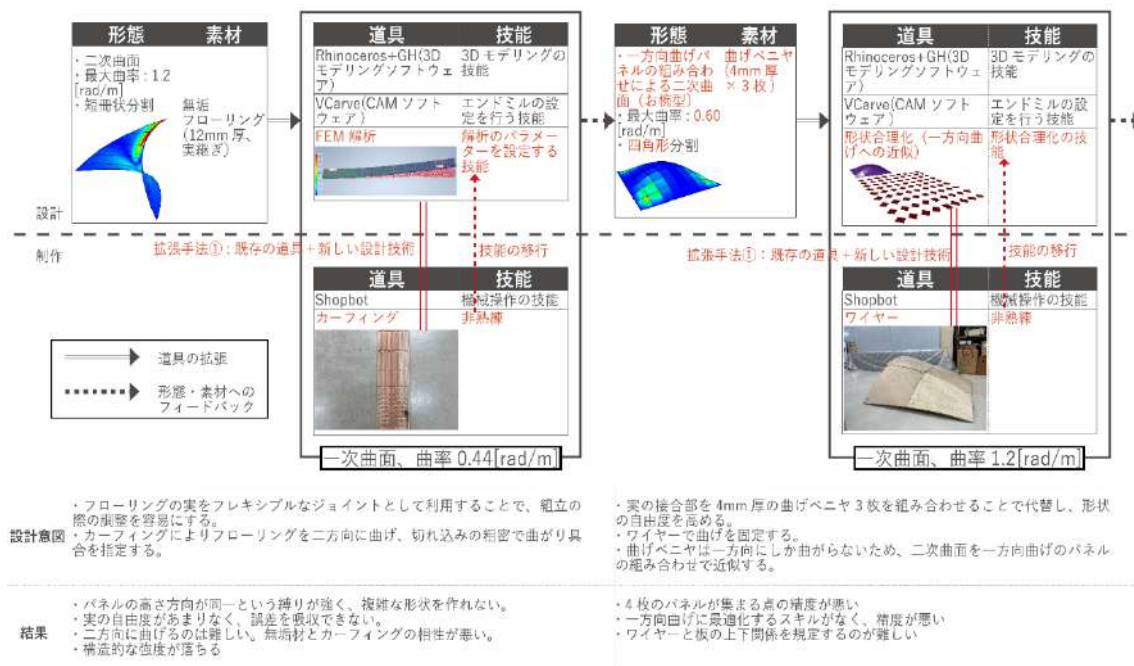
5.3 アジャイル型の設計・制作プロセスの実践

4 章でのデジタル・ファブリケーション事例のプロセスの分析により、形態・素材と道具は互いに密接な関係にあり、形態・素材をもとに道具を決定するウォーターフォール型やプロトタイプング型ではなく、形態・素材から道具、道具から形態・素材というように互いに影響を及ぼしあいながら決定されていくアジャイル型のプロセスが有効ではないかという仮説を立てた。そこで、パビリオンの開発においてはこのアジャイル型プロセスによって形態・素材・道具を決定していくような手法を実践し、そのプロセスの有効性を検証する。本開発において実践した設計・制作プロセスを図式化したのが図 53 である。

まず、曲率の大きな二次曲面を持つ全体形状を想定し、その形状を実現できるような素材を想定する。この形態・素材の決定は設計側の工程である。そして、このような形態および素材を実現できるような道具およびそれに付随する技能を検討する。曲率の大きな二次曲面を既存の曲げの道具で作ろうとすれば、高い開発コストと熟練技能を要する。そのため、「道具の拡張」を行うことで、想定した形態・素材を実現できると考えられる道具を制作する。この「道具の拡張」は設計側・制作側の両方が関わる工程である。「道具の拡張は 5 章 2 節で定義した「手法①: 既存の道具を新しい設計技術と組み合わせる」、「手法②: 複数の既存の道具を組み合わせる」、「手法③: 既存の道具の一部（型・治具など）を制作する」の 3 つの手法のいずれかを試行する。制作した道具を用いて木材を曲げて曲面形状をつくる (1/1 モックアップ制作)。その結果として、モックアップ制作により、この形態・素材・道具の組み合わせの問題点が発見される。その問題点を解決するように、「形態・素材へのフィードバック」を行う。これにより改良された形態・素材の組み合わせから、再び「道具の拡張」を行う。このように、「道具の拡張」と「形態・素材へのフィードバック」を繰り返すことで、徐々に制作物の自由度を高めていく。制作物の自由度

は曲率の大きさ及び曲面形状（一次曲面か二次曲面か）によって評価される。曲率の大きな二次曲面を低コスト・低い技能のハードルで実現できる形態・素材・道具の組み合わせを発見できた時点で制作物を決定する。

このような形態・素材・道具の三者を柔軟に決定していくプロセスにより、低コスト・低い技能のハードルで道具の制作を行いながら自由度の高い制作物を実現できると考えられる。最終的な制作物の決定までに全7回のモックアップ制作を行った。



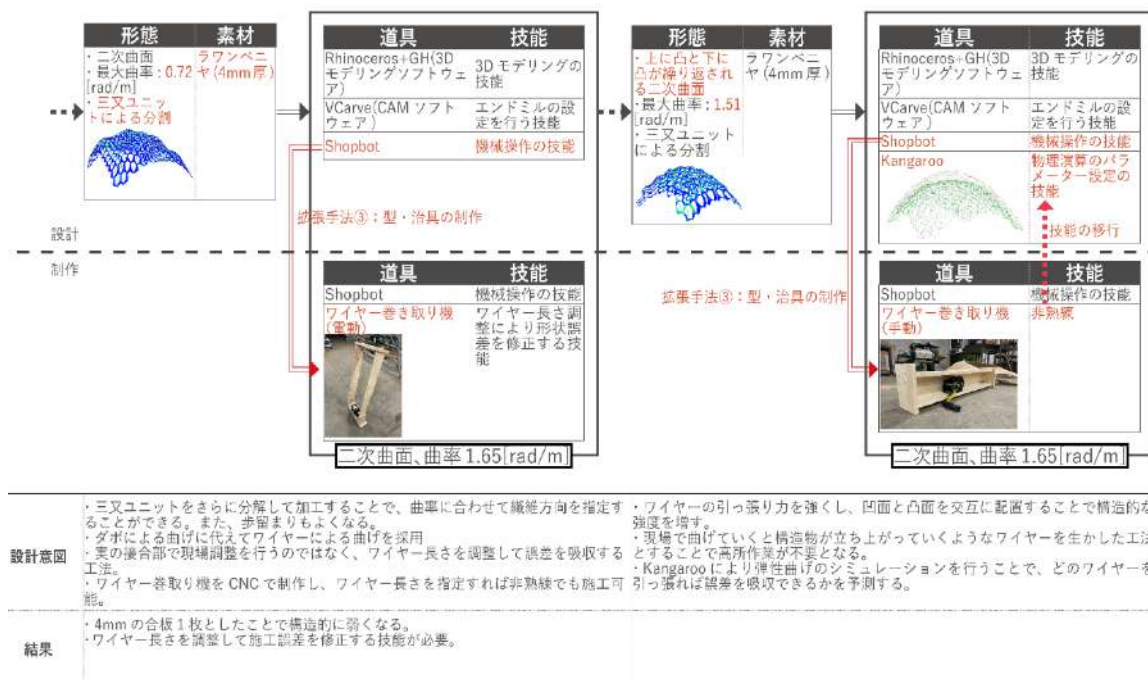


図 53 「道具の拡張」と「形態・素材へのフィードバック」を繰り返すアジャイル型プロセスの実践

まず、非熟練技能者でも現場で複雑曲面を作ることができるように、無垢のフローリング（実継ぎ、12mm 厚）をカーフィングによって 3 次元的に曲げ、カーフィングの密度をパラメトリックに設計することで複雑な二次曲面を実現するという形態・素材・道具の組み合わせを想定した(図 57)。最初の形態として片持ち部分を含む最大曲率 1.20 [rad/m]の二次曲面を想定し、フローリングの形状を活かした短冊状分割によるパネル分割とした。カーフィングの密度を高くすれば制作可能な曲率は大きくなり、密度を低くすれば曲率は小さくなるため、組立において施工者に判断を任せることなく、自動的に作りたい形状を作ることができると考えた。カーフィングの溝の深さはフローリングの強度と曲がりやすさを両立するため、6mm とした。無垢のフローリングを用いることで実継ぎによるフレキシブルなジョイントを用いることが可能となり、現場の誤差を吸収できると考えた。カーフィングの密度と曲げの曲率の関係を把握するには通常の工法であれば熟練技能者による知見が必要であるが、FEM 解析を活用することで、設計者が曲げをコントロールできるようにすることを想定した。「道具の拡張」の手法としては、カーフィングと FEM 解析を組み合わせているため、「手法①：既存の道具を新しい設計技術と組み合わせる」を行っている。

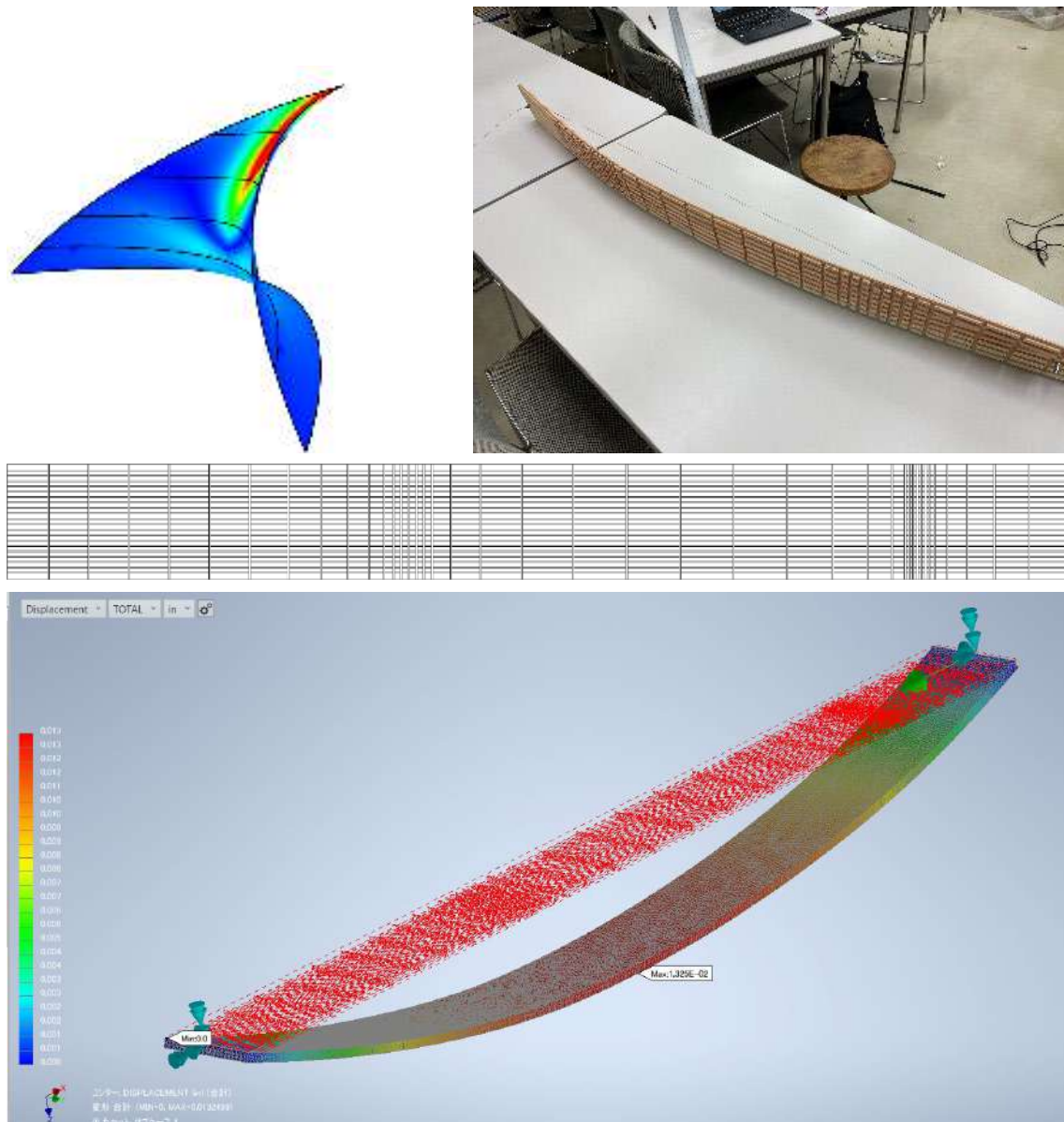


図 54 形態：最大曲率 1.20 [rad/m]の二次曲面 / 素材：無垢フローリング / 道具：カーフィング+FEM 解析

FEM 解析は Inventor Nastran を用いた線形解析とし、Rhinceros で生成したソリッドのモデルを用いて深さ 6mm カーフィングを施したフローリングの幾何学を定義した。フローリングの材料はホワイトオークとした。解析の条件としては、端点は変位を拘束したピン支点とし、もう一方の端点は Y、Z 方向の変位を拘束することで X 方向の移動および回転方向を自由とし、X 方向に水平力を加えて曲げのシミュレーションを行った。これはモックアップで行ったようなフローリングの端部をワイヤーで引っ張って曲げる手法を想定してモデル化を行っている。まず水平力を 5kgf で設定して解析を実行した。変形の解析としては、中央付近のカーフィングの密度の高い部分が最も大きな曲率となるという結果となった (図 55)。



図 55 変形の解析(水平力 5kgf)

次に応力の解析を行ったところ、端部付近のカーフィング密度の大きな部分が最もかかる応力が小さいという結果になった。

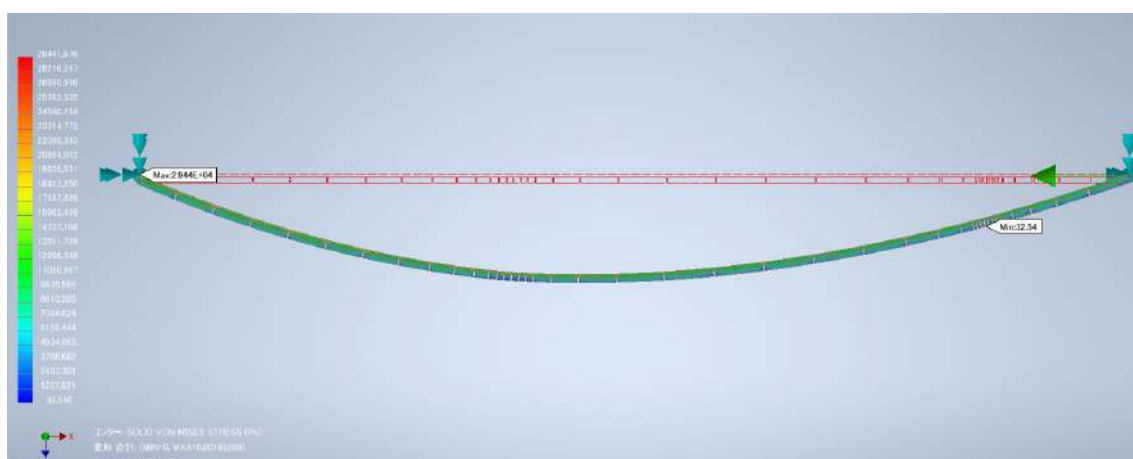
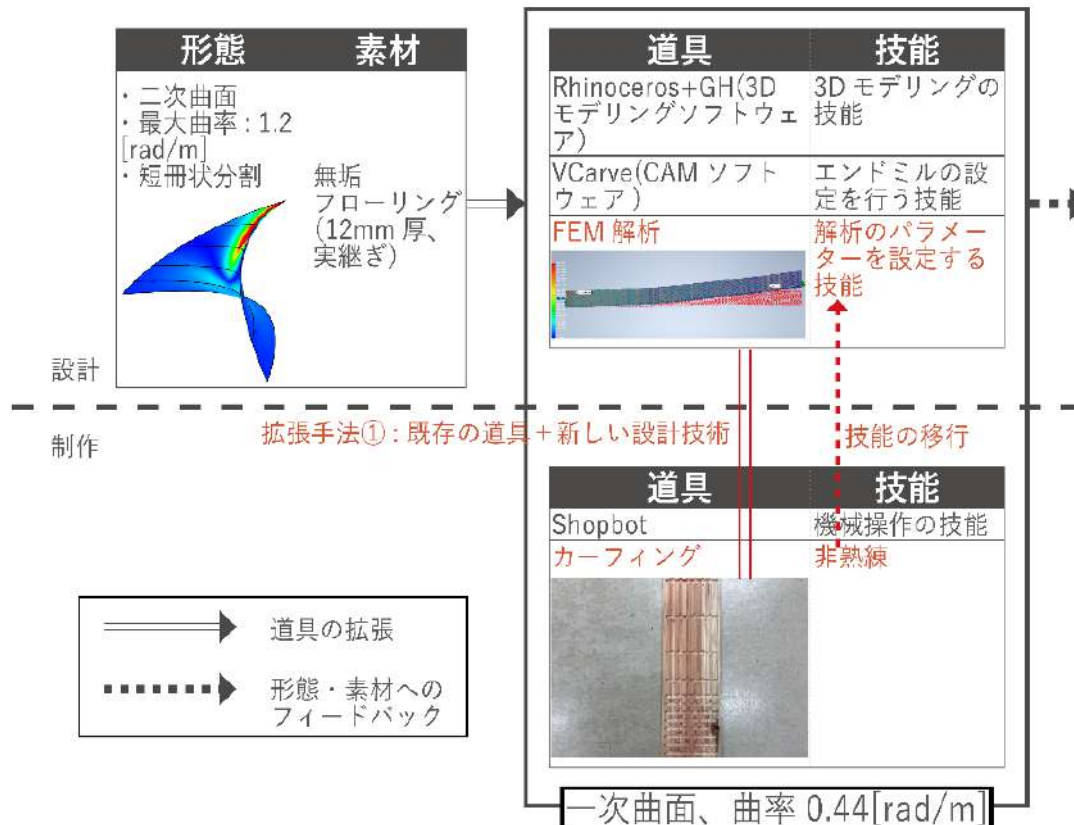


図 56 応力の解析 (水平力 5kgf)

以上の解析結果をもとに、1/1 スケールモックアップとして、長さ 1.3m の無垢フローリング（ホホワイトオーク、12mm 厚）に密度が部分ごとに異なるようなカーフィング加工を行い、できるだけ大きな曲率となるようにワイヤーで端部を引っ張って曲げたものを制作した。曲面形状は中央部分の密度が高い部分が最も曲率が大きくなり、FEM 解析の変形と近い形状になるという結果が得られた。

モックアップ制作で明らかになった問題点として、無垢フローリングとカーフィングの相性があまりよくないということがわかった。カーフィングは比較的均質な材の曲げをコントロールすることに向いており、無垢材では局所的な割れが生じてしまうという結果になった。結果として実現できた曲率は 0.44 [rad/m]であり、想定よりもかなり小さな値と

なった。また、フローリングの形状の制約が大きすぎて複雑曲面の分割方法を設計することが難しく、近似的にフローリングの形状に分割できたとしても、誤差が大きくなることが予想される。カーフィングによる二方向曲げに関しても、Shopbot が加工可能なカーフィングの密度（溝の幅最低 4mm）で二方向に曲げるのは難しく、一方向曲げになってしまいうという結果が得られた。



設計意図

- ・フローリングの実をフレキシブルなジョイントとして利用することで、組立の際の調整を容易にする。
- ・カーフィングによりフローリングを二方向に曲げ、切れ込みの粗密で曲がり具合を指定する。

結果

- ・パネルの高さ方向が同一という縛りが強く、複雑な形状を作れない。
- ・実の自由度があまりなく、誤差を吸収できない。
- ・二方向に曲げるのは難しい。無垢材とカーフィングの相性が悪い。
- ・構造的な強度が落ちる

図 57 設計・制作プロセス（形態：最大曲率 1.20 [rad/m]の二次曲面 / 素材：無垢フローリング / 道具：カーフィング + FEM 解析）

次に、フローリングの形状の制約をなくすために、CNC 加工機で切り出された 4mm 厚の合板を 3 枚組み合わせたパネルを用いて実継ぎを実現することを考えた（図 58）。上部

と下部のパネルは四角形とし、中央部のパネルに凹凸をつけることで実接合を実現する計画とした。パネルの寸法は 60cm 角程度、実の突出部は 5cm 程度とした。先述の無垢フローリングにカーフィングを行ったモックアップでは二方向曲げが実現できなかったため、ワイヤー（ $\phi 1\text{mm}$ ）による一方向曲げによって二方向曲げの曲面を近似する構成とした。二次曲面を一方向曲げパネルに近似するために、Rhino によって二次曲面を四角形パネルに分割し、得られた四角形パネルを近似的に展開することで加工データを取得した。ワイヤーによる曲げを採用すれば、ワイヤー長さを指定するだけでつくりたい曲率の曲面が形成されるため、非熟練技能者でも複雑曲面を作ることができる計画とした。素材は一方向曲げに特化した 4mm 厚の曲げベニヤとした。全体形状はワイヤーが表面に出てこないように上に凸の二次曲面とした。フローリングにおいて制作可能であった曲率が $0.44 [\text{rad/m}]$ と想定より小さかったため、前回想定した曲面形状よりも曲率が小さな最大曲率 $0.60 [\text{rad/m}]$ の曲面形状とした。

想定した全体形状のうち、4 つのパネルを制作し、組み立てを行うことで 1/1 スケールのモックアップ制作を行った。3 枚重ねの曲げベニヤはボルトで固定し、対角線上の 2 箇所の頂点をワイヤーで引っ張り、サーキュラースリーブで固定することで曲げを形成した。曲げベニヤの繊維と直交する方向（材の最も曲がりやすい方向）が 3D モデル上で計測した最大曲率の方向に一致させた。それぞれのパネルのワイヤー長さは 3D モデル上で計測した長さをそのまま採用した。

このモックアップでは、無垢フローリング(12mm)から 3 枚重ねの曲げベニヤ(4mm)への「素材のフィードバック」を行い、上に凸と下に凸のパネルが混在する曲面形状から、上に凸のパネルのみで構成される曲面へと「形態のフィードバック」を行っている。「道具の拡張」の手法としては、ワイヤーと形状合理化を組み合わせているため、「手法①：既存の道具を新しい設計技術と組み合わせる」を行っているといえる。

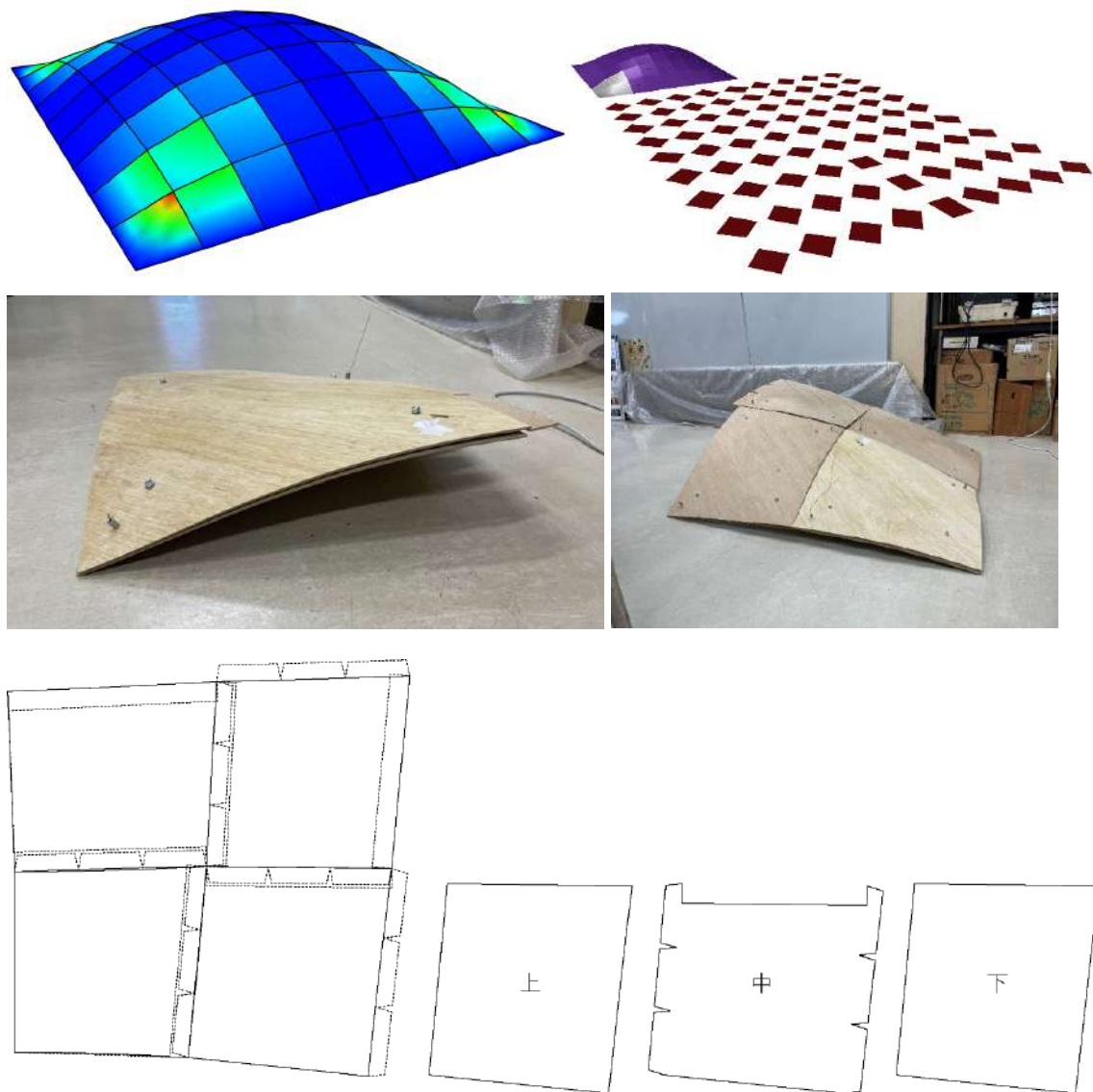


図 58 形態：最大曲率 0.60 [rad/m] の一次曲面の組み合わせによる二次曲面 / 素材：曲げベニヤ / 道具：ワイヤー

モックアップを制作した結果、曲面パネルの曲率は 1.20 [rad/m] となり、形状の自由度は上がったといえる。しかしながら、4 枚のパネルが集まる点の精度に課題がみられた。ここでは Rhinoceros による二方向曲げ曲面の一方方向曲げへの近似を行っているが、4 枚のパネルが正確に一点で合うほどの精度は出せなかったと考えられる。この誤差は二次曲面の曲率が大きくなるほどそれに従って大きくなると考えられるため、制作可能な二次曲面の曲率に制約がかかるという欠点があることがわかった。また、板をねじるようにして曲げを行う（鞍型曲面をつくる）と一方向に曲げるよりも大きな曲率の曲げを実現できることがわかった。

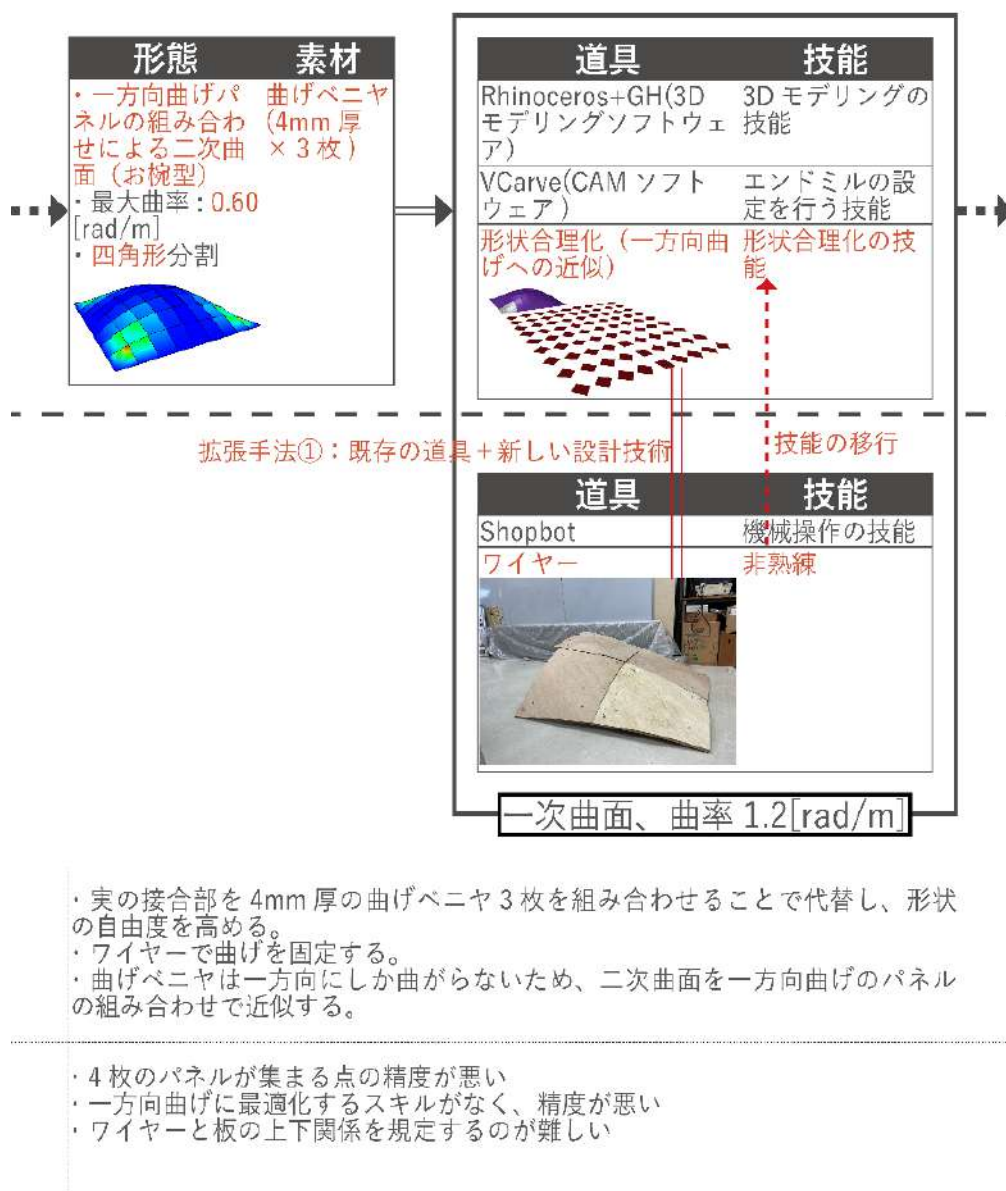
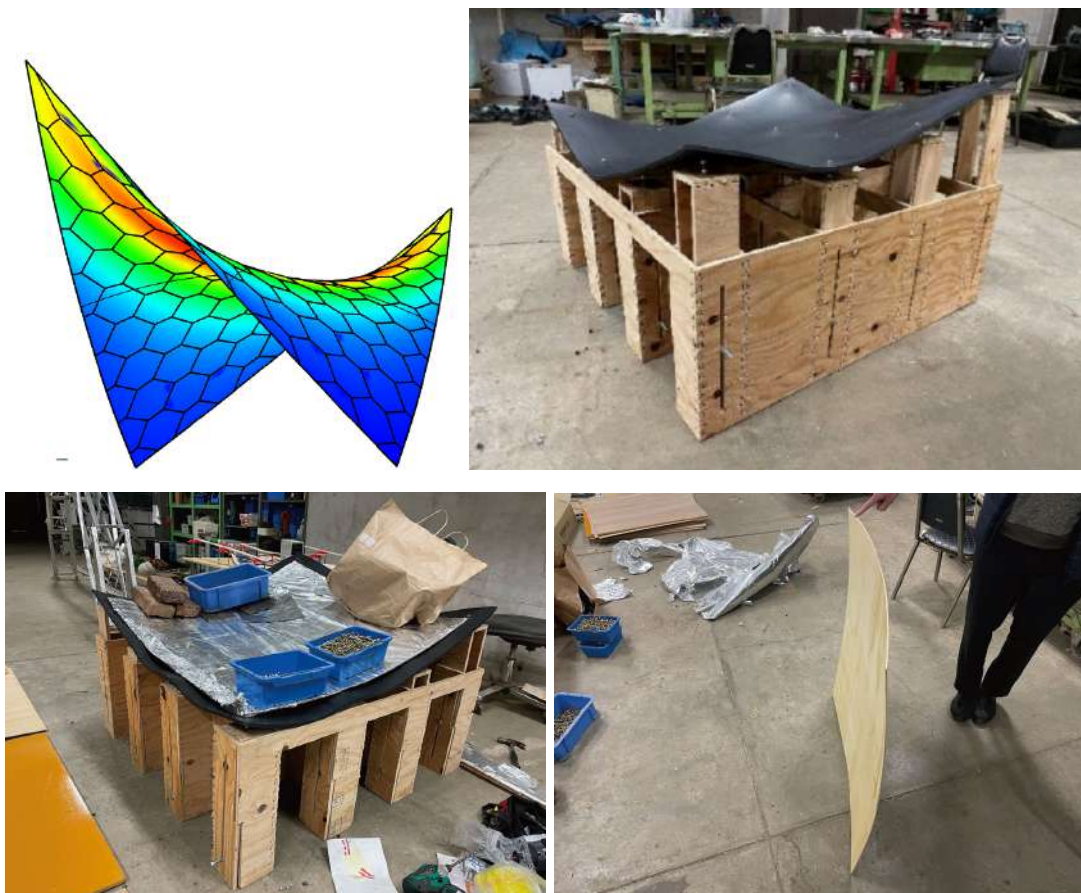


図 59 設計・制作プロセス (形態: 最大曲率 0.60 [rad/m] の一次曲面の組み合わせによる二次曲面 / 素材: 曲げベニヤ / 道具: ワイヤー+形状合理化)

先述したワイヤーによる一方向曲げの四角形パネルの組み合わせによるモックアップでは、パネルが集まる点の精度が問題になるということがわかった。そこで、パネル形状を六角形とし、1 点で集まるパネルの枚数を少なくすることで誤差が出にくいような構成とした。また、一方向曲げの組み合わせによる二次曲面の実現は、形状合理化の精度の問題から実現できる曲率の大きさに限界があったため、熱曲げと現場での弾性曲げを組み合わせ、大きな曲率を実現することを考えた。図 60 のような熱を加えながら二次曲面の型に合板を押し当てて曲げることで二方向曲げパネルを制作する工法を試行した。この型は 16 本の支柱が上下に動くことで一枚一枚異なる二次曲面を生成できる多数点制御の型で、

12mm のラワン合板を CNC 加工で切り出して制作した。この型のフットプリントは $1\text{m} \times 1\text{m}$ 程度で制作したため、曲げることができる合板の大きさも $1\text{m} \times 1\text{m}$ 以下となっている。曲面形状を Rhinoceros で設計し、地面から曲面上の各支点までの距離を算出したのちに、その数値に合わせてそれぞれの支柱を手動で動かし、それぞれの支柱に貫通しているボルトを締めることで土台に固定される構成である。型の上面の素材は天然ゴム（10mm 厚）で制作し、支柱の上下に合わせて伸縮することで二次曲面を形成できるような計画とした。素材は二方向曲げを目指すため、二方向に曲がりやすい 4mm 厚の等厚ベニヤを採用した。全体形状は、ワイヤーによる一方向曲げのモックアップの制作時に板をねじるようにして曲げると大きな曲率の曲げを実現できるということが分かったため、ねじり曲げを生かせるような HP 曲面とする計画とした。

ここでは 3 枚重ねの曲げベニヤ(4mm)から 3 枚重ねの等厚ベニヤ(4mm)へと「素材のフィードバック」を行うとともに、四角形分割から六角形分割への変更および上にも凸のお椀型曲面から HP 曲面への変更を行うという「形態のフィードバック」を行っている。「道具の拡張」の手法としては、多数点制御の型を制作しており、「手法③: 既存の道具の一部（型・治具など）を制作する」を行っているといえる。



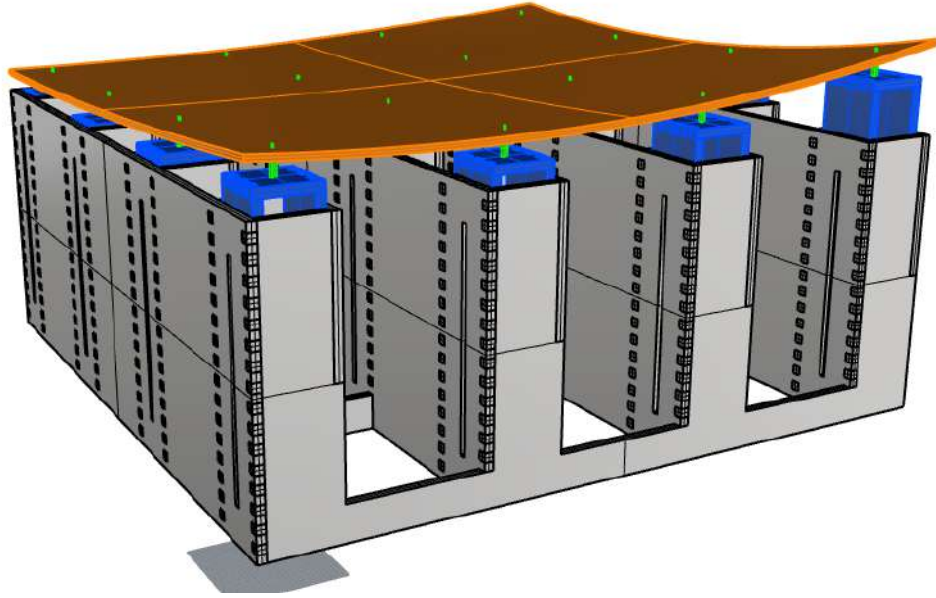
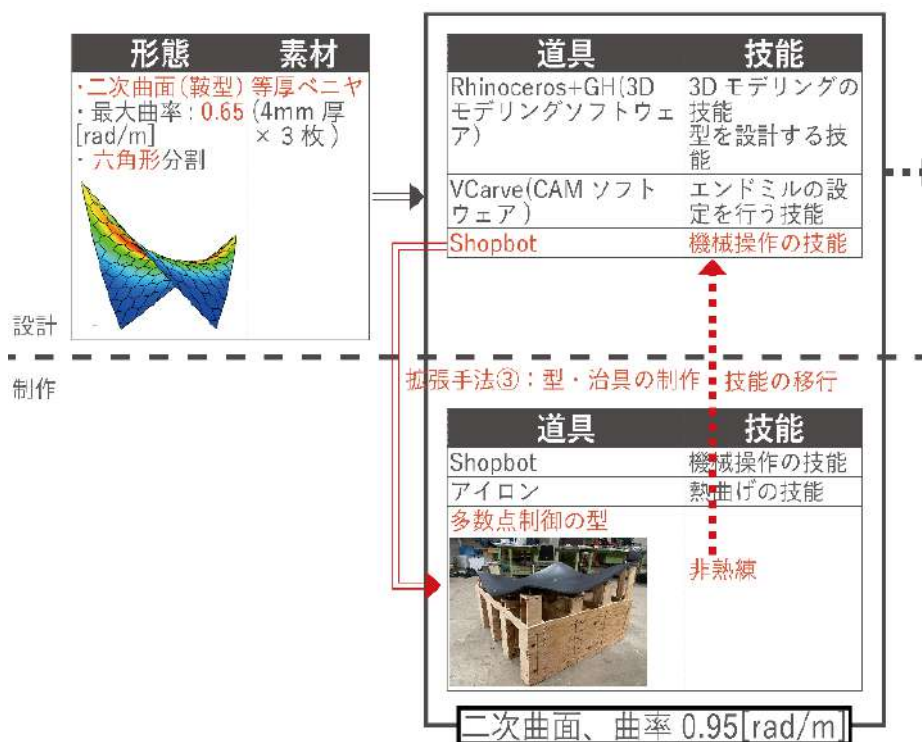


図 60 形態：最大曲率 0.65 [rad/m] の二次曲面（HP シェル曲面） / 素材：等厚ベニヤ / 道具：多数点制御の型 + アイロン

モックアップ制作の結果としては、合板の熱曲げの欠点としてスプリングバックが発生してしまうという課題があることがわかった。かなり長時間曲げた状態で固定しておいても形状が元の形状に戻ってしまうため、非常に非効率な工法となってしまった。今回のモックアップのような熱曲げによる曲げ工法を採用する場合は熱による変形をコントロールする技能が必要であると推察される。また、この多数点制御の型によってどんな曲面でもつくることができるわけではなく、型の上部のゴムの伸縮率の大きさによって曲率に制約がかかってしまうということがわかった。そのため、結果的に実現できた曲率は 0.95 [rad/m] という比較的小さい値になってしまった。



・曲げベニヤは一方にしか曲がらなかったため、等厚ベニヤを二方向に曲げることで二次曲面を形成する。
 ・多数点制御の型を CNC 加工機で制作し、型を変形可能にすることで一枚一枚形状が異なるパネルを低コストで曲げる。

・熱間曲げはスプリングバックが生じる。
 ・現場での曲げ加工による微調整が必要となるが、技能とコストを要する。
 ・曲げを固定するのにかなり時間がかかる (24 時間程度)。

図 61 設計・制作プロセス (形態: 最大曲率 0.65 [rad/m] の二次曲面 (HP シェル曲面) / 素材: 等厚ベニヤ / 道具: 多数点制御の型+アイロン)

先述の多数点制御による曲げのモックアップにおいて、合板の熱曲げは熱による変形をコントロールする技能が必要になるという課題があったため、次に熱を用いない工法を検討した。ここでは、3 枚の等厚ベニヤ(4mm 厚)に $\phi 8\text{mm}$ のダボ穴をわずかにずらして開け、合板を曲げた状態でダボを通すと曲げが固定されるという乾式工法を実験した。曲率が大きくなるほど 3 枚の合板同士のダボ穴の位置のずれは大きくなり、曲率が小さい箇所ほどずれは小さくなる。ゆえに、このずれの大きさを CNC 加工によるダボ穴の位置情報で指定することで、非熟練技能者でも混乱することなく想定した曲面を制作できるという計画である。通常の合板の状態では二方向に曲がらないため、溝幅 4mm のカーフィングを施して二方向に曲げ、ダボを通して二方向曲げを固定した。カーフィングは六角形パネルに適合させたパターンとし、実現したい曲率によってパターンの密度を変えるようなパ

ラメトリックな設計手法によって加工データを決定した。全体形状は、これまでの曲率が小さい形状（最大曲率: 0.65 [rad/m] ）では従来の現場でなりで曲げる工法で十分実現できると考え、より大きな曲率をもつ二次曲面（最大曲率: 2.32 [rad/m] ）を想定した。このモックアップでは、HP 曲面形状から曲率の大きい自由曲面形状への「形態のフィードバック」を行っている。「道具の拡張」の手法としては、ダボとカーフィングを組み合わせた曲げ工法を採用しているため、「手法②: 複数の既存の道具を組み合わせる」を行っているといえる。

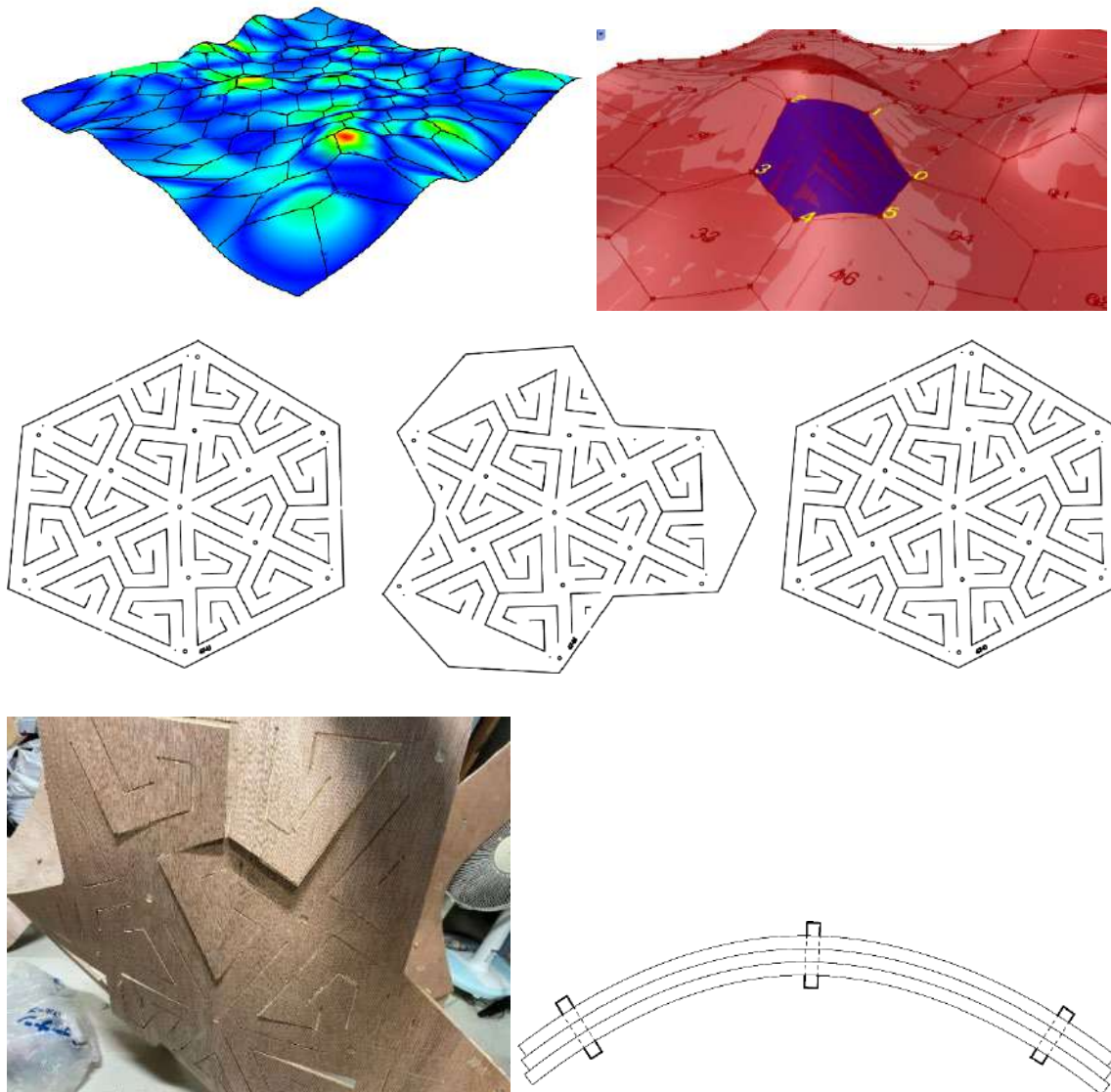


図 62 形態：最大曲率 2.32 [rad/m] の二次曲面 / 素材：ラワンベニヤ / 道具：ダボ+カーフィング

モックアップ制作の結果、カーフィングによって実現できた曲率は 1.71 [rad/m] と大きな値であったが、ダボによって固定できた曲率は 0.88 [rad/m] となり、カーフィングによ

って形状の自由度は上がったものの、ダボの曲面の固定度が課題となった。加えて、カーフingの精度が悪いという点が課題として挙げられた。Shopbot で加工可能な溝の幅は4mm 以上であり、その幅では密なカーフingが施せず、図 62 のように板が表面に突き出してしまうということがわかった。また、ダボをはめる際に合板を曲げた状態にしなければいけないが、かなり大きな力をかけないと合板が曲がらないため、非熟練技能者にも実装可能な構法とはいえないという結果となった。

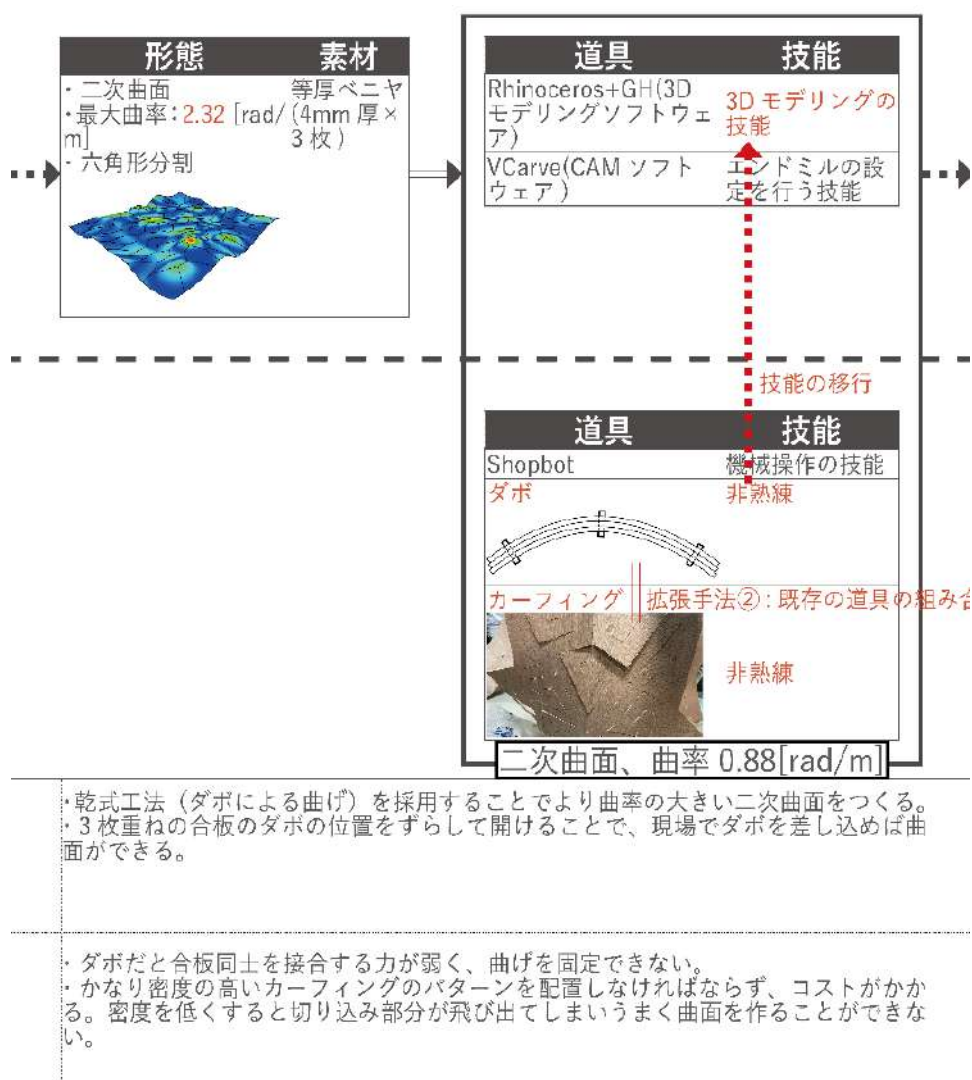


図 63 設計・制作プロセス（形態：最大曲率 2.32 [rad/m]の二次曲面 / 素材：ラワンベニヤ / 道具：カーフing+ダボ）

ここまでは複雑形状の面的な要素をどう制作するかを検討していたが、熟練技能を要せずに精度よく二次曲面パネルを制作することはかなりハードルが高いということがわかった。そこで、より線材に近い三又形状のパネル（突出部は長さ 40cm、幅 15cm 程度）を

曲げて接合していくことで複雑曲面を実現することを考えた。図 64 のように、 $\phi 8\text{mm}$ のダボが合板の曲げを固定する要素になりつつ、ユニット同士を接合するジョイントとして機能する。三又パネルを用いることで 3 方向に曲げることができ、複雑な曲面をつくりやすくなるという設計意図である。線材に近づけることで構造解析がしやすくなるという利点もある。このダボ穴の位置を決定するために、曲面の断面形状からダボ穴の位置を自動的に算出し、加工データを作成するようなパラメトリックモデリングを行った。

ここでは、六角形分割から三又パネルによる分割へと変更することで「形態のフィードバック」を行っている。「道具の拡張」の手法としては、ダボによる曲げとパラメトリックモデリングによるダボ穴位置の設計を行っているため、「手法①：既存の道具を新しい設計技術と組み合わせる」を行っているといえる。

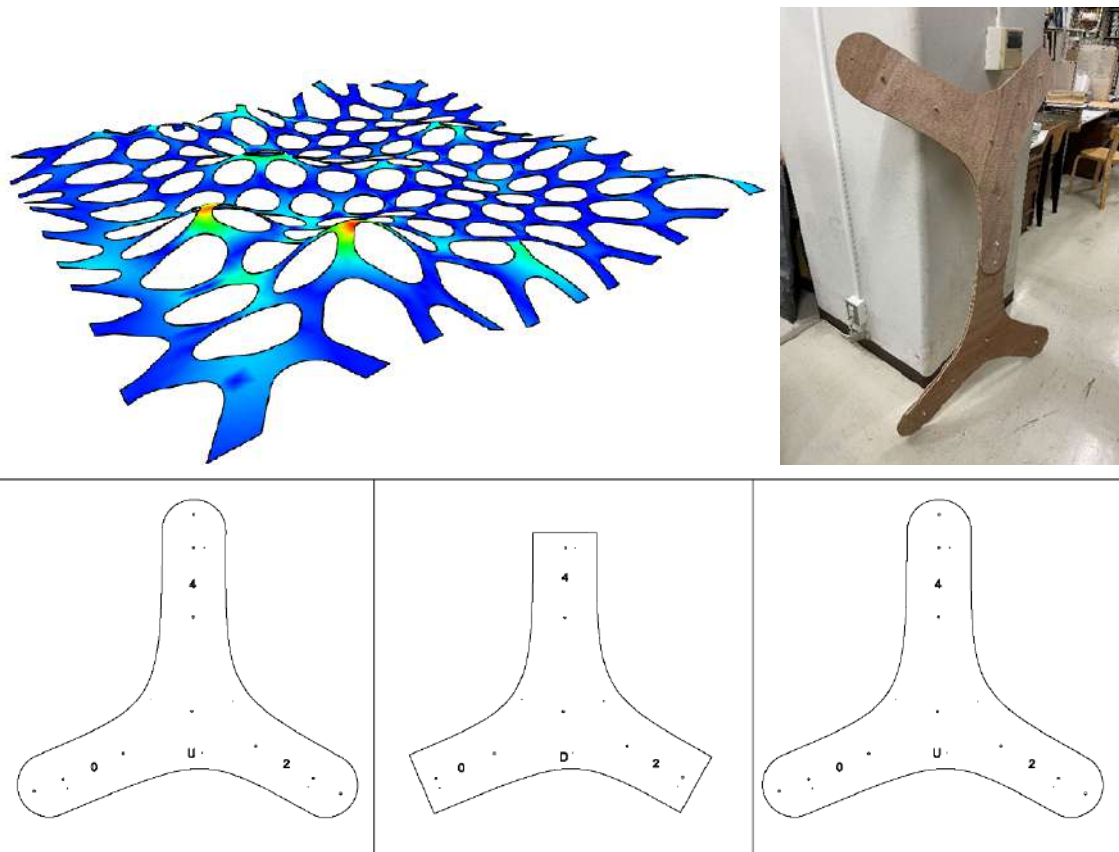


図 64 形態: 三又パネル分割による最大曲率 $2.32 [\text{rad/m}]$ の二次曲面 / 素材: ラワンベニヤ(4mm)×3 / 道具: ダボ+パラメトリックモデリング

モックアップ制作の結果、曲げを固定する要素としてのダボに課題がみられた。ダボは 3 枚の合板を密着させようとする力が働かないため、曲率の大きな曲げを実現することが難しいということがわかった(図 65 左)。結果的に実現できた曲率は $0.79 [\text{rad/m}]$ であり、小さな値となってしまった。ダボの代わりにボルトを使う場合も実験を行ったが、多数の

ボルトを用いなければ曲げを固定できないためボルトが表面に多く出てきてしまうという課題がみられた（図 65 右）。また、ボルトで曲げていく工法は他の素材でも実現可能であり、合板の素材の特性を利用した曲げ方とはいえないと判断した。さらに、三又のパネルを一枚の合板から切り出すと、合板の繊維方向によって曲げやすい部分と曲げにくい部分が出てくるという課題があり、曲率のコントロールが難しいということがわかった。



図 65 板を圧着できないダボ（左）、ボルトが表出した曲面（右）

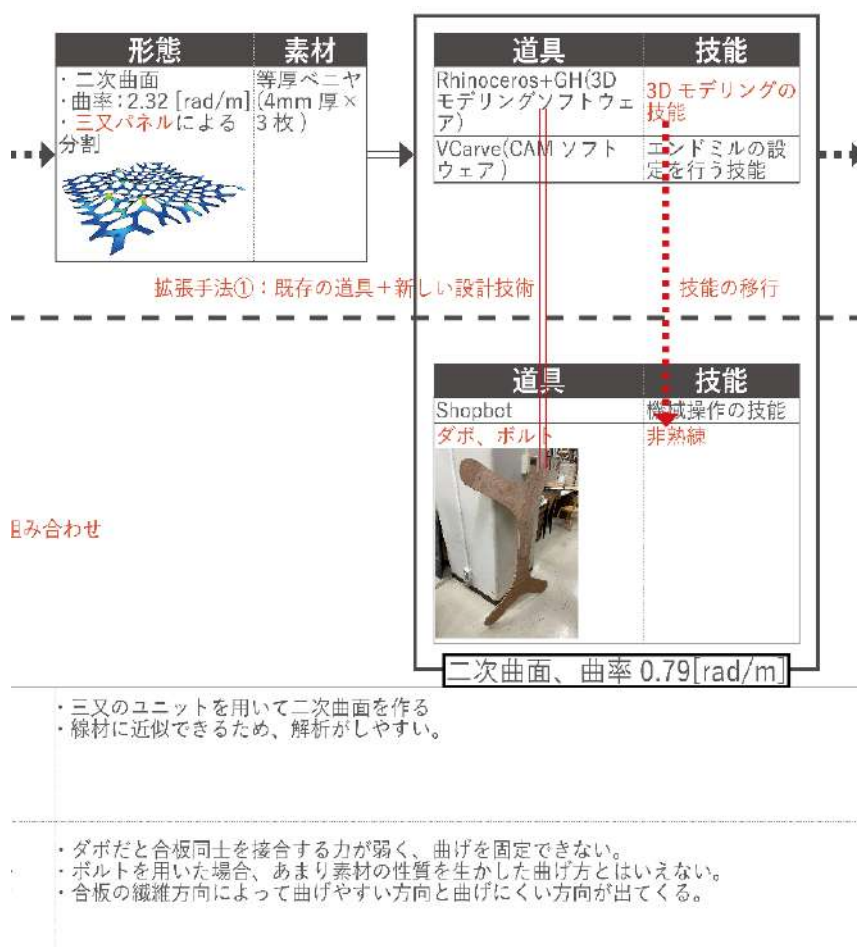


図 66 設計・制作プロセス（形態: 三又パネル分割による最大曲率 2.32 [rad/m]の二次曲面 / 素材: ラワンベニヤ (4mm) × 3 / 道具: ダボ+パラメトリックモデリング)

これまでの実験から、ダボを用いた曲げの固定では大きな曲率を実現することが難しいということがわかった。そこで、ダボの代わりに三又パネルをワイヤーで曲げを固定する工法を試行した。ワイヤーに張力をかける際に力が必要であるため、電動ウィンチに CNC 加工で切り出した治具を取り付け、電源ボタンを押すだけでワイヤーに張力を入れる道具を開発した（図 67）。このワイヤー巻き取り機を用いれば、3D データ上で設計されたワイヤー長さに合わせてボタンを押すだけで非熟練技能者でも容易に複雑な曲面を作ることができると考えた。前述のモックアップで制作した三又パネルは繊維方向をコントロールできず、曲がりやすい部分と曲がりにくい部分が生じるという問題があったが、繊維方向に直角な方向が曲げたい方向となるように切り出した 3 枚の部材から三又ユニットを構成することで、三又ユニットのどの部分でも曲がりやすくなるようにした。これによって歩留まりの悪さも改善することができる。

また、これまでは等厚ベニヤ(4mm 厚)を 3 枚重ねてユニットを作っていたが、合板の曲げやすさと材料効率を考え、ラワンベニヤ(4mm 厚)1 枚を三枚つなぎ合わせて三又ユニットを制作することにした。これによって部材が薄くなった分曲がりやすくなり、大きな曲率の曲面を実現できることができたと考えた。等厚ベニヤよりも安価なラワンベニヤでも十分な曲率を実現できるということがわかったため、等厚ベニヤからラワンベニヤへと素材を変更した。接合部の挙動も同時に把握するため、より大きな範囲を制作できるよう 1/2 スケールのモックアップとした。

このモックアップ制作では、3 枚重ねの等厚ベニヤ(4mm 厚)からラワンベニヤ(4mm 厚)1 枚へと変更することで「素材のフィードバック」を行うとともに、三又パネルから合板 3 枚を接合した三又ユニットへの「形態のフィードバック」を行っている。「道具の拡張」の手法としては、ワイヤー巻き取り機の治具の制作を行っているため、「手法③: 既存の道具の一部（型・治具など）を制作する」を行っているといえる。



図 67 形態: 三又ユニット分割による最大曲率 0.72 [rad/m] の二次曲面 / 素材: ラワンベニヤ(4mm) / 道具: ワイヤー+ワイヤー巻き取り機

モックアップ制作の結果、このワイヤー巻き取り機を用いればこれまで制作したモックアップの中で最も大きな曲率の曲げを実現できるということがわかった（曲率 1.65 [rad/m] ）。また、ワイヤーと合板の上下関係によって曲面が上に凸か下に凸かを規定することができるため、かなり複雑な二次曲面でもできる可能性があることがわかった。最も大きな課題としては、合板 4mm のユニットとしたため、構造的にはかなり弱くなり、大スパンを飛ばすことができなくなるという点が挙げられる。

また、4mm 厚ラワンベニヤ 1 枚の部材に変更したため、これまで行ってきた実接合のかわりに、このモックアップのために特別に改造したボルトを使用した（図 68）。市販の M12 のボルトの中央に垂直に穴をあけ、さらに側面から 6 つの穴をあけたものである。ナットには垂直に 6 つの穴が開いている。この改造したボルトとナットにより、合板の接合とワイヤーの接合部を兼用することができると考えた。まずボルトとナットおよびワッシャーで合板をはさむ。ボルトの側面の穴からワイヤーを通し、ボルトの垂直な穴を通じてナット側の 6 つの穴からワイヤーを出す。このボルトを締めると同時にワイヤーも固定されるため、合板同士の接合と合板とワイヤーの接合を同時に行うことができる。

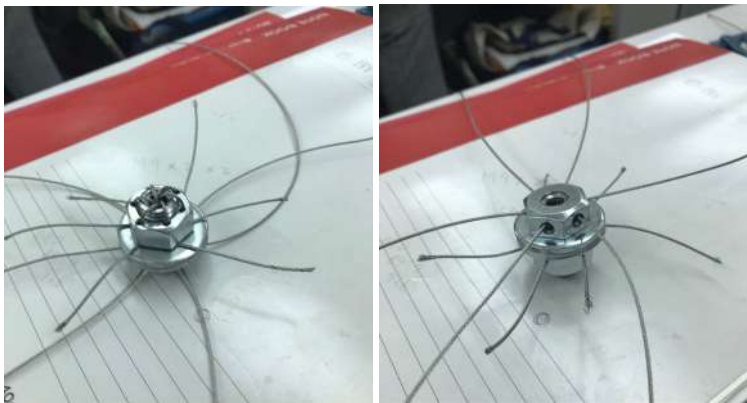


図 68 改造したボルト・ナット

この接合部を用いた結果、かなりシンプルな納まりとすることができたが、ワイヤーを通す作業がかなり細かい作業となってしまう、一回のワイヤーの固定に 10 分以上かかってしまう場合もあった。また、摩擦力でワイヤーが抜ける力を抑えているため、ワイヤーを固定する強度が足りず、ワイヤーがボルトから外れてしまう箇所もみられた。接合部に関しては改善が必要であるということがモックアップ制作によりわかった。



図 69 設計・制作プロセス（形態: 三又ユニット分割による最大曲率 0.72 [rad/m]の二次曲面/ 素材: ラワンベニヤ (4mm) / 道具: ワイヤー+ワイヤー巻き取り機）

次に、前述のモックアップでわかった構造的な課題を解決するために、ユニットごとに上に凸と下に凸が繰り返される曲面形状を検討した。この波状の断面線が少しずつずれていくことでどの部分から見ても一定の厚みを確保し、張弦梁に近い構造となるため、4mm 合板という非常に薄い素材でも 8m の大スパンを飛ばせる計画とした。また、非熟練技能者による施工を行えば想定した形状との誤差が出てしまうことが予測されるが、ワイヤー巻き取り機によりワイヤーに張力を入れて曲げる工法を用いることで、施工後にワイヤーの張力を調整して形状の調整を行うことができると考えられる。ワイヤーを巻き取るための道具は操作しやすさを考慮し、前回のモックアップで制作した電動のものから手動のものへと変更し、市販の手動ウィンチと CNC 加工による治具を組み合わせることで道具の拡張を行った。ワイヤー張力と全体形状の関係は物理演算シミュレーションソフトウェアの Kangaroo を用いて推定することができる。この Kangaroo による弾性曲げシミュレーションを用いれば、ある部分のワイヤーの張力を大きく（小さく）すれば、構造物の高さが高く（低く）なるといったような全体形状の変形を予測できる。その予測に合わせて施工者がワイヤー張力を調整すれば、非熟練技能者でも施工誤差の調整を行うことができると考えられる。このように、設計者が弾性曲げシミュレーションという道具を駆使することで組立に必要な熟練技能を補完することを想定した。

「道具の拡張」の手法としては、ワイヤー巻き取り機の治具の制作を行っているため、「手法③: 既存の道具の一部（型・治具など）を制作する」に分類される。

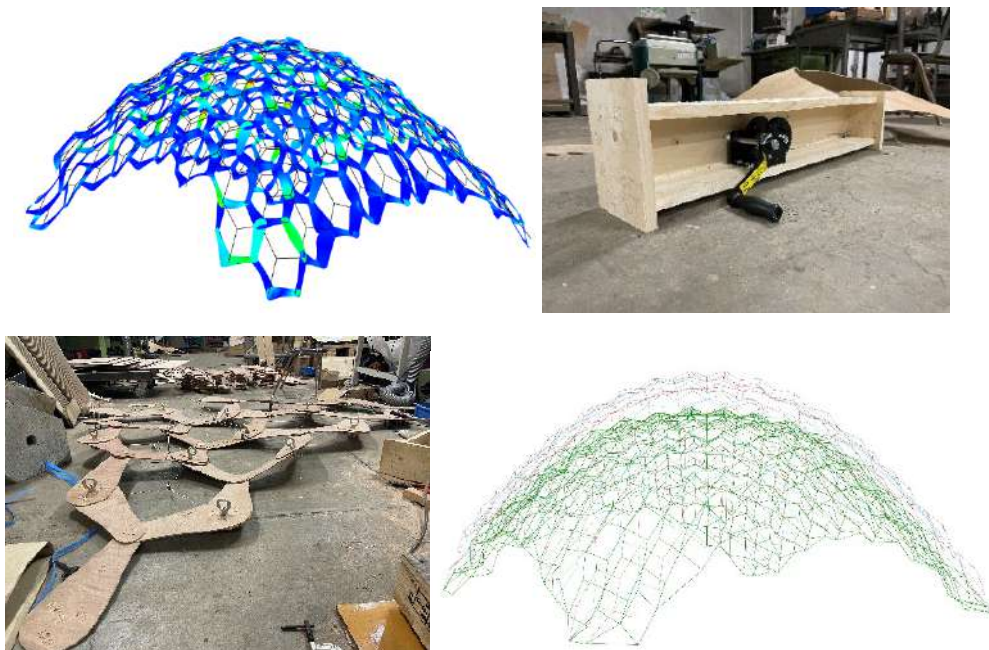


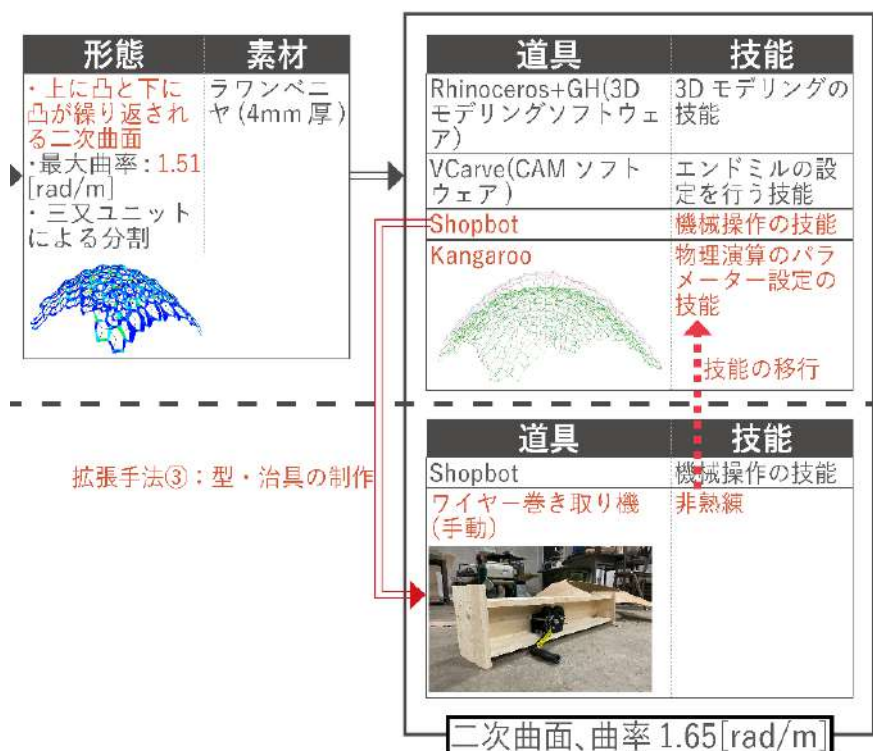
図 70 形態: 三又ユニット分割による最大曲率 $1.51[\text{rad/m}]$ の上に凸と下に凸が繰り返される二次曲面) / 素材: 4mm 厚ラワンベニヤ/ 道具: ワイヤー+ワイヤー巻き取り機+弾性曲げシミュレーション

モックアップ制作の結果、実現できた曲率は 1.65 [rad/m] となり、かなり大きな値を実現することができた。これはワイヤー巻き取り機を用いることで道具の使用者が大きな力をかけなくても十分な張力を入れられることと、さらに 4mm の合板という非常に薄い素材を用いていることが要因であると考えられる。また、凹凸が交互に繰り返されるような非常に複雑な曲面でも、ワイヤー長さを曲面形状に合わせて変えていくだけで容易に実現できるということがわかった。

前回のモックアップで課題がみられた接合部に関して、今回のモックアップでは市販アイボルトおよびアイナット（リング付きのボルトとリング付きのナット）を用いた。これにより、ワイヤーの固定に時間がかかるという問題、接合部の強度の問題は解決された。また、この接合部はボルト 1 本のみで 3 枚の合板を固定しているが、ワイヤーにより曲げられた合板同士が互いにかみ合い、回転方向の変形を抑制できるということがわかった。ボルト 1 本で固定するだけで剛接合に近い接合部を実現できるという、施工性と構造的強度を両立できる接合部となった。

全体形状とワイヤー張力の関係を把握するため、弾性曲げシミュレーションのモデル化を行った。設計形状から合板の中心線とワイヤーの中心線を抽出し、線材の組み合わせとしてモデル化した。接合部はすべて剛接合として想定した。地面との接地点は、足元一カ所につき 2 点を固定点として設定した。今回のモデル化では材料特性のパラメーターとして、合板の軸力剛性および曲げ剛性、合板の曲げに対する復元力、合板の荷重、ワイヤーの軸力剛性を設定した。この材料特性のパラメーターは単位を持たない相対的な値であるため、実際に制作した構造物の条件を基に値を設定する必要がある。このモデルを用いて弾性曲げシミュレーションを行えば、全体形状とワイヤー張力の関係を予測し、施工誤差の修正を行うことができると考えられる。例えば、この構造物の施工後に、ある点において設計形状と実際の構造物に $X \text{ [cm]}$ の誤差が生じていたとする。ある点を $X \text{ [cm]}$ 動かしたいときにある部分のワイヤーの張力を Y 倍にする必要があるとすると、この X と Y の関係を把握することができると考えられるため、この Y の数値を基に設計者は施工者にある部分のワイヤーをさらに $Z \text{ [cm]}$ 巻き取るように指示することで、特別な技能を要せずに施工誤差の修正を行うことができると考えられる。

今回のモックアップ制作における形態（三又ユニット分割による上に凸と下に凸が繰り返される二次曲面）、素材（ 4mm 厚ラワンベニヤ）、道具（ワイヤー＋ワイヤー巻き取り機＋弾性曲げシミュレーション）の組み合わせであれば、特別な熟練技能を必要とせず曲率の大きな二次曲面（最大曲率 1.65 [rad/m] ）を実現できるということがわかった。また、接合部の問題や構造的な強度に関する課題も解決できる可能性が高いということがわかったため、この形態・素材・道具の組み合わせによる構造物を最終的な制作物として決定した。



・ワイヤーの引っ張り力を強くし、凹面と凸面を交互に配置することで構造的な強度を増す。
 ・現場で曲げていくと構造物が立ち上がっていくようなワイヤーを生かした工法とすることで高所作業が不要となる。
 ・Kangaroo により弾性曲げのシミュレーションを行うことで、どのワイヤーを引っ張れば誤差を吸収できるかを予測する。

図 71 設計・制作プロセス (形態: 三又ユニット分割による最大曲率 1.51 [rad/m] の上に凸と下に凸が繰り返される二次曲面 / 素材: ラワンベニヤ (4mm) / 道具: ワイヤー+ワイヤー巻き取り機+弾性曲げシミュレーション)

以上のような、「道具の拡張」と「形態・素材へのフィードバック」を繰り返していくことで、初期モックアップにおける一次曲面、曲率小 (0.44 [rad/m]) の形状から、最終モックアップでは曲率が非常に大きな二次曲面 (1.65 [rad/m]) の形状へと発展させることができた。このアジャイル型プロセスにより制作物と制作手法を同時に検討することで、低コスト・低い技能のハードルで道具を制作しながら制作物の自由度を高めていくことが可能になるということがわかった。

本開発における「道具の拡張」と「形態・素材へのフィードバックの関係」をまとめたのが図 72 である。カーフィンギング+FEM 解析の「道具の拡張」を行っているモックアップでは、モックアップで実現できた形態の自由度の制約 (一次曲面、曲率 0.44 [rad/m]) を

考慮し、4mm 厚曲げベニヤ 3 枚によるお椀型曲面への「形態・素材のフィードバック」がみられる。ワイヤー+形状合理化の「道具の拡張」を行っているモックアップでは、形態の自由度を高めるために、曲げベニヤによるお椀型曲面から 4mm 厚等厚ベニヤによるねじりような形状の HP 曲面へと変更し、精度を向上させるために四角形パネルから六角形パネルへと変更するという「形態・素材のフィードバック」がみられる。曲木用の多数点制御の型の「道具の拡張」を行ったモックアップでは、道具の技能の問題を考慮し、熱曲げによる最大曲率 0.65 [rad/m]の曲面から乾式工法によるより大きな曲率の曲面への「形態のフィードバック」がみられる。ダボ+カーフィングの「道具の拡張」を行ったモックアップでは、形態の自由度を上げる（曲率を大きくする）ため、そしてカーフィングの欠点である精度を上げるために六角形パネルから三又パネルへと「形態のフィードバック」を行った。ダボ+パラメトリックモデリングのモックアップでは、ダボによって実現できた形態の自由度の制約（曲率 0.79 [rad/m]）を考慮して最大曲率 0.72 [rad/m]の二次曲面とするとともに、より曲げをコントロールしやすい素材の使い方をするために、4mm 厚ラワンベニヤ 1 枚による三又ユニットへと変更することで「形態・素材のフィードバック」を行った。また、このフィードバックにより、フレキシブルな接合部である実継から、より現場での混乱が少ないボルトとかみ合った曲面合板によるピン接合と剛接合の中間的な接合部へと変更を行った。電動ワイヤー巻き取り機の「道具の拡張」を行ったモックアップでは、最大で曲率 1.65 [rad/m]の二次曲面が実現できることがわかったため、最大曲率 1.51 [rad/m]の凹凸が繰り返される二次曲面へと「形態のフィードバック」を行った。

道具の拡張	カーフィング + FEM 解析	ワイヤー + 形状合理化	曲げ木用の 多数点制御の型	ダボ + カーフィング	ダボ+パラメ トリックモデ リング	ワイヤー 巻き取り機 (電動)	ワイヤー巻き取り機(手 動)+物理演算シミュ レーション
道具 (設計側)							
道具 (制作側)							
拡張の種類	①既存の道具 + 新たな設計技術	①既存の道具 + 新たな設計技術	③型・治具を制作	②既存の道具の 組み合わせ	①既存の道具 + 新たな設計 技術	③型・治具を 制作	③型・治具を制作
制作物の 自由度	一次曲面 曲率 0.44 [rad/m]	一次曲面 曲率 1.20 [rad/m]	二次曲面 曲率 0.95 [rad/m]	二次曲面 曲率 0.88 [rad/m]	二次曲面 曲率 0.79 [rad/m]	二次曲面 曲率 1.65 [rad/m]	二次曲面 曲率 1.65 [rad/m]
結果	・カーフィングと無垢材の相性が悪い ・フローリングの形状の制約が大きい	・ねじりように曲げるとよく曲がる ・4枚のパネルが一点で集まる部分の精度が悪い	・ゴムの伸縮率で曲率が制限される ・スプリングバックが発生 ・熱曲げのスキルが必要	・ダボだと合板同士を圧着する力が弱い ・Shopbot では細かいパターンが作れず、精度が悪い	・ダボが固定可能な曲率が小さい ・三又パネルは繊維方向のコントロールが難しい	・大きな曲率を実現できる ・精度を調整する技能が必要	・組立のルールだけ決めて、個々の数値を変えれば複雑な図が生成できる ・弾性曲げシミュレーションでワイヤー長さや全体形状の関係を把握し、誤差を修正
形態							
曲面形状	一次曲面の組み合わせによる二次曲面 (お椀型)	二次曲面 (HP 曲面)	二次曲面	二次曲面	二次曲面	二次曲面	上に凸と下に凸が繰り返される二次曲面
曲率	0.60 [rad/m]	0.65 [rad/m]	2.32 [rad/m]	2.32 [rad/m]	0.72 [rad/m]	1.51 [rad/m]	
分割方法	四角形パネル	六角形パネル	六角形パネル	三又パネル	三又ユニット	三又ユニット	
素材	4mm 厚曲げベニヤ × 3	4mm 厚等厚ベニヤ × 3	4mm 厚等厚ベニヤ × 3	4mm 厚等厚ベニヤ × 3	4mm 厚ラワンベニヤ	4mm 厚ラワンベニヤ	
フィードバックの主要因	形態の自由度	形態の自由度、精度	道具の技能	形態の自由度、精度	形態の自由度、素材、接合部	形態の自由度	

図 72 「道具の拡張」と「形態・素材へのフィードバック」の関係

このように、「形態・素材へのフィードバック」の主要因には、形態の自由度、素材のコントロール、道具に必要な技能、という形態・素材・道具の三つの要素とともに、精度や接合部といったそれ以外の要素があるということがわかった。本開発では主に形態・素材・道具の相互関係を示すプロセスのモデルを提案し、実践を行った。実践の結果、「道具の拡張」と「形態・素材へのフィードバック」を繰り返すアジャイル型のプロセスにより、低コスト及び低い技能のハードルで制作物の自由度を上げるという当初の目的を達成できた。その一方で、形態・素材・道具のモデルではとらえきれない重要な要素として精度、接合部の二つがあるということが明らかになったといえる。

5.4 最終的な制作物

(1) 形態・素材・道具の決定

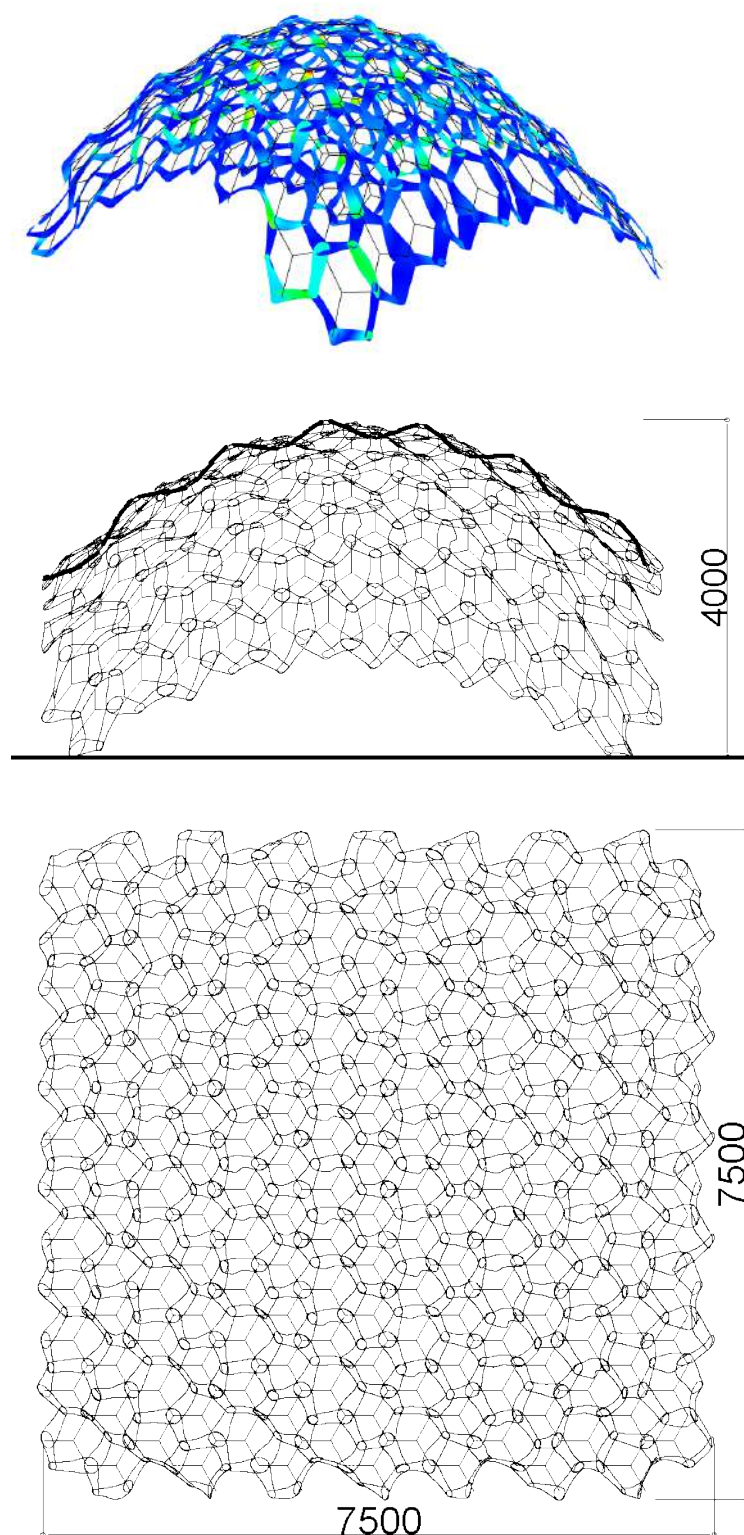


図 73 最終的な制作物の曲面形状/断面図/俯瞰図

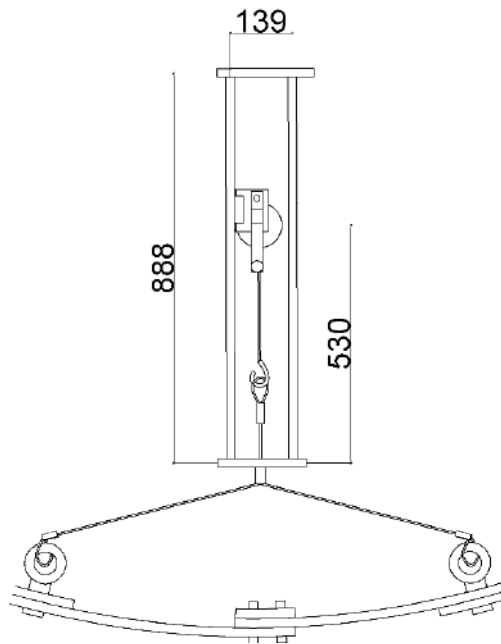


図 74 ワイヤーに張力を入れて合板を曲げる機構

「道具の拡張」と「形態・素材へのフィードバック」を繰り返した結果、最終的に決定された形状が図 73 である。ここでは 4mm のラワンベニヤ一枚をワイヤーで曲げていけばかなり大きな曲率の曲げでも実現できるということを活かし、上に凸と下に凸が繰り返される二次曲面とした（図 73 断面図）。また、上に凸の部分と下に凸の部分をずらして配置していくことで、どの方向から見ても一定の厚みを確保するような張弦梁に近い構造とし、4mm のラワンベニヤというかなり薄い素材でスパンを飛ばすことができる構成とした。ワイヤーは手動のワイヤー巻き取り機で張力を入れていくことで、ワイヤー長さの数値的な情報だけで非熟練技能者でも複雑曲面をつくることができ、ワイヤー長さを調節すれば現場での誤差にも対応できるという構法としている（図 74）。ワイヤー巻き取り機を用いることで、手作業では困難な大きな張力を導入することができ、大きな曲率で曲げを固定することができる。さらに、弾性曲げシミュレーションによって、全体形状とワイヤー張力の関係を予測することで、どのワイヤーを引っ張れば（弛緩すれば）構造物の高さを高く（低く）できるかを把握することができ、非熟練技能者でも施工誤差の修正を行うことができるという想定である。ここでは形態（上に凸と下に凸が繰り返される曲率の大きな二次曲面）、素材（4mm ラワンベニヤ）、道具（ワイヤー＋ワイヤー巻き取り機＋弾性曲げシミュレーション）が結びつき、曲率の大きな複雑な二次曲面を熟練技能者に頼らず実現できると考えた。

この構造物の設計プロセスはまず 4mm 合板をワイヤー＋ワイヤー巻き取り機によって曲げるという素材および構法が決定され、次にそのワイヤーによる曲げを構造として生かすために合板をワイヤーによる張力で固めるという張弦梁のような構造が決定され、最終

的に上に凸と下に凸の曲面を繰り返したような形態が決定された。通常の設計プロセスは順に形態、構造、構法と決定されていくため、その全く逆のプロセスをとっているということがわかる。

接合部の設計としては、三又ユニットの中央部は M4 ボルト 3 本による剛接合とし、三又ユニット同士は M10 のアイボルト（リング付きのボルト）1 本で固定した（図 76）。この三又ユニット同士の接合部はボルト 1 本の接合部ではあるものの、モックアップ制作の結果、ワイヤーによって曲げられたパネル同士がかみ合い、回転が固定されるということがわかったため、三又ユニット同士の接合部も剛接合としてみなした。この三又ユニット同士の接合部にはワイヤーを留め付け、合板の同士の接合とワイヤーと合板の接合を兼用する。このアイボルトの反対側にはアイナット（リング付きのナット）を取り付け、上に凸の曲面となっている個所はワイヤーを合板の下側のリングに固定し、下に凸の曲面となっている個所は合板の上側のリングにワイヤーを固定することで、曲面形状を指定することができる。

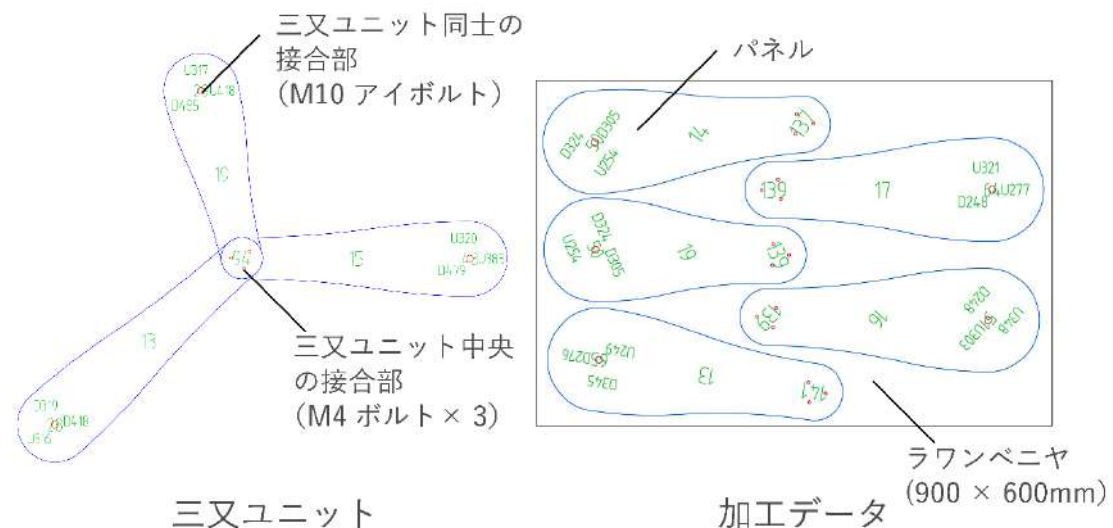


図 75 部材の呼称



図 76 1/1 モックアップ制作による接合部の検討



図 77 ユニット間の接合部（アイボルト+アイナット）

この構造物の大きさは $7.5\text{m} \times 7.5\text{m}$ 程度で、これは構造解析の結果可能であると考えられるスパンをもとに決定した。このスパンを飛ばすために必要な高さとして 4m 程度の高さとした。曲面の 1 つ 1 つの凹凸のライズは 200mm 程度とし、構造体全体が 200mm 程度の厚みを持つとみなせるような寸法とした。パネルの大きさは今回用いた CNC 加工機の最大加工範囲 ($935 \times 635 \times 140\text{mm}$) を考慮して決定した。具体的には、 3×6 板のラワンベニヤを 3 分割した $900 \times 600\text{mm}$ の板を 1 回の加工で用いたが、1 回の加工で 5 枚の部材を切り出すことが最も歩留まりがよくなると判断し、そこから 1 枚当たりのパネルの寸法を決定した。パネルの剛接合される端部は幅 100mm 、ピン接合される端部は幅 180mm である。剛接合部分のパネル幅を小さくすることで、三又ユニットの中央部が曲がりやすくなるようにしている。この構造物は上から見たときに同じ大きさの六角形に分割されているような割付となっているが（図 73 俯瞰図）、部分ごとに地面に対する傾きが異なる（中央部が最も傾きが小さく端部が最も大きい）のに加えて、上に凸の曲面となっているユニットと下に凸の曲面となっているユニットの 2 種類があるため、パネルの長さは 1 枚

1 枚すべて異なる。パネルは計 614 枚となり、端部以外の大部分のパネルは 3 枚 1 組で三又ユニットを形成している。

パネルの加工時間としては、モックアップ制作の際にパネル 5 枚当たり ($900 \times 600\text{mm}$ の合板 1 枚当たり) 20 分程度で加工できることがわかったため、 $20 [\text{min}] \times 614/5 = 40.9 [\text{h}]$ となり、40 時間程度の加工時間が必要であると算出した。また、現場での組立にかかる時間としては、1 回のワイヤー巻き取りに 15 分程度かかるということがわかった。ワイヤーを巻き取る箇所は 187 カ所あるため、5 個のワイヤー巻き取り機を同時に用いることができると思えば、 $15 [\text{min}] \times 187/5 = 9.35 [\text{h}]$ となり、すべてのワイヤーを巻き取るためには 9 時間程度かかるということがわかった。加工にかかる時間と組立にかかる時間から、このサイズの構造物を制作することが現実的に実現可能であると判断し、最終的な形状を決定した。

(2) パラメトリックな設計手法

本開発では、曲面形状の外形の決定から加工データの出力までを一貫して行えるようなアルゴリズムを 3D モデリングソフトウェア (Rhino+Grasshopper) で作成し、パラメトリックモデリングによる設計の自動化を行った。本開発における設計アルゴリズムを表したのが図 78 である。まず曲面形状の概形を決定する。本開発においては $7.5 \times 7.5\text{m}$ 程度の 4 点で地面に接地する自由曲面とした。4 辺のうち 1 辺を人が中に入れる程度の高さ (1.8m 程度) まで持ち上げたような形状とし、それぞれの辺の最高点の高さはすべて異なる値となっている。次にこの曲面を三角形で分割する (計 510 枚)。この三角形の大きさと分割数は、Shopbot の最大加工範囲 ($935 \times 635 \times 140\text{mm}$) の中で最も歩留まりよく加工できるパネルサイズとなるように決定した。さらにこの三角形の重心を抽出し、その点における曲面の垂線方向に、点を曲面の上部または下部に移動させる。本開発においては構造的な側面を考慮し、構造物の厚みを 20cm 程度とみなせるように、すべての重心を 20cm 曲面の上部または下部に移動させた。上部の点と下部の点が交互になるように点の移動を行った。この上下に移動した点と三角形の頂点を結んだ直線が合板及びワイヤーの中心線となり、上に凸と下に凸が交互に繰り返される曲面となる。このようにして合板とワイヤーの中心線が曲面形状の概形から自動的に得られる。指定する主要なパラメーターは、曲面形状の概形、三角形の分割数、重心の移動距離である。

次に合板の加工データを作成するために、移動した点と三角形の頂点を結んだ直線のうち、合板の中心線に該当するものを平面上に展開する (1 ユニット当たり 3 本)。この展開した直線の端部と中心部に円弧を生成する。本開発では合板の曲げやすさと構造的強度のバランスを考慮し、端部の円弧を $\phi 180\text{mm}$ 、中心部の円弧を $\phi 100\text{mm}$ とした。三又ユニットの中心部がより曲がりやすくなるようにするため、中心部の円弧の径を端部の円弧よりも小さくした。さらに、これらの円弧をベジェ曲線でなめらかにつなぐことで、合板の輪郭を生成した。また、展開された合板の中心線から、パネルを接合するボルト穴および

ユニット同士を接合するボルト穴の線データを生成した（パネル接合用ボルト穴： $\phi 5\text{mm}$ 、ユニット接合用ボルト穴： $\phi 12\text{mm}$ ）。この輪郭の線データにユニット番号、接点番号、そして先述したワイヤーの中心線から算出したワイヤー長さおよびワイヤーと曲面の上下関係を示す数値を加えた。以上のような加工データを得るために指定するパラメーターは、三又ユニットの端部及び中心部のパネル幅、ボルト穴の半径である。ここまでの設計情報から加工データの生成までをパラメトリックモデリングによって自動的に行えるようなアルゴリズムを構成した。

最後に一枚一枚のパネルの加工データを $900 \times 600\text{mm}$ の長方形内に配置する作業が必要であるが、この工程は自動化することが難しく、人間が個別的に判断したほうが迅速かつ正確な加工データの生成を行えると考えたため、手動で配置を行った。合板 1 枚当たりパネル 5 枚を配置することで、非常に歩留まりのよい加工データを作成することができた。

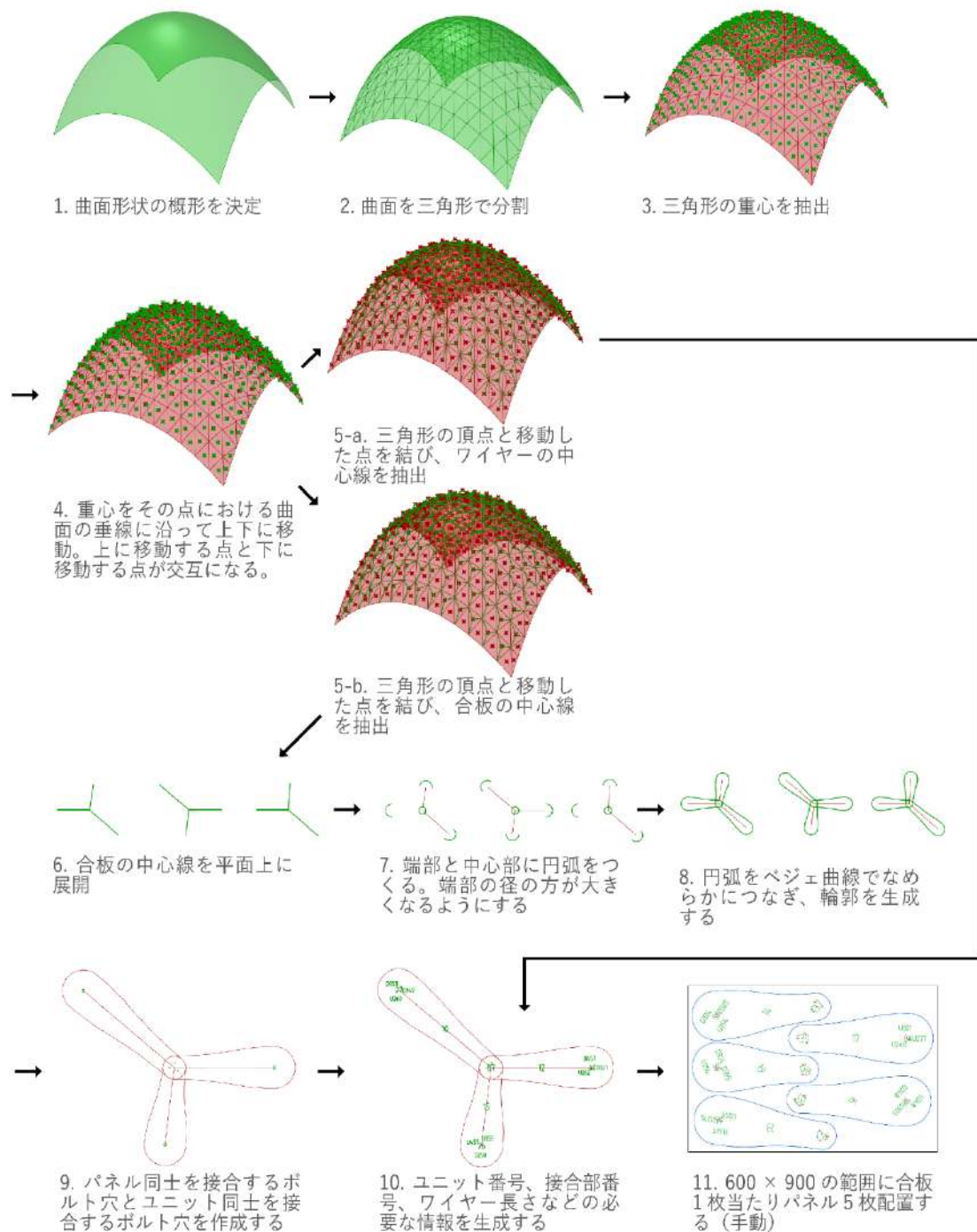


図 78 設計アルゴリズム

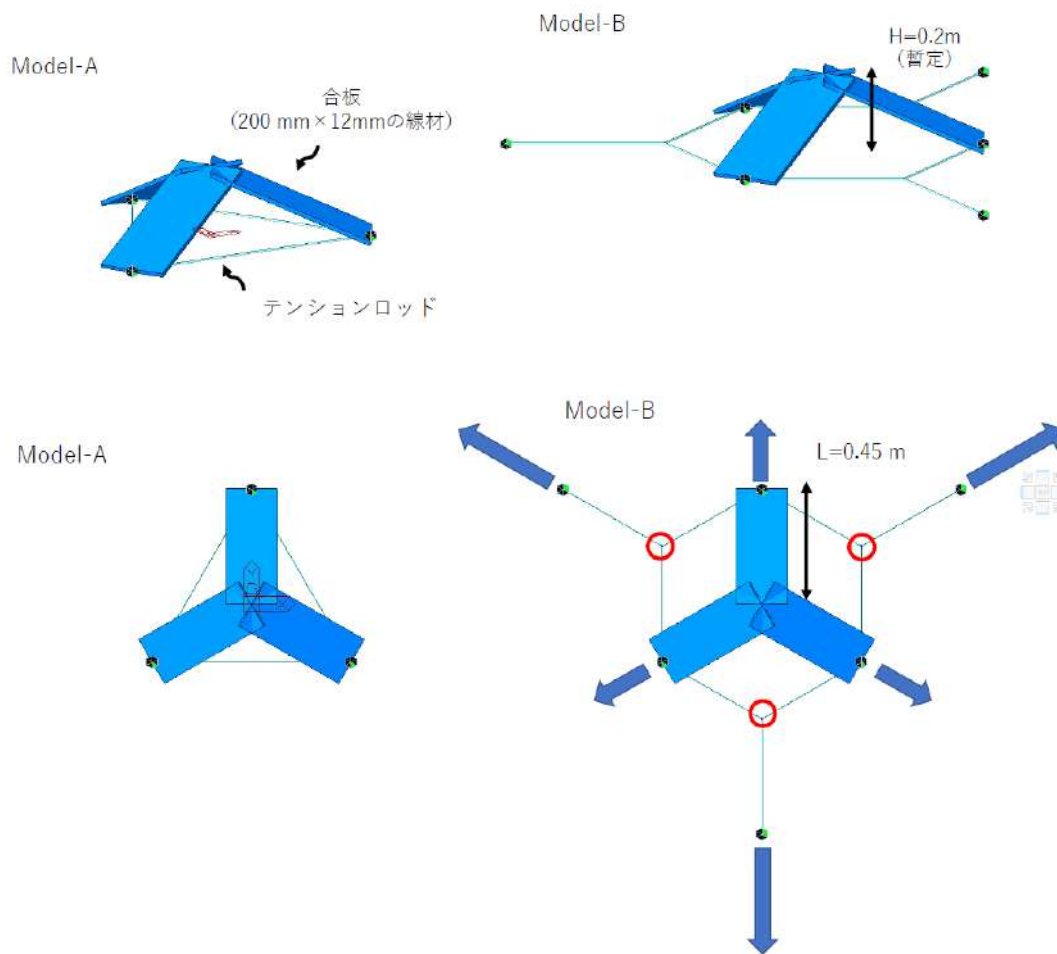


図 80 1 ユニットのモデル化

次に、ユニットを 7 個に増やし、三又の中央部の接合部を主に検討した（図 81）。三又ユニット同士のをピン接合とした場合は、構造的に不安定となったが、剛接合とした場合は安定となった。構造的に安定とするためには、三又ユニット間の曲げを連続させる必要があると考えられる。

以上の検討から、ワイヤー同士の接合部および三又ユニット同士の接合部は剛接合とする必要があることがわかった。ワイヤー同士の接合部は $\phi 6\text{mm}$ 用ワイヤースリーブで 3 本のワイヤーを束ねて加締めることで回転方向の固定度を確保し、剛接合とみなせるようにした。また、三又ユニット同士の接合部はアイボルト 1 本による接合部であるが、ワイヤーによって曲げられた合板同士がかみ合い、回転方向の変形を抑制できるとみなせるため、剛接合とみなせると判断した。

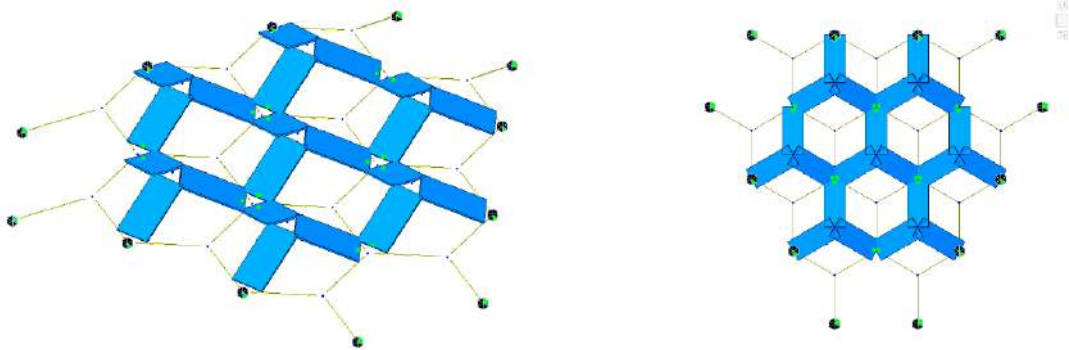


図 81 複数ユニットのモデル化

次に、構造物全体の構造的挙動を分析するため、設計した形状をもとに合板とワイヤーを線材で置換し、Hogan（構造解析ソフトウェア）による非線形解析を行った。部材の断面形状は合板の幅 140mm、厚み 4mm、ワイヤー径 $\phi 2\text{mm}$ とし、ワイヤーにかかる張力を 1 本当たり 30kgf とした。接地点は 4 隅に 2 カ所ずつ、計 8 カ所の支点を設けた。接合部はすべて剛接合でモデル化したが、ワイヤーの曲げ剛性を小さくすることで、ワイヤーと合板の接合部はピン接合相当の応力伝達を再現している。合板の材料特性はヤング率 450000 [tf/m²]、比重 0.55、ポアソン比 4.625 とし、断面寸法は $4 \times 140\text{mm}$ とした。ワイヤーは丸鋼 $\phi 2\text{mm}$ （ただし $I_{xx}=I_{yy}=1.0 \times 10^{-12}$ ）とした。

まず、構造物の変形を検討するために変形図を出力したところ、かなり変形量が大きく出てしまった（図 82 左）。そのため、構造物の外周の 4 辺に $\phi 3\text{mm}$ のワイヤーを張り巡らして変形を抑える計画とした。解析の結果、図 82 右の変形図のように当初の計画よりも変形量を小さくすることができた。

また、木材とワイヤーの軸力図を出力し、圧縮になる個所と引張になる個所を明らかにした（図 83）。ワイヤーの場合は引張になる部分しか構造的に機能しないため、引張になる箇所のみを表示している。圧縮になっているワイヤーは主に曲面を固定する役割のみを担うのに対して、引張になっているワイヤーは曲面を固定する役割に加えて構造的に必要な要素となっている。そのため、施工に際しては解析の結果引張になっていると考えられるワイヤーを優先的に施工する計画とした。

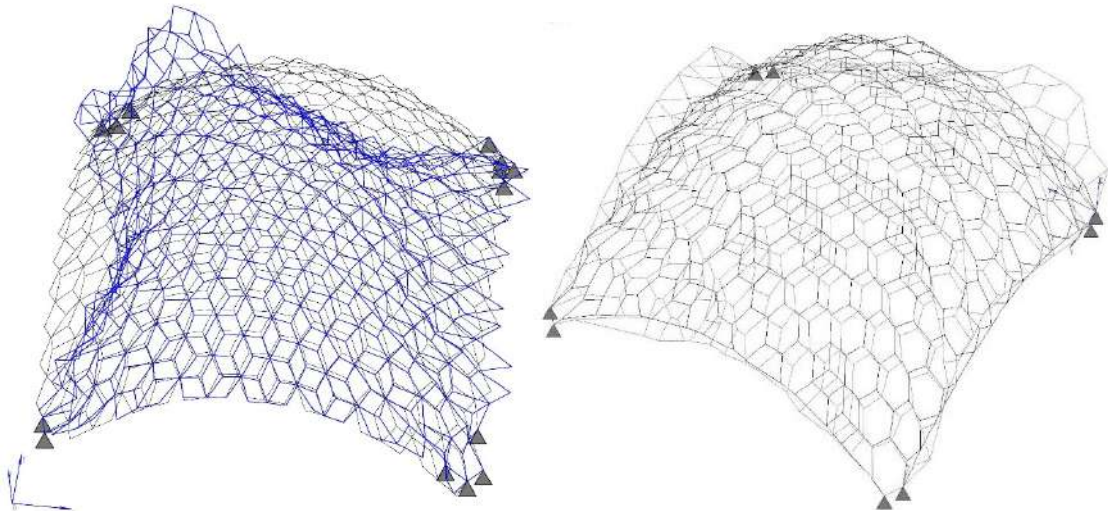


図 82 初期検討での変形図（左）、外周にワイヤー（ $\phi 3\text{mm}$ ）を追加した後の変形図（右）

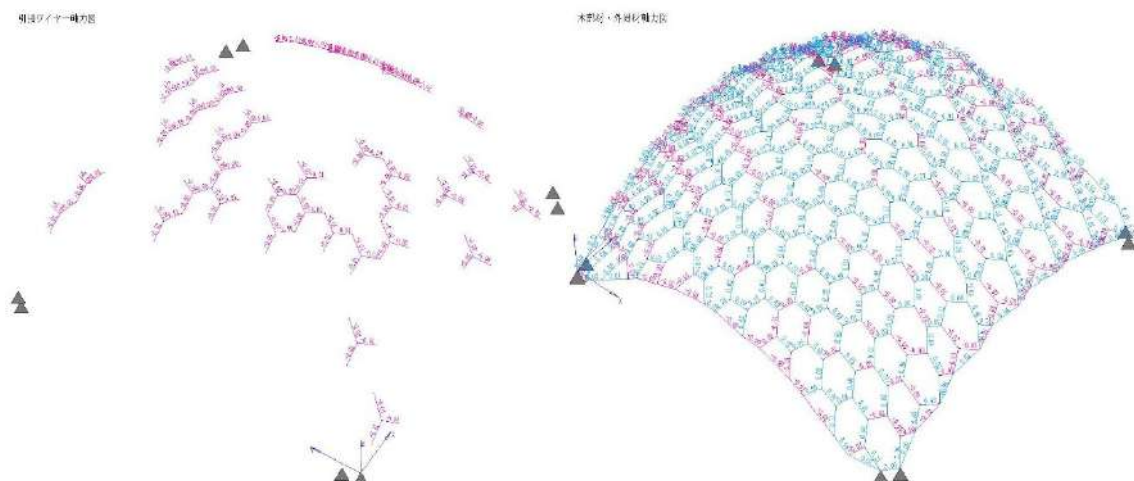


図 83 ワイヤーの軸力図（左）、合板の軸力図（右）（赤：引張、青：圧縮）

（4）道具の制作

大きな曲率の合板の弾性曲げを実現するために、小さな力を入れるだけ容易にワイヤーに十分な張力を入れることができるようなワイヤー巻き取り機を制作した。制作手法としては、市販の手動ウィンチに CNC 加工による治具を組み合わせることで、5 章 2 節の分類における「手法③：型・治具を制作」を行い、道具の拡張を行った（図 85）。ここでは巻き取る機構そのものは独自で作ることはせずに、できるだけ既製品を用いて、道具の制作コストを最小限にする手法をとった。

道具の治具に用いる材としては、加工しやすさと持ちやすさを考慮して比較的軽い木材（SPF 材 19mm 厚）を用いたが、もっとも応力がかかる先端部分は強度の高い素材（合板 12mm 厚）を用いた。CNC 加工を用いることで、複雑な接合部を容易に制作することが

でき、柔らかい木材でも十分な接合部の強度を確保することができた。

最終的には、試作品も含めて 5 つのワイヤー巻き取り機を制作し、同時に 5 人までがワイヤーを巻き取る作業を行えるようにした。

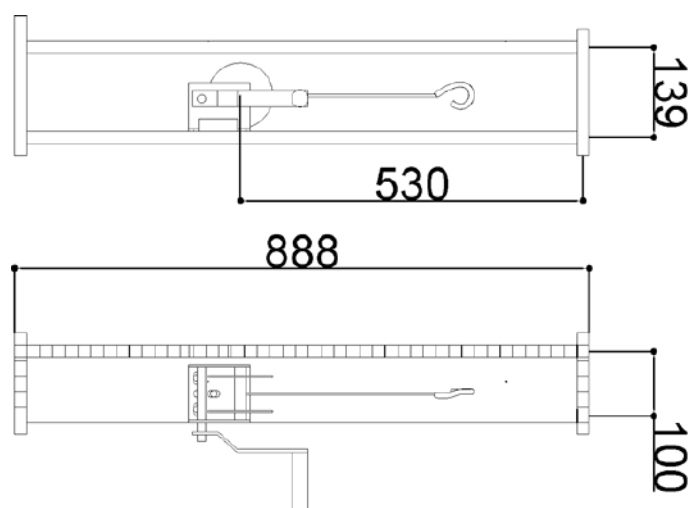


図 84 ワイヤー巻き取り機の寸法

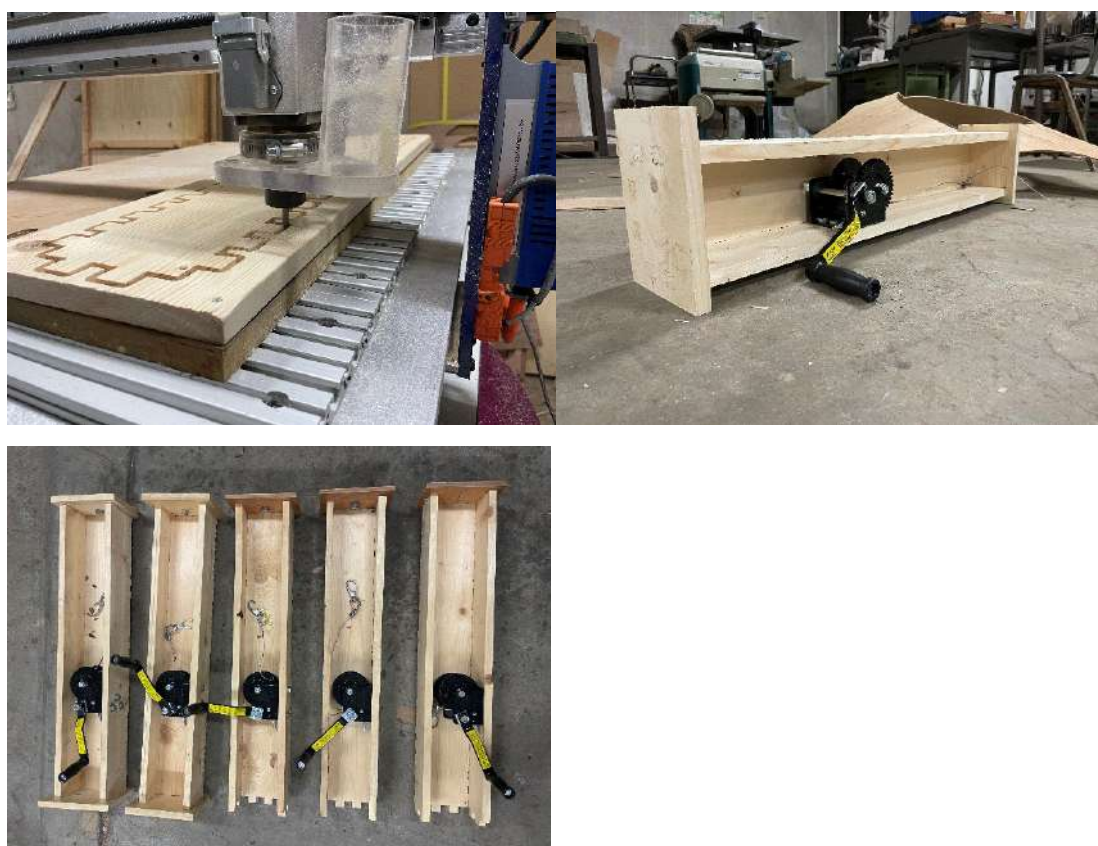


図 85 ワイヤー巻き取り機の制作

(5) 加工

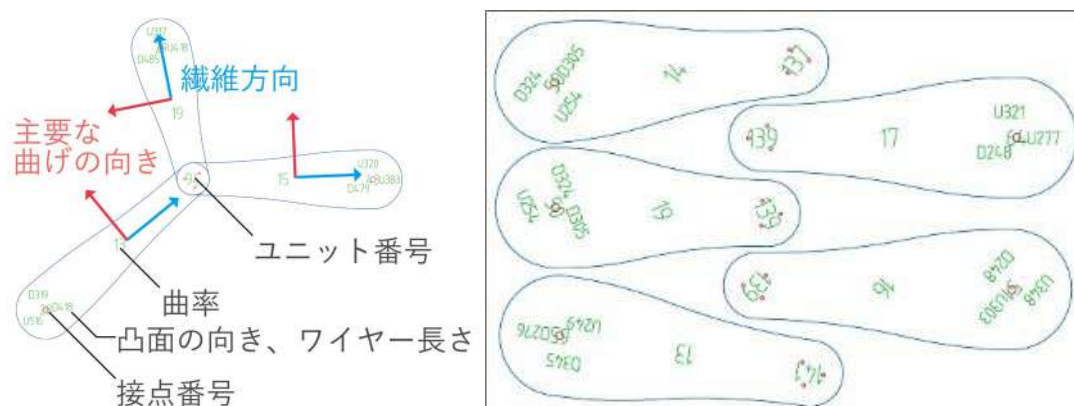


図 86 ワイヤー長さ、ユニット番号、接点番号の自動算出、加工データの自動生成

切削加工は形状によって道具を選ぶといった必要がなく、特別な専門技能を必要としないため、オフサイトで CNC 加工機で切削を行うのが有効であると考えた。

想定した形状からユニット形状、ワイヤー長さを自動算出し、加工データを自動生成するようなアルゴリズムを生成した (5. 4 (2) 参照)。すべての部材について、曲げる方向が合板の繊維と直交方向となるように加工データを制作することで、歩留まりに配慮するとともに、大きな曲率を実現できるように加工を行った。このようなパラメトリックな設計手法により、一枚一枚の部材がすべて異なる形状でも部材の加工コストに影響はでない。部材番号やワイヤー長さ、曲率を表す数値を CNC 加工機を用いて部材に転写することで、組み立て時の施工者が必要とする情報を伝達することを目指した。CNC 加工機の加工可能範囲 (935×635×140mm) に合わせて、910×1820 mm の合板を 600 mm×900 mm 程度に切断してから板の割り付けを行った。



図 87 加工した部材

(6) 組立準備

加工した部材の組立を行うために、接合部の金具を含む材料の調達を行った。調達した主な材料のリストを表 9 に示す。足長アイボルト (M10) およびアイナット (M10) は三又ユニット間の接合部に用いたものである。 $\phi 6\text{mm}$ ワイヤー用のワイヤースリーブは、3 本のワイヤーを束ねて、ワイヤー巻き取り機で張力を入れた後にこのスリーブを加締めて曲げを固定するために使用する金具である。リーズロックは、スリーブでまとめた 3 本のワイヤーをワイヤー巻き取り機のフックに留め付けるために用いる取り外し可能な金具である。 $\phi 2\text{mm}$ ワイヤー用のワイヤースリーブは、アイボルトおよびアイナットとワイヤーを留め付けるために用いる。M4 のボルトおよびナットは、パネル同士を剛接合して三又ユニットを形成する際に用いる。

表 9 調達した材料リスト

	URL	数量	価格 (¥)	合計 (¥)
ラワンベニヤ(4mm, 3×6板, 5枚入り)	https://www.monotaro.com/p/0587/0497/?displayId=5	9	7890	71010
足長アイボルト (M10)	https://www.monotaro.com/p/5325/9825/?t.q=%91%AB%92%B7%83A%83C%83%7B%83%8B%83g	284	379	107636
アイナット (M10)	https://www.monotaro.com/p/5590/2613/?t.q=%83A%83C%83i%83b%83g	284	189	53676
ワイヤースリーブ($\phi 6\text{mm}$ 用、100個入)	https://www.monotaro.com/p/4869/1868/	3	2990	8970
リーズロック($\phi 2\text{mm}$ 用、20個入)	https://www.monotaro.com/p/4869/1974/?t.q=%83%8F%83C%83%84%81%5B%83X%83g%83b%83p%81%5B	1	7590	7590
ワイヤースリーブ($\phi 2\text{mm}$ 用、30個入)	https://www.monotaro.com/p/0218/8645/?t.q=%83%8F%83C%83%84%81%5B%83X%83%8A%81%5B%83u	25	719	17975
ステンレスワイヤー($\phi 2\text{mm}$, 50m)	https://www.monotaro.com/p/1624/8478/?t.q=%83X%83e%83%93%83%8C%83X%83%8F%83C%83%84%81%5B	10	3857	38570
ボルト (M4×20mm、130個入)	https://www.monotaro.com/p/0551/7172/	7	468	3276
ナット (M4、50個入)	https://www.monotaro.com/p/0552/9176/?t.q=m4%20%83i%83b%83g	14	230	3220
合計				311923

現場での組立を行う前に、現場での作業を極力少なくするため、1 カ所のワイヤーに張力を導入するために必要な 6 個の三又ユニットごとに全体形状を分割し、事前に屋内で組み立てた (図 88)。

組み立ての手順としては、3 枚のパネルを 3 本のボルト (M4、ボルト長 20mm 程度) で

回転しないように留め付けて三又のユニットを形成し、三又のユニット間はリングの付いたボルトで固定する（締め付けと合板の摩擦により回転しない）（図 89）。スリーブ（ ϕ 2mm ワイヤー用）を通したワイヤー3本を1本ずつ3つのリングにかけ、それぞれのスリーブをワイヤースリーブ圧着工具で加締めることでワイヤーをリングに固定する。上に凸の曲面を作る場合はワイヤーを合板の下側のリングにかけ、下に凸の曲面を作る場合は上側のリングに掛ける。そのワイヤー3本のもう一方の端をさらに1つのスリーブ（ ϕ 6mm ワイヤー用）で束ねて巻き取り機に通し、ウィンチのフックにとめつける。3つのリースロックを3本のワイヤーそれぞれに通して輪を作り、その輪をウィンチのフックに引っ掛けることでワイヤーとウィンチが接続される。図 10 左のような状態になったら、巻き取り機のハンドルを回すことで三本のワイヤーに同時に張力をかける。それぞれのワイヤー長さ（リングから巻き取り機の先端部分までの距離）がパネルに表記されている数値になるまでワイヤーを巻き取った時点で三本のワイヤーを束ねたスリーブを加締める。最後にワイヤーをワイヤー巻き取り機から外せば合板の曲げが固定され、一連の巻き取り作業は完了する。

以上の工程を繰り返し、6 ユニット 1 セットの部材を 25 セット制作した。

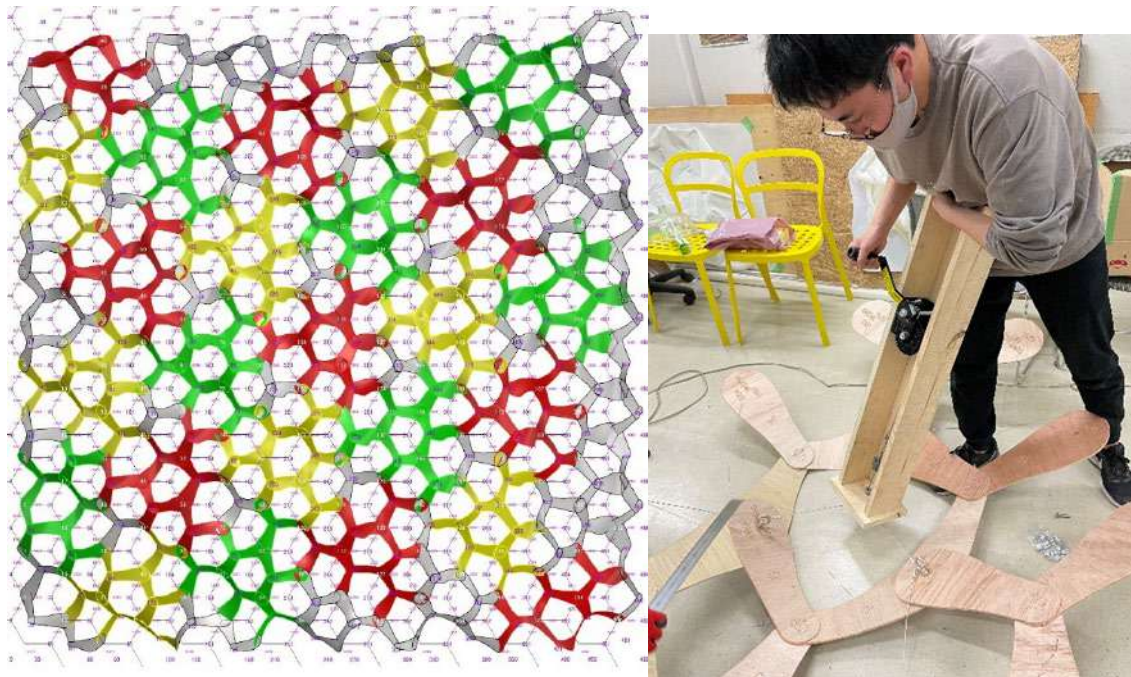


図 88 全体形状を 6 ユニットごとに分割（左）、ワイヤーの張力導入（右）



図 89 合板を曲げる手順

構造物の足元を地面に固定するための重りも制作した（図 90）。50kg 程度のコンクリートの塊を 12mm 厚ラワンベニヤで制作した木箱の中に格納したもので、木箱の部分に足元部分の三又ユニットを接合することで構造物の足元部分が固定される。4 カ所で設置する想定であったため、このコンクリートと木箱による重りを 4 つ制作した。



図 90 構造物の足元部分の制作

（7）屋外での組立

2021 年 11 月 23 日から 26 日に屋外で組立を行った。事前に屋内で組み立てた 6 ユニット 1 セットの部材 25 セットを現場に運び、俯瞰図をもとに各部材を所定の位置に配置した。すべての部材の配置が完了したのち、隣接する三又ユニット同士をボルトで接合していきながらワイヤー巻き取り機でワイヤーの張力を入れていった（図 91）。一カ所のワイヤー巻き取り作業につき、二人一組で行う必要があるということが分かった。一人がワイ

ヤー巻き取り機を持ち上げるとともにハンドルを回してワイヤーに張力を行い、もう一人がワイヤーをフックに固定する作業及びワイヤーに張力を入れた後にワイヤー3本を束ねるスリーブを加締めて曲げを固定する作業を行う。中央部付近の三又ユニットから先に曲げていき、徐々に周縁部へと向かっていくような施工順序とした。当初の想定では、ワイヤーの張力を入れていくと先に施工した中央部が持ち上がっていき、曲げの作業が進むにしたがって構造物が平面からドーム型へと近づいていくという見通しであった。



図 91 ユニット同士の接合部（左）、現場でワイヤーに張力を入れる作業（右）

しかしながら、ワイヤーを締めていっても中央部が自然に持ち上がるという想定とは異なり、本来であれば中央部が持ち上がるべき形状が平坦な状態のままであった。そのため、本来であれば重なるはずの周縁部のユニット間の接合部が合わないという問題がみられた。無理やり接合部を合わせようとするとう周縁部のユニットに負担がかかり、合板が割れてしまう箇所がみられた（図 92）。



図 92 補修を行った箇所

そこで、中央部の部材と地面との間にサポートをいれていくことで徐々に構造物全体を持ち上げていき、周縁部のユニットにかかる力を軽減するという手法をとった(図 93)。最初は高さの低いサポートを入れ、徐々にサポートの高さを高くし、元の低いサポートは周縁部に移動させるという工程を繰り返すことで、少しずつ全体形状をドーム型に近づけていった。このサポートを入れていく作業と同時進行で周縁部のワイヤーに張力を入れていき、周縁部のユニットに大きな負担をかけることなく曲げを導入していった。



図 93 中央部を高くするプロセス



図 94 サポートを入れる作業

サポートを徐々に高くしていく作業を繰り返し、最終的に約 2.5m のサポートを入れた状態の全体形状が図 95 である。設計時の想定では中央部の高さを 4m とする想定であったが、中央部のユニットにかかる応力および曲げに対する強度を考慮し、2.5m が限界であると判断した。また、組み立て時の現場の地面が湿っており、合板がその水分を含んだ結果、構造解析で用いた材料特性よりも強度が落ちていると考えたため、設計時の形状（スパン 7.5m、高さ 4m 程度）よりもスパン及び高さを抑えるよう計画を変更した（スパン 6m、2.5m 程度）。全体形状は中央のサポート高さに応じた曲面形状となった。



図 95 支保工付きの状態

高さ 2.5m のサポートを入れた後、事前に制作したコンクリートと木箱による足元の重りを構造物の四隅に配置し、4mm 合板と木箱を 1 カ所あたり 3-5 本の M8 ボルトで接合した。これにより構造物と地面が剛接合されたといえる。サポートを入れていく過程で割れてしまった箇所はすべて別のパネルを重ねて補修を行った。さらに、構造的に自立しやすくするために、4 隅のフットプリントをとがらせて、構造物の対角線部分が他の部分に比べて高くなるように形状を調整した。そして、最終的にサポートをすべて外して構造物を自立させた（図 96）。サポートを外しても大きな変形をすることなく構造的に安定した状態となった。最終的に自立した形状は、施工に関する要素（サポート高さ）と構造的要素（4 隅がとがった形状）から決定されている。図 98 からわかるように、曲率の大きな凹凸の曲面が少しずつずれながら繰り返されることで構造的な強度を担保し、大スパンを飛ばしているということがいえる。



図 96 構造物の外観



図 97 構造物の内観



図 98 上に凸と下に凸が繰り返される曲面形状

この構造物を自立させた状態で 1 日置いた後、3D レーザー測量機 (Leica 3D Disto) を用いてユニット間の接点の 3 次元座標を測定し、測定した接点のデータを基に合板とワイヤーの中心線を自動的にモデル化した (図 105 参照)。こうして得られた構造物の 3D データから制作した俯瞰図、および立面図を図 99、図 100、図 101 に示す。構造的な安定性を高めるために四隅をとがらせていることが俯瞰図からわかる。当初想定していたスパン 7.5m、高さ 4m よりも小さな形状とはなったが、上に凸と下に凸の曲面をずらしながら繰り返していく二次曲面形状およびそのような複雑な曲面形状を非熟練技能者がワイヤー巻き取り機を用いて制作する曲げ工法により、4mm 厚ベニヤという薄い素材でスパン 6m、高さ 2.3m 程度の構造物を制作することができた。ワイヤーは二次曲面形状を固定する要素となりつつ、構造的にも重要な役割を果たしている。このように、曲率の大きな二次曲面という自由度の高い形態を実現できたと同時に、形態・構造・構法が相互に結びついた構造物を実現することができたといえる。

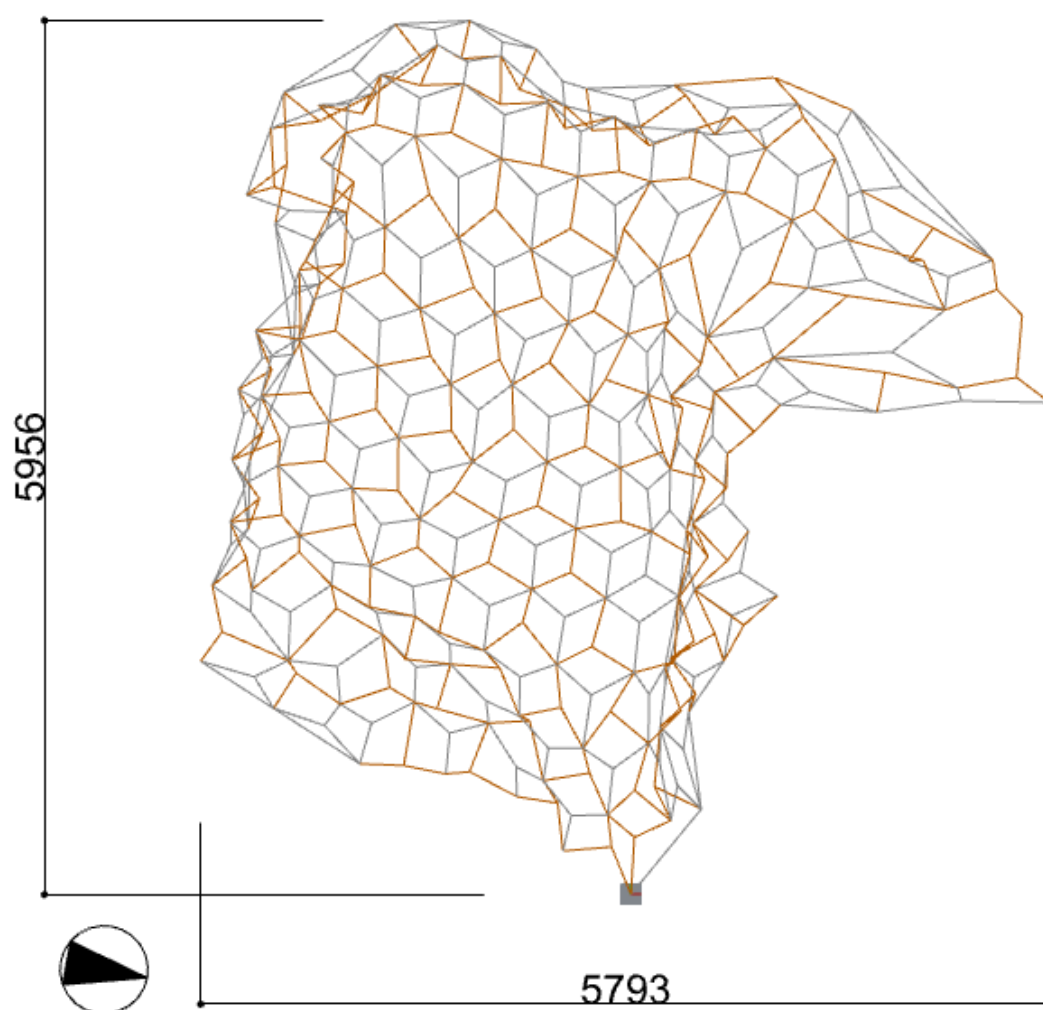


図 99 俯瞰図

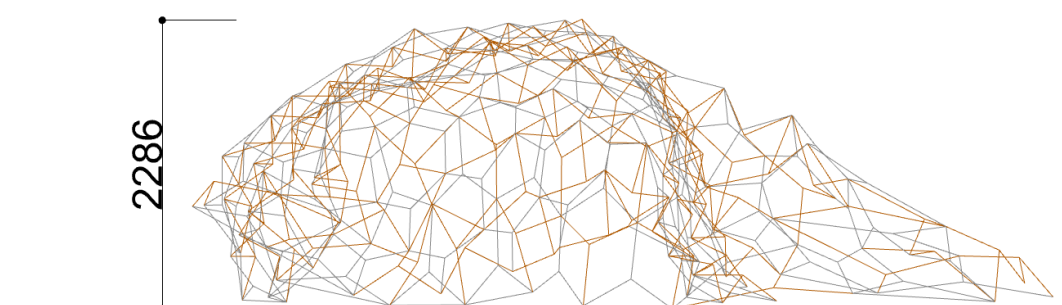


図 100 東側立面図

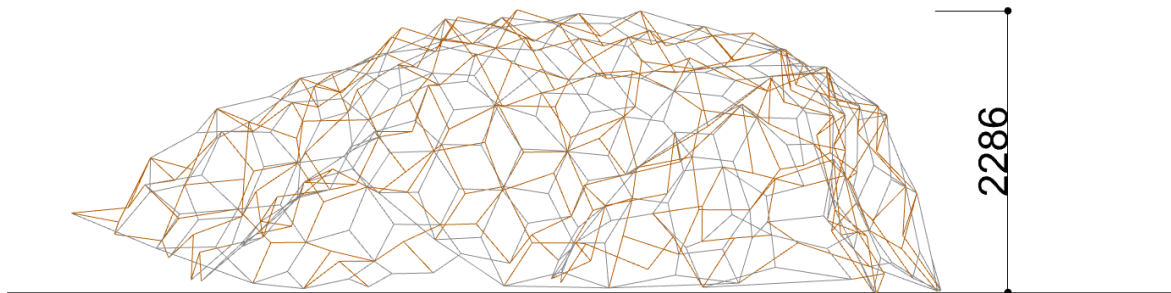


図 101 北側立面図

(8) 弾性曲げシミュレーションを活用した全体形状の修正

今回制作した構造物は合板の弾性曲げによる構造であるため、ワイヤーの張力を組立後に調整することで全体形状の調整が可能であると考えられる。非熟練技能者による組立を行えば当初想定した形状に比べて施工誤差が出てくるが、ワイヤーの張力と全体形状の関係が把握できれば、ワイヤーを引っ張ったり緩めたりすることで施工誤差の修正も行えるはずである。従来の工法であれば施工誤差の修正は熟練技能が必要な作業であるが、設計者がワイヤー長さの調整による変形を事前に予測し、その結果をもとに組立における施工誤差の修正を行うことができれば、熟練技能に頼らずに自由度の高い形状を制作可能な曲げ工法を実現できる可能性がある。

今回は物理演算シミュレーションソフトウェアの Kangaroo を用いてワイヤーの張力と全体形状の関係を推定し、施工後に一部のワイヤーを緩めた全体形状の変形と、弾性曲げシミュレーションの結果が一致するかを調べた。

まず、ワイヤーを緩める前と緩めた後の構造物の形状を把握するために、3D レーザー測量機 (Leica 3D Disto) で構造物のユニット同士の接点の点データを計測した。3D レーザー測量機を構造物の中央部に置き、手動で画面上に映し出される点を指定し、接点の3次元位置情報を取得した (図 102)。次に、図 103 で示す一部のワイヤーを緩め、張力がかからないようにした。このワイヤーの弛緩によって構造物の全体形状は変形する。この状態でもう一度接点の位置情報の計測を行った。ワイヤー弛緩前と弛緩後の取得した点データを重ね合わせて比較したのが図 104 である。



図 102 接点の位置情報の計測の様子

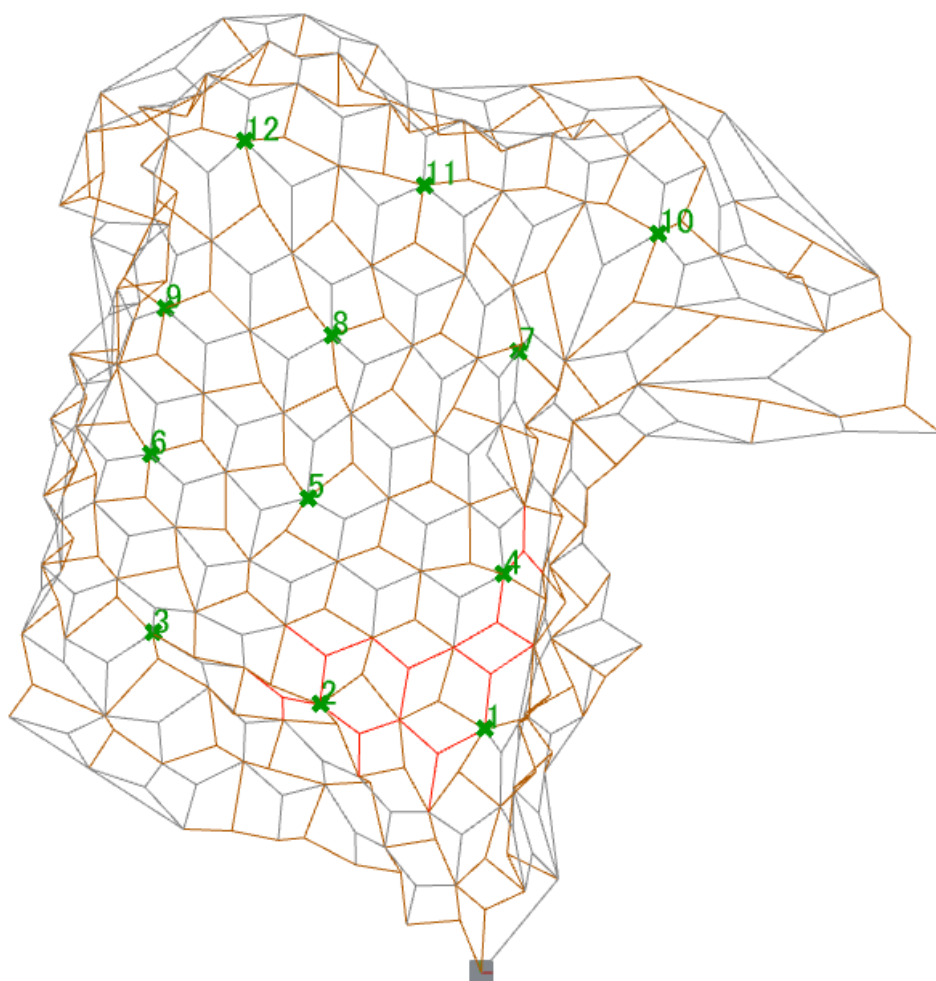


図 103 ワイヤーを弛緩する箇所（赤）と変位を測定する 12 カ所の点（緑）（茶：合板、灰：ワイヤー）

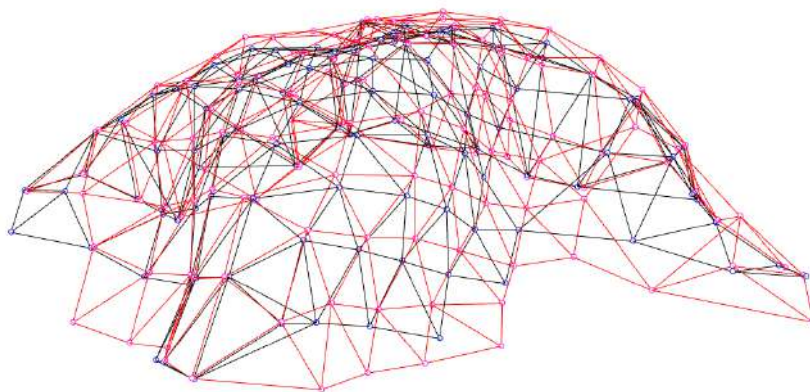


図 104 ワイヤー張力の弛緩による実際の変形（赤: ワイヤー弛緩前、黒: ワイヤー弛緩後）

次に、ワイヤーを緩める前の状態の接点の点データをもとに弾性曲げシミュレーションのモデル化を行った。モデル化の手順を図 105 に示した。取得した点データを 3 点ずつ選んで三角形の面を作り、制作した構造物に対応するようにワイヤーに該当する箇所と合板に該当する箇所に振り分ける。この面のデータからワイヤーと合板の中心線を自動的に算出するアルゴリズムを作成し、ワイヤーと合板を線材としてモデル化する。また、モデル化に必要な地面との接地点を測定した点データから抽出する。モデル化に必要な幾何学を定義した後、材料のパラメーターを設定する。このパラメーターは単位を持った値ではなく、相対的な数値である。今回のモデル化では合板の軸力剛性および曲げ剛性、合板の曲げに対する復元力、合板の荷重、ワイヤーの軸力剛性を設定した。このような幾何学とパラメーターの設定によりモデル化が完了し、弾性曲げシミュレーションを実行する。このワイヤー弛緩前のモデルの解析とともに、図に示す一部のワイヤーをデータ上で取り除いたモデルの解析を同様に行う。以上二つの解析の結果を比較したのが図 106 である。

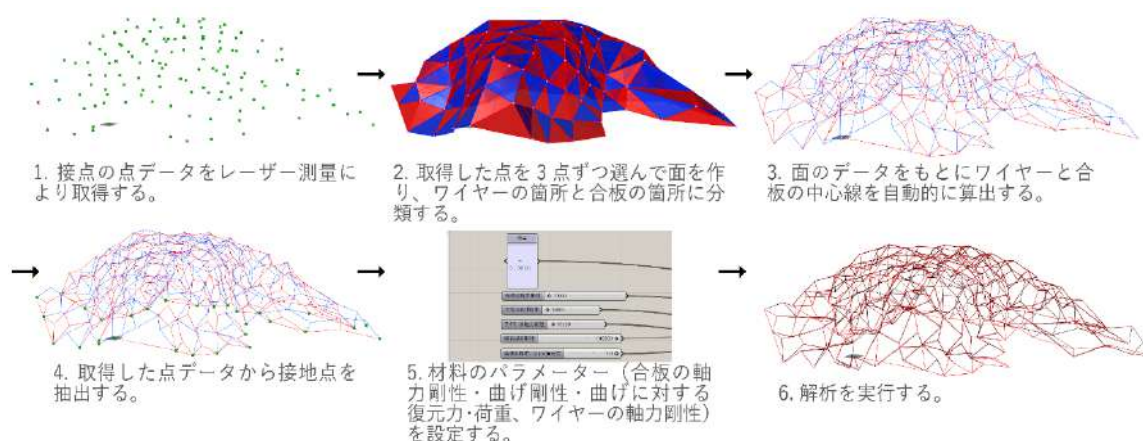


図 105 弾性曲げシミュレーションのモデル化の手順

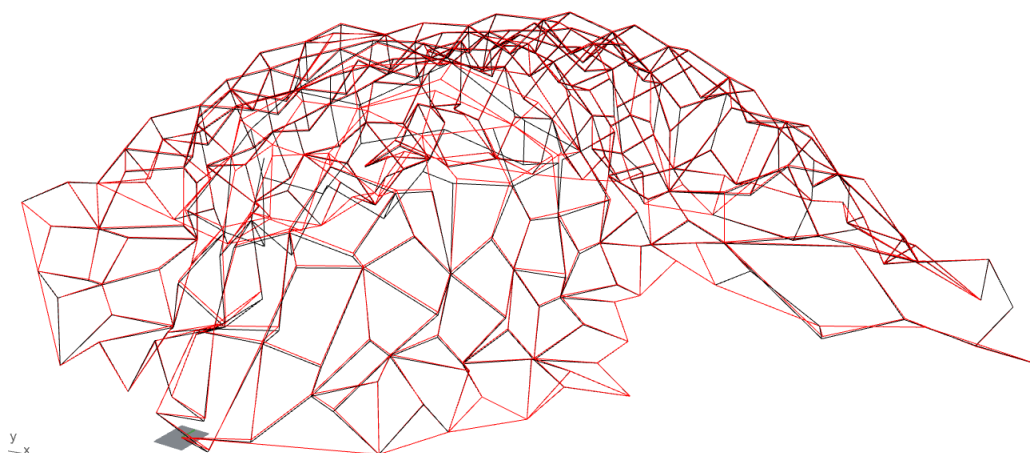


図 106 Kangaroo による弾性曲げシミュレーション（赤: ワイヤー弛緩前、黒: ワイヤー弛緩後）

ワイヤー弛緩による実際の変位と弾性曲げシミュレーションによる変位を比較するため、測定した接点のうち 12 カ所の測定点を抽出し（図 103）、抽出した測定点における x 座標の変位（ Δx [mm]）・y 座標の変位（ Δy [mm]）、z 座標の変位（ Δz [mm]）の値から変位量（ Δd [mm]） $= \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$ ）を計算し、実際の変位量に対するシミュレーションとの変位量の誤差を算出した（図 107）。

	点1	点2	点3	点4	点5	点6	点7	点8	点9	点10	点11	点12
実際の変位量（ Δd ）[mm]	144.70	74.84	84.35	209.05	150.01	85.97	319.06	161.96	144.04	138.72	128.52	67.10
弾性シミュレーションによる変位量（ $\Delta d'$ ）[mm]	372.29	224.80	12.23	262.03	18.07	29.60	8.95	12.67	5.02	4.99	48.37	19.09
実際の変位量に対する誤差（ $ \Delta d - \Delta d' / \Delta d$ ）	1.57	2.00	0.86	0.25	0.88	0.66	0.97	0.92	0.97	0.96	0.62	0.72

図 107 実際の変位と弾性変形シミュレーションの変位との比較（試行 1）

実際の変位量と弾性変形シミュレーションによる変位量を比較した結果、実際の変位量に対するシミュレーションとの誤差はどの点においても 0.2 以上となり、かなり大きな誤差が出てしまった。それぞれの点の変位量を個別的にみると、ワイヤーの弛緩を行った部分に含まれる点（点 1、点 2、点 4）のシミュレーションの変位量は、実際の変位量よりも大きな数値となり、それ以外の点では実際の変位量よりも小さな値となっているということがわかる。このことから、シミュレーション上でのワイヤーの弛緩が与える影響が実際よりも局所的なものとなっているといえる。この要因としては、合板の剛性に関するパラメーター（合板の曲げ剛性、合板の軸力剛性）が過大になっており、実際よりも合板の曲げの変形および圧縮力による変形が起きにくくなっていると推察される。そこで、合板の曲げ剛性および軸力剛性のパラメーターを 1/100 倍の値にして材の剛性を小さく見積もり、再び解析を行った。

	点1	点2	点3	点4	点5	点6	点7	点8	点9	点10	点11	点12
実際の変位量 (Δd) [mm]	144.70	74.84	84.35	209.05	150.01	85.97	319.06	161.96	144.04	138.72	128.52	67.10
弾性シミュレーションによる変位量 ($\Delta d'$) [mm]	397.23	322.55	44.43	234.58	30.06	110.37	186.93	127.94	54.81	88.56	180.36	193.95
実際の変位量に対する誤差 ($ \Delta d - \Delta d' / \Delta d$) [mm]	1.75	3.31	0.47	0.12	0.80	0.28	0.41	0.21	0.62	0.36	0.40	1.89

図 108 実際の変位と弾性変形シミュレーションの変位との比較 (試行 2)

今回の解析ではワイヤーの弛緩を行っていない部分 (点 3、点 5-11) において、実際の変位量とシミュレーションの変位量の誤差に改善がみられた。しかしながら、ワイヤーの弛緩を行った部分 (点 1、点 2) の誤差が 1 度目の解析よりも大きくなってしまった。これは合板の剛性を小さくした結果、ワイヤー弛緩部分において飛び移り座屈が生じ、実際の変形では起こらないような大きな変形がシミュレーション上で起こっていることに起因するものである。そのため、このような飛び移り座屈が生じないように接合部の剛性に関するパラメーターを 10 倍の値にして 3 度目の解析を行った。

	点1	点2	点3	点4	点5	点6	点7	点8	点9	点10	点11	点12
実際の変位量 (Δd) [mm]	144.70	74.84	84.35	209.05	150.01	85.97	319.06	161.96	144.04	138.72	128.52	67.10
弾性シミュレーションによる変位量 ($\Delta d'$) [mm]	176.59	169.69	72.42	483.13	154.73	111.98	225.21	88.08	68.26	67.68	240.4	134.75
実際の変位量に対する誤差 ($ \Delta d - \Delta d' / \Delta d$) [mm]	0.22	1.27	0.14	1.31	0.03	0.30	0.29	0.46	0.53	0.51	0.87	1.01

図 109 実際の変位と弾性変形シミュレーションの変位との比較 (試行 3)

今回のシミュレーションでは、試行 2 において飛び移り座屈による過大な変形がみられた点を含むワイヤー弛緩の部分付近の点 1-点 7 の大部分において誤差の改善がみられた。しかしながら、ワイヤー弛緩の部分から離れた点である点 8-点 12 に関しては誤差が大きくなったものも大きく見られた。また、点 4 のように試行 2 の時とは別の点で飛び移り座屈による過大な変形がみられた点もあった。

以上のように、今回用いた Kangaroo による弾性変形シミュレーションは材料のパラメーターが相対的なものにすぎないため、適切なパラメーターを設定する技能が必要になる。全体形状の変形を事前にシミュレーションで予測することで施工誤差を修正するためには、今回のような全体形状の調整を行う前に材料試験などによって適切な材料のパラメーターを決定できるかが重要になるだろう。

(9) 課題

パビリオンの設計・制作を通していくつかの課題がみられた。第一の課題として、加工の際に部材の方向と合板の繊維方向の関係を決める必要があり、すべての合板を最も曲がりやすくなるように繊維方向を決定したが、材料ごとにばらつきがあったため、強度以上の曲げがかかった合板は割れが生じてしまった。合板の繊維方向の向きと曲げの向きの関係を一様にするのではなく、合板の強度や合板にかかる応力によって繊維方向を変えるなど、素材に合わせた加工を行う技能が必要であるということが分かった。



図 110 合板の割れが生じた箇所

第二に、図 111 ようにワイヤーに張力をかけた部分で中央部を持ち上げた後にワイヤーが緩んでしまった部分があった。緩んだ箇所はワイヤーの張力が働いていないため、合板に過度な応力がかかってしまい、割れが生じやすくなってしまうと考えられる。このように緩んでしまった部分にあとからテンションをかけられるよう、ワイヤー長さを調整可能な機構を組み込む必要があった。想定ではワイヤーが多少緩んで合板の曲率が小さくなっても、ワイヤーの張力及び合板の弾性曲げが保持された状態で釣り合うと考えていたが、中央部の持ち上げにより合板の曲げが完全に元に戻ってしまうような大きな変形が起こったため、張力がかからなくなってしまった。そのため、ワイヤーが 3 本束ねるスリーブを調整可能な金具にするか、3 カ所のワイヤーとアイボルトの接合部のうち 1 カ所にターンバックルを留め付けることで張力を調整する必要があったと考えられる。ワイヤーが 3 本束ねるスリーブを調整可能にする場合は、今回採用した圧着ペンチで加締めるタイプのものではなく、サーキュラーズリーブのようなあとからワイヤー長さを調整可能な金具を用いることで解決できると考えられる。



図 111 ワイヤーが緩んだ箇所

第三に、図 112 のように、ワイヤーにテンションをかける作業とユニット同士を接合していく作業を同時並行で行ったが、端部に近づくほどユニット同士の接合部が合わないという問題があった。また、すべてのユニットが接地した状態で施工を行っていたが、ワイヤーにテンションをかけた状態で中心部を持ち上げると端部のユニットに負担がかかり、合板の割れが生じてしまった。そのため、中心部を徐々に持ち上げながらワイヤーにテンションをかけていくことで、端部の接合部があわないという問題、中心部の持ち上げ時に割れが生じるという問題を解決できる可能性があると考えられる。

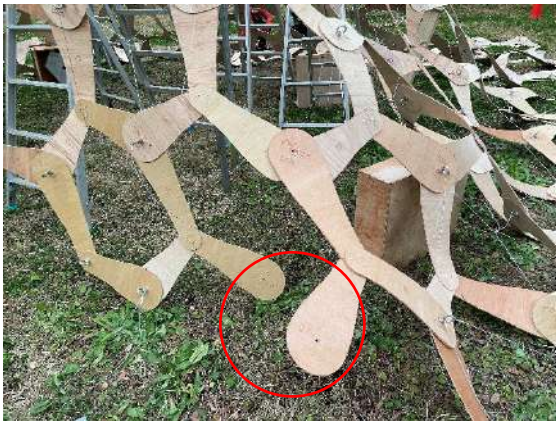


図 112 接合部が合わない箇所

第四に、設計形状の再現度に関しては、支保工なしで構造物を持ち上げられる高さに限界があった（2.5m 程度）という問題および合板が地面の湿気で強度が落ちてしまったという問題があったため、想定した形状にはならなかった。構造的な検討だけではなく、構造と施工方法を同時に考えながら形態を決定するプロセスが必要であったと考えられる。また、現場での木材の性質の変化を想定して構造的な検討を行う必要があったといえる。

5.5 小結

本章では、4 章で明らかになった 3 つの課題に対する解決策を構造物の制作によって提示した。

第一に、複雑曲面の曲げ加工には「道具を選ぶ技能」が必要であり、自動化によって熟練技能を補完することが難しいという課題があった。本開発では合板の弾性曲げとワイヤーによる曲げ工法およびワイヤー巻取り機の制作によって、非熟練技能者でも現場で柔軟に曲げを行い、曲率の大きな二次曲面という自由度の高い形状を実現することができた。

第二に、「既製品を改造」による「道具の拡張」を行う場合は莫大な道具の開発コストが課題となっていた。本開発ではそのような開発コストが高くなる「既製品を改造」ではなく、「既存の道具と新しい設計技術の組み合わせ」、「既存の道具の組み合わせ」、「型・治具の制作」といった開発コストが比較的低いと考えられる「道具の拡張」を実践した。

結果としては、現場での組立の道具に関して「型・治具の制作」を行う手法を用いれば、低コストおよび低い技能のハードルで道具を制作できるということがわかった。

第三に、設計から制作への一方的なプロセスにより技能の問題が解決できていないという問題があった。本開発では、「道具の拡張」と「形態・素材へのフィードバック」を繰り返すアジャイル型のプロセスをとることで、制作物と制作手法が徐々にかみ合っていき、曲率の大きい二次曲面を低コスト・非熟練技能で制作するという目的を達成することができた。このようなアジャイル型のプロセスにより、初期案では一次曲面・曲率小という自由度の低い形状から最終的には二次曲面・曲率大の自由度の高い形状へと発展させることができた。

このアジャイル型の設計プロセスをとることで、自由度の高い形状を実現できただけでなく、構法（ワイヤー＋ワイヤー巻き取り機）、構造（合板の弾性曲げとワイヤーの引張による張弦梁のような構造）、形態（上に凸と下に凸の曲面が少しずつずれながら繰り返される曲率の大きな二次曲面形状）が相互に結びついた構造物を制作することができた。これは設計（形態・素材）と制作（道具）を切り離して考えるのではなく、形態・素材・道具を同時に思考しながらこれら三者の最適な組み合わせを検討した結果であるといえる。

その一方で、組立における熟練技能を補完するために、設計者による弾性曲げシミュレーションを用いた施工誤差の調整を試行したが、材料特性のパラメーターの適切な設定において技能が必要であるという課題がみられた。アジャイル型プロセスの実践では、形状の精度による道具の制作への影響や接合部の設計といった、今回の形態・素材・道具のモデルでは考慮しきれない重要な要素もみられた。また、素材の性質のばらつきや部材にかかる応力、曲げの曲率を考慮しながら道具を調整して加工を行う技能が必要であったという課題も明らかになった。

6 章 考察

6.1 モデル化できなかった要素

(1) 精度の問題

本研究では、形態・素材・道具を主要要素としてプロセスをモデル化し、分析・開発を行ったが、この三つの要素ではとらえられない要素も見られた（図 72 参照）。

そのうちのひとつとして、精度の問題が挙げられる。例えばワイヤー＋FEM 解析のモックアップやダボ＋カーフリングのモックアップで見られたように、大きな曲率を実現できていても精度が悪く採用することが難しいという場合があった。形態の自由度だけではなく、自由度と精度を両立するような道具を制作することが重要であると考えられる。

また、4 章で調査した Dongdaemun Design Plaza (ZHA, 2011)においても、精度がかなり道具の開発において大きな要素となっていた。ZHA はパネル間の 25mm の隙間の許容差を 2mm 以下にするというかなり厳しい要求を行った結果、すべてのパネルを一方向曲げに合理化することができず、精度の高い二方向曲げパネルを短工期、低コストで生産するために MPSF Machine の開発が必要となった¹⁴⁴。高い精度を達成させようとする道具の開発コストは高くなると予想されるが、この開発コストと制作物の精度、そして制作物の自由度のバランスを考えながら道具の制作を行っていくことが重要であると考えられる。

(2) 接合部の設計

組立の際に必要な技能に関して重要であると考えられるのが接合部の設計である。今回三又のユニット同士をとめる接合部として採用したのは、一本のボルトによるピン接合でありながら、曲がった板同士のかみ合わせ及び摩擦により、ピン接合と剛接合の間になるようなものであった。

開発の初期案においては、非熟練技能者でも現場での組み立てが容易にできるように、実継ぎを用いたよりフレキシブルな接合部を想定していた。このようなフレキシブルな接合部の事例としては、60mm 角の木製キューブの角を小さなヒートンで結合した*i-cube* (横河健 + 佐藤淳 + 日大横河研究室, 2003)がある¹⁴⁵。この接合部はここでは Fuzzy Node と呼ばれており、複雑な幾何学を構成するための手法としてとらえられているが、部材同士を正確に合わせなくてもいいという特徴は組み立てにおける技能の問題の解決にもつながると考えられる。

¹⁴⁴Lee, Ghang, and Seonwoo Kim., *op. cit.*, pp.1322-1330.

¹⁴⁵ “横河健+佐藤淳による膜構造プロジェクト「*i-cube*」展”, japan-architects ブログ (<http://world-architects.blogspot.com/2013/04/i-cube.html> 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)

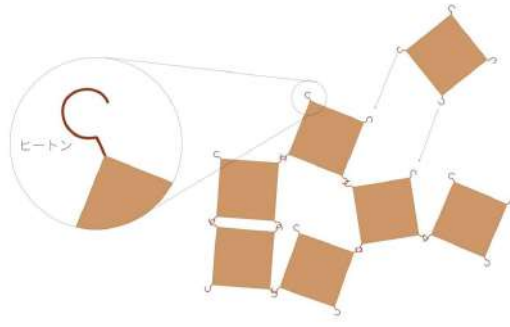


図 113 フレキシブルな接合部の例 (j-cube, 横河健 + 佐藤淳 + 日大横河研究室, 2003)¹⁴⁶

その一方で、建築スケールで実現している複雑形状の事例では、接合部を CNC 加工するなどして接合部の個別性に対応しているものが多い。例えば、Nordpark Railway Stations (ZHA, 2007)のエンジニアリングを担当した Klaus Bollinger は一枚一枚曲率が異なる二次曲面ガラスパネルの鉄骨躯体との接合部について次のように述べている。

ガラスとスチールの接合部の設計には大きな労力が費やされた。構造用のリブは周囲が自由に形成された 2 次元の要素として考えられていたが、ガラスの固定はスキンの二次曲面に沿う必要があった。この問題には、当初は量産の論理で取り組んだ。接合部が平らなブラケットも提案されましたが、これは実現不可能なものであった。このようなジョイントは、誤差を吸収するには非常に有効であるが、ここでは、すべてのジョイントを三次元座標と二次曲面の接線方向の位置に調整する必要があったのである。18,000 個の同じようなブラケットの利点が、現場では時間のかかる大惨事になってしまうのだ。そこで最終的には、ガラスパネルを直線的に支持するシンプルなポリエチレン製の連続したプロファイルで解決しました。このプロファイルは、スチール製のリブにスロットとボルトで固定されている。

上面はガラススキンの二次曲面に沿っているため、すべてのプロファイルを個別にフライス加工する必要があった。連続したデジタルチェーンと 5 軸ミルを使用することで、シート素材からプロファイルを切り出し、コストを最小限に抑えることができた¹⁴⁷。

¹⁴⁶ 河村京介, “Fuzzy Nodeで接合される小片集積体の機構解析における行列表現,” 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2017

¹⁴⁷ Bollinger, Klaus, Manfred Grohmann, and Oliver Tessmann. "Structured becoming: evolutionary processes in design engineering." *Architectural Design* 80.4, 2010., pp.34-39

このように、複雑曲面パネルを躯体部分に取り付ける場合、どんな取り付け角度にも対応できるようにフレキシブルな接合部か、一枚一枚異なる取り付け角度に対応した固有の接合部を用いるかという選択がある。この接合部の違いによって施工性は大きく変わってくることがわかる。ここではどの曲面にも対応できるフレキシブルなジョイントを用いるのではなく、CNC 加工によってガラスの二次曲面に合わせて切り出された一つ一つ異なるポリエチレンの緩衝材によって現場の組立に配慮している（図 116）。デジタル・ファブリケーションを用いて施工情報を部材に付与することで、どんな施工者でも混乱することなく組立を行えるようにする手法としてみなすこともできるだろう。



図 114 Nordpark Railway Stations (ZHA, 2007)^{148 149}



図 115 CNC 切削された緩衝材^{150 151}

¹⁴⁸ “Nordpark Railway Stations”, Zaha Hadid Architects (<https://www.zaha-hadid.com/architecture/nordpark-railway-stations/> 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)

¹⁴⁹ “Hungerburg Funicular Stations”, design-to-production (<https://www.designtoproduction.com/> 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)

¹⁵⁰ Bollinger, Klaus, Manfred Grohmann, and Oliver Tessmann., *op. cit.*, p. 38

¹⁵¹ “Hungerburg Funicular Stations”, design-to-production (<https://www.designtoproduction.com/> 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)

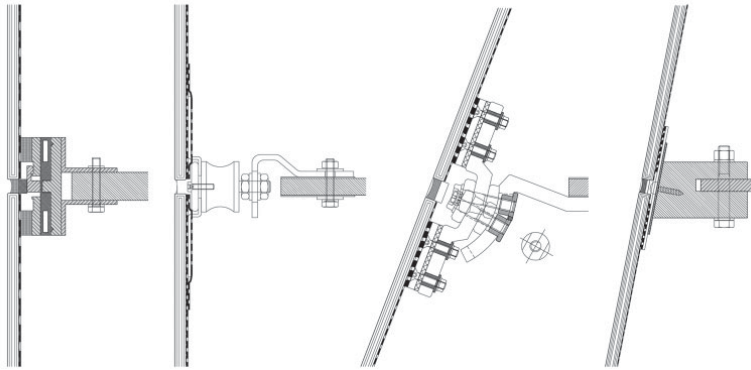


図 116 ガラスパネルと躯体の接合部の変遷（右図）¹⁵²

また、このような個別的な接合部を採用している他の事例として、ところざわサクラタウン（KKAA、2020）がある。ここでは、1枚1枚取り付け角度が異なるエキスパンドパネルの接合部を個別的に設計・制作し、複雑性に対応している。最終的な接合部の種類は100種類以上に及んだ¹⁵³。フレキシブルな接合部と個別的な接合部の比較に関して、ところざわサクラタウンの接合部の設計を担当した Syntegrate の石原は「金物がアジャスト可能な金物で、調整しながら取り付けていくと、自由度がありすぎてかえって現場が混乱する¹⁵⁴」と指摘しており、Nordpark Railway Stations と同様に現場の混乱を防ぐための手法として個別的な接合部を採用しているといえる。

それに対し、まれびとの家（VUILD, 2019）の設計者である秋吉は、まれびとの家の組立における CNC 加工された接合部を持つ部材の課題について次のように述べている。

仮組の際には我々素人では想定通りに組めず、歪みが発生したものの、施工時には大工の手によって、ピシッと歪みなく「通り」が出た状態で竣工した。想定通り部品をデジタルプロセスで加工できても、設計通りに組むためには、やはり大工の職能に頼らざるを得ない。実際の施工工程では、データのミスによって部材が噛み合わなかった箇所も、現場で大工が部材に2次加工を行うことで修正を行った。本来ならば、また工場に戻ってデジタル加工する必要があったが、現場で変更を加えられる機動力の高さは、現時点で大工の圧勝である。実際のところ、冒頭で述べた AI 全盛時代はまだ先の話であり、デジタル加工機が得意とする領域と、大工が得意とする領域を適材適所組み合わせていく必要がある¹⁵⁵。

¹⁵² Bollinger, Klaus, Manfred Grohmann, and Oliver Tessmann., *op. cit.*, p. 38

¹⁵³ 建築画報 vol. 56、2020 年 12 月号、2020、p.138

¹⁵⁴ 建築画報 vol. 56、2020 年 12 月号、2020、p.138

¹⁵⁵ 秋吉浩気, “デジタル時代のクラフツマンシップとは”, 建築討論



図 117 まれびとの家（VUILD、2019）の施工¹⁵⁶

まれびとの家では木材同士の接合部を CNC 加工によって制作したが、正確に加工した部材でも、現場で組み立てるには職人の熟練技能が必要であるということがわかる。K. Bollinger が指摘しているように、固有の接合部とした方が現場での混乱が少ない¹⁵⁷が、その一方で秋吉が指摘しているように接合部が決まりすぎていると非熟練技能者が正確に合わせるのが難しいということがいえる。

一方で、今回開発した構造物は、ユニット同士をボルト 1 本ずつでとめ、そこからワイヤーで張力を入れることで合板が曲がると同時にユニット同士の位置関係が自動的に固定される。そのため、施工者は部材同士を正確に合わせることに苦勞することもなく、ワイヤー長さの指示さえ守ればよいと、現場での混乱が生まれることも少ないと考えられる。結果として、今回開発した構造物の接合部は施工性を考えると望ましい手法であったといえる。

しかしながら、実際の施工では中央部のワイヤーを先に締めてしまうと周縁部のユニットの接合部が合わなくなってしまった（図 112）。そのため、中央部を持ち上げながら最初にユニット同士をボルトで留めていき、すべてのボルトをはめた後にワイヤーを締めていくという施工順序とすることで、正確に合わせるという熟練技能を要しないと同時に現場での混乱も生むことのない接合部のあり方が可能になると考えられる。

6.2 ワイヤー巻き取り機の課題

本研究で開発したワイヤー巻き取り機の課題として、一回のワイヤー巻き取りに同時に

(<https://medium.com/kenchikutouron/%E3%83%87%E3%82%B8%E3%82%BF%E3%83%AB%E6%99%82%E4%BB%A3%E3%81%AE%E3%82%AF%E3%83%A9%E3%83%95%E3%83%84%E3%83%9E%E3%83%B3%E3%82%B7%E3%83%83%E3%83%97%E3%81%A8%E3%81%AF-8e606c67437c> 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)

¹⁵⁶ 秋吉浩気, “デジタル時代のクラフツマンシップとは”, 建築討論

¹⁵⁷ Bollinger, Klaus, Manfred Grohmann, and Oliver Tessmann., *op. cit.*, pp.34-39

操作者が二人必要であるという点がある。一人がワイヤー巻き取り機のハンドルを回しつつ巻き取り機本体を支える役割で、もう一人がリーズロック（ワイヤーの先端を留める器具）をワイヤーに付けたリワイヤーを加締めたりする役割である。一回の巻取りで二人以上を必要とするため、施工性が悪く、ワイヤーを巻き取り作業に想定以上の時間がかかってしまった。



図 118 二人一組によるワイヤー巻き取り機の使用

歴史的にみても、道具は二人がかりで使うものは廃れ、一人で扱えるものへと進化していった。例えば、鋸は 15 世紀初頭に大鋸と呼ばれる二人の操作者を必要とするものが登場したが、その後羅や前挽鋸といった一人挽きの鋸が登場したことで大鋸は次第に消えていったと推測されている¹⁵⁸。

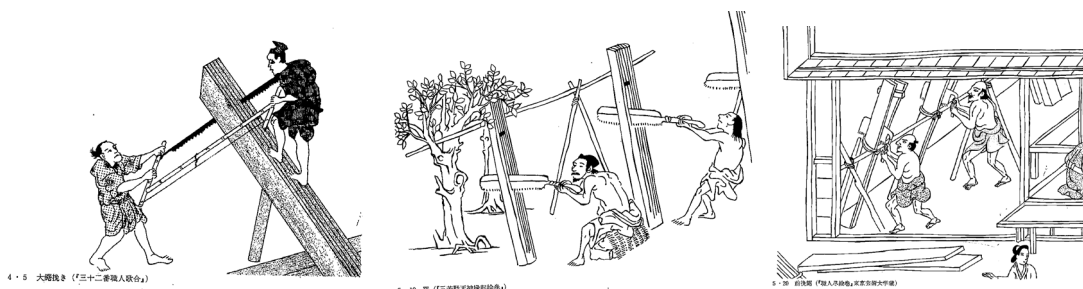


図 119 大鋸（左）、羅（中）、前挽鋸（右）¹⁵⁹

今回開発したワイヤー巻き取り機も、一人で扱えることが望ましいと考えられる。例えば図 120 のように肩にかけられるようにしてハンドルを回す動作、リーズロックをつける動作、ワイヤーを加締める動作を一人で行えるようにする解決策が考えられる。また、地面に接地できるような治具をつけ足すことで、ワイヤー巻き取り機を支える動作を不要に

¹⁵⁸ 日野永一、前掲書、pp.96-97

¹⁵⁹ 日野永一、前掲書、p.70, p.97, p.98

することができると考えられる。

以上のようなワイヤー巻き取り機の改良を行うことで、より効率的で汎用性の高い道具となり、今回の設計・制作だけにとどまらず、普遍的な道具としての価値を獲得することができるだろう。

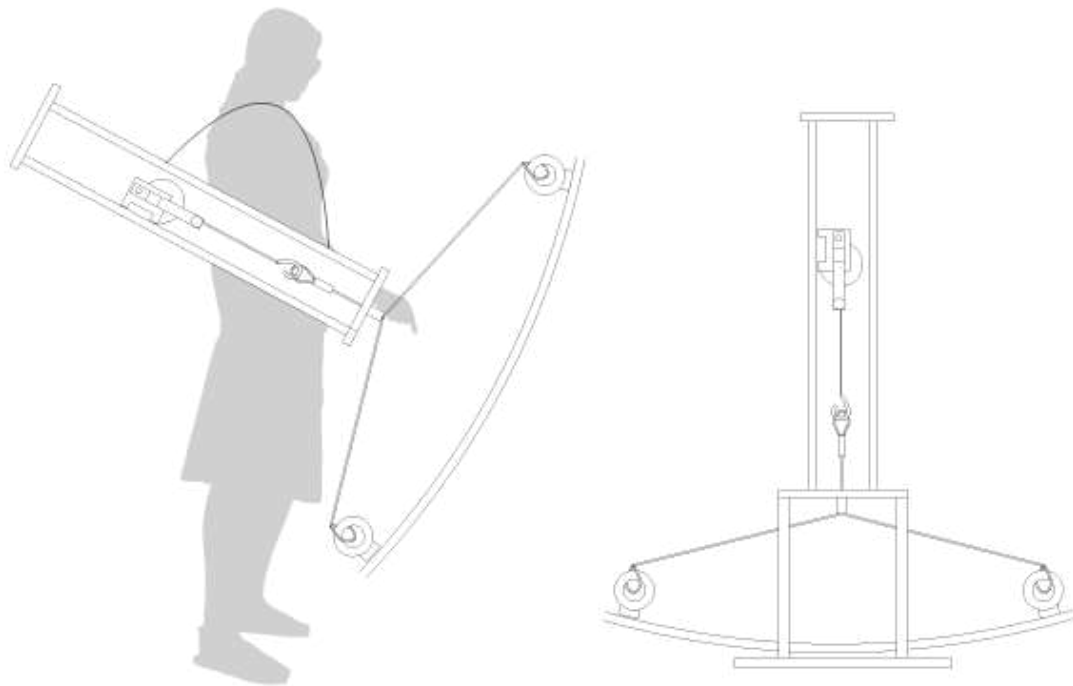


図 120 肩掛け式 (左)、接地式 (右)

6.3 建築スケールの構造物への拡張可能性

今回開発した形状、構法、構造を用いてより大きなスケールの構造物に適用することも可能である。例えば構造物の大きさを 2 倍にするためには、スケール効果を考慮すれば、材の厚みを 3-4 倍にする必要がある。本研究においてはラワン合板 4mm を用いたため、ラワン合板 12mm を用いることが必要となる。また、ワイヤーの張力は 3-4 倍にする必要があり、現状の手動のワイヤー巻き取り機ではそのような大きな張力をかけることは難しいと考えられる。そのため、図 121 のような電動のワイヤー巻き取り機を用いるとともに、治具をより強度の高い素材（金属など）で制作することで、より大きな張力がかかる構造物にも対応することができるだろう。



図 121 電動のワイヤー巻き取り機の試作

今回の開発において用いた CNC 加工機は Shopbot Desktop MAX (加工可能範囲: $935 \times 635 \times 140\text{mm}$) で、ユニットの大きさはこの加工可能範囲に合わせた大きさとなっている。より大きな部材を切り出すためには、より大型の CNC 加工機を用いる必要がある。Shopbot PRS alpha (加工可能範囲: $2440 \times 1220 \times 150\text{mm}$) を用いれば、同じ歩留まりで二倍の大きさのユニットを切り出すことができると考えられる。

以上のように、部材の寸法、道具の機構、道具の素材、道具のスケールを工夫すれば、今回開発した構造物を建築スケールへと拡張していくことが可能になると考えられる。



图 122 Shopbot Dektop MAX (左), Shopbot PRS alpha (右) 160

6.4 素材のばらつきに対応する技能

歩留まりを優先した結果、素材のばらつきや曲率の違い、部材にかかる応力を考慮せず、曲げの方向と合板の繊維方向を一定にしてしまったことが、組み立ての際に割れが生じた原因であると考えられる（図 110 参照）。例えば強度が他のものよりも弱いと考えられる部材や、大きな応力がかかる部材に関してはあえて曲がりにくい向きに繊維方向を変えることで強度を確保するような工夫が必要だったと推定される。

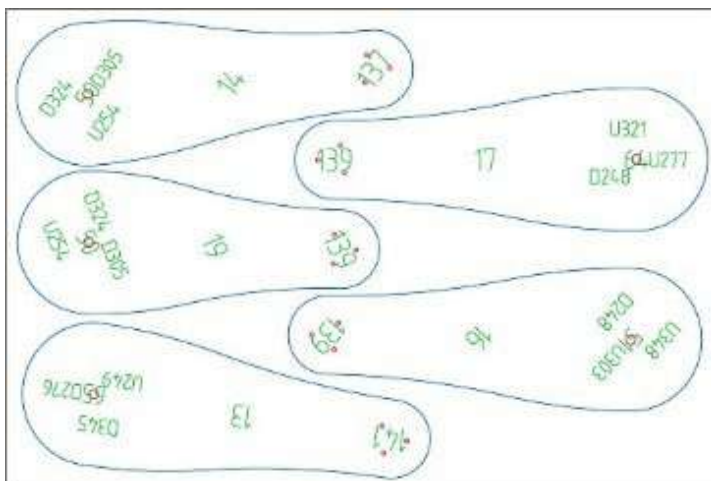


図 123 加工データ（曲げの方向と合板の繊維方向は部材によらず一定）

¹⁶⁰ “Laarge computer-controlled router often used to cut precise parts out of wood, plastic, and lightweight metal sheets. LOcated at TheShop.build in San Jose, CA“, Wikimedia Commons

(https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ShopBot_PRS_Alpha_CNC_Router.jpg 閲覧
日: 2022 年 1 月 15 日)

ここで重要になってくるのは機械に合わせて加工するか、素材に合わせて加工するかという点である。村松は素材と機械の関係について次のように指摘している。

しかし、機械による生産（加工）は、道具のそのように材料に素直に対応するものではなく、材料そのものを機械に対応させるという一面を持つ。しかも機械加工が高効率化し、精密化し、大量生産化するに応じて、それに供給される材料は、ますますチェックされ、均質化される。これは機械による生産の発展原則であり、大きな特徴として指摘できるところであろう。材料の変化に従属して道具を換えるという方法と根本的に違う¹⁶¹。

今回の開発では CNC 加工機を村松が言うところの「機械」的に、効率性を重視した使い方をしていたため、より「道具」的に素材に合わせた加工をすることが必要であったと考えられる。熟練の大工に必要とされるような素材に合わせて加工を行う技能が、デジタル・ファブ리케이션においても重要であるということがいえるだろう。

このような素材に合わせてデジタル・ファブ리케이션の道具を使いこなしていくあり方について、竹中らは次のように述べている。

素材の特性を生かしながら、カタチの美しさを探求し、周囲の変化に適応したパラメータの組み合わせを発見する。情報の道具（コンピュータ）と物質の道具（ロボット）をインタラクティブに繋ぎ、相互の技を組み合わせることのできる豊かな経験と技が織りなす妙技こそデジタルファブ리케이션の本質なのである¹⁶²。

これまでは熟練した職人が担ってきた素材に合わせて道具を使いこなす技能を、いかにパラメトリック・デザインなどの情報の道具で担保できるかという点が重要であるといえる。具体的には、合板の強度やかかる応力、曲げたい曲率をパラメーターとして、合板の繊維方向と曲げの方向の関係を自動的に決定するアルゴリズム（情報の道具）を構築し、CNC加工機（物質の道具）と組み合わせるような手法が考えられる。このような「道具を素材に合わせるためのアルゴリズム」を設計者が構築することで、既存の CNC 加工機を「拡張」することができるだろう。

¹⁶¹ 村松貞二郎、前掲書、1973、p.727

¹⁶² 竹中司、岡部文「ロボットはコンピュータの夢をかたちにするか？ 3」、GA JAPAN 130号、2014、p.181

7 章 結論・今後の課題

本研究では、設計者が道具の制作を通じて生産に接続し、制作物と制作手法を同時に思考しながら自由度の高い建築生産を実現するために、建築生産に適用可能な道具の制作手法および道具の制作を含んだ設計・制作プロセスのありかたを提示した。

3 章では、過去のデジタル・ファブリケーション事例における道具を「制作物のスケール」「道具の汎用性」「道具に必要な技能」といった観点から分析し、これらの観点から望ましいと考えられる道具の制作手法を提示することができた。特に、制作物の自由度を実現しながら汎用性・開発コスト・必要な技能を考慮した道具の制作手法である「道具の拡張」の可能性を提示することができた。

4 章では「道具の拡張」を行える可能性が高い曲げの道具に絞り、「道具の拡張」を行っている過去の事例を詳細に分析し、現状での課題を明らかにした。本章では「既製品を改造」による「道具の拡張」を行っている 4 事例を調査した結果、加工における技能の課題、道具の開発コストの課題、設計・制作プロセスの課題という 3 つの課題があるということが明らかになった。設計・制作プロセスの課題に関しては、従来の設計から制作への一方的なプロセスではなく、「道具の拡張」と「形態・素材へのフィードバック」を繰り返すことで、低コスト・低い技能のハードルによる道具の制作を行いながら自由度の高い制作物の実現を目指すアジャイル型の設計・制作プロセスを新たに提案した。

5 章では、4 章でみられた 3 つの課題に対する解決策を、複雑曲面構造物の設計・制作を通じて提示した。まず、合板の弾性曲げとワイヤーによる現場で柔軟に曲げる工法とワイヤー巻き取り機を組み合わせ、非熟練技能者でも複雑曲面を制作できる手法を実践した。さらに、莫大な開発コストを要する「既製品を改造」による「道具の拡張」ではなく、「既存の道具と新しい設計技術の組み合わせ」、「既存の道具の組み合わせ」、「型・治具の制作」といった手法を実践することで、低コスト及び低い技能のハードルで道具の制作を行うことができた。本開発では既製品のウィンチに CNC 加工による治具を組み合わせ「道具の拡張」を最終的に行ったが、このような現場での組立の道具に関して「型・治具の制作」を行うことが有効である問うことがわかった。さらに、4 章で提示した「道具の拡張」と「形態・素材へのフィードバック」を繰り返すアジャイル型の設計・制作プロセスを実践した。このプロセスをとることで、低コストおよび低い技能のハードルで道具を制作していきながら徐々に制作物の自由度を高めていけるということが確認できた。最終的には非熟練技能で曲率の大きな二次曲面という自由度の高い形状の構造物を制作することができた。また、道具を制作しながら制作物と制作手法を同時に考えていくことで、制作物と制作手法が徐々に組み合っていき、形態・構法・構造が深く結びついた構造物を制作することができた。

今後の展望としては、構造物の設計・制作を通して明らかになった「道具の拡張」を行う上での新たな技能の課題に対する解決策を提示することが期待される。弾性曲げシミュレーションを用いた施工誤差を調整する技能の補完に関しては、適切な材料のパラメータの発見を行う技能が必要になるという課題が残った。また、熟練した職人に必要とされ

てきたような素材のばらつきに対応して加工を行う技能はデジタル・ファブリケーションにおいても必要となるということがわかった。

さらに、今回は特に曲げの道具に焦点を絞って詳細分析および開発を行ったが、デジタル・ファブリケーションにおいて最近増加しつつある押出をはじめとするその他の道具についても検証を行うことが必要であると考えられる。曲げやキャストのような「道具の拡張」を適用しやすいと考えられる道具以外でも、今回実践したような設計と制作を行き来するアジャイル型のプロセスが有効であるかを検討することが期待される。

本研究においては、建築生産の主体を大きく設計と制作に分け、両者がどのような相互関係にあり、どのようなプロセスを経るかを検証・実験した。実際の建築生産においては、設計の中でも意匠設計と構造設計に分けられ、制作側もゼネコンや加工メーカーというように細分化されていくことになる。本研究において提案した設計・制作プロセスの建築生産への適用可能性を高めるため、より細分化された建築生産のプレイヤー（意匠設計、構造設計、ゼネコン、メーカーなど）にあてはめ、プロセスを想定することが必要であると考えられる。

また、本研究においては制作物の要素として道具・形態・素材を収集し、それらの決定プロセスを論じたが、開発を通じてこれらの要素以外にも精度や接合部の設計など、道具・形態・素材以外に重要な要素があるということが分かった。制作物の精度と自由度を両立するためには道具の制作にはより大きなコストがかかる。また、接合部の設計は組立において必要な技能に大きな影響を与える。そのような本研究のモデルでは補えなかった要素を取り入れて新たな設計・制作プロセスのモデルを提案することが期待される。

デジタル・ファブリケーションを用いた「道具の制作」によって可能となるのは、M. カルポが主張している「ファイル トゥ ファクトリー (file to factory)」のような設計者の決定をそのまま実現させる設計から制作への一本道のプロセスではない。設計者がデジタル・ファブリケーションを用いて生産の道具を拡張しながら設計と制作、情報と物質を行き来することで発見的で創造的な建築生産を行うような、設計者による新たなクラフトマンシップとも言えるべきプロセスである。

参考文献

- 井上雄介 横山晋一、近現代における道具史の基礎的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、2017
- ヴィトラ・デザイン・ミュージアム、慶応義塾大学 DMF 企画、カトリーヌ・デュモン・ダヨ、ブルーノ・ライシュリン監修、山名義之日本語版監修『ジャン・プルーヴェ』、TOTO 出版、2004
- 緒方壽人『コンヴィヴィアル・テクノロジー 人間とテクノロジーが共に生きる社会へ』、ビー・エヌ・エヌ、2021
- 河村京介、"Fuzzy Node で接合される小片集積体の機構解析における行列表現,"日本建築学会大会学術講演梗概集, 2017
- 木村朝子, et al. "空間型作業での選択・移動操作に適した道具型デバイスの機能設計と評価." 情報処理学会論文誌 51.2、2010
- 剣持りょう、規格構成材建築への出発、綜建築研究所、1974
- 竹中司、岡部文「ロボットはコンピュータの夢をかたちにするか？」、GA JAPAN 127-151 号、2014-2018
- 永田 恵子ほか、建築書系道具雛形の基本型と発展型：建築書系道具雛形の歴史的変遷過程、日本建築学会計画系論文集、66 巻 539 号、日本建築学会、2001
- 西野順二、スキルトロニクスな道具のデザイン、人工知能学会全国大会論文集、1B2-9、2008
- 西本一志、創造活動のためのユニバーサルな道具とは、エンタテインメントコンピューティング 2006 予稿集、2006
- 日野永一、『日本の技術 本工具の歴史』、日本産業技術史学会、1989
- ビアトリス・コロミーナ、マーク・ウィグリー著、牧尾晴喜訳『我々は人間なのか？ーデザインと人間をめぐる考古学的覚書き』、ビー・エヌ・エヌ新社、2017
- マリオ・カルポ、美濃部幸朗訳、アルファベットそしてアルゴリズム、鹿島出版会、2014
- イヴァン・イリイチ『コンヴィヴィアリティのための道具』、筑摩書房、2014
- 村松貞次郎監修 黒川一夫執筆『わが国大工の工作技術に関する研究』労働科学研究所、1948
- 村松貞二郎、道具と機械と人間の歴史的関係、日本機械学会誌、76 巻 654 号、日本機械学会、1973
- 村松貞次郎『道具と手仕事』、岩波書店、2014
- 山名善之、ジャン・プルーヴェの工場製・組立住宅における実験的試み、『10+1』 No.41、2005
- リチャード・セネット著、高橋勇夫訳『クラフツマン 作ることは考えることである』、筑摩書房、2016

Ackley, L., et al., "Managing the construction of the Museum Guggenheim Bilbao", Boston: Center for Design Informatics, Harvard Design School, 2002

Aejmelaesus-Lindström, Petrus, et al. "Rock Print Pavilion: Robotically fabricating architecture from rock and string." *Construction Robotics* 4.1, 2020

Aubry, Simon, et al. "A UHPFRC cladding challenge: the fondation Louis Vuitton pour la création" Iceberg". *2nd RILEM-fib-AFGC International Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete*. 2013

Belis, Jan, et al. "Cold bending of laminated glass panels." *Heron* 52.1-2, 2007

Carpo, Mario. *The alphabet and the algorithm*, Mit Press, 2011

Carpo, Mario. *The second digital turn: design beyond intelligence.*, MIT press, 2017

Buchli, Jonas, et al. "Digital in situ fabrication-Challenges and opportunities for robotic in situ fabrication in architecture, construction, and beyond." *Cement and Concrete Research* 112, 2018

Castañeda, E., et al. "Free-form architectural envelopes: Digital processes opportunities of industrial production at a reasonable price." *Journal of Facade Design and Engineering* 3.1, 2015

de Freitas Pires, Janice, Luisa Dalla Vecchia, and Adriane Almeida da Silva Borda. "Transiting between Representation Technologies and Teaching/Learning Descriptive Geometry: Reflections in an Architectural Context." *Handbook of Research on Visual Computing and Emerging Geometrical Design Tools*. IGI Global, 2016

Dierichs, Karola, and Achim Menges. "Towards an aggregate architecture: designed granular systems as programmable matter in architecture.", *Granular Matter* 18.2, 2016

Dörfler, Kathrin, et al. "Mobile robotic fabrication beyond factory conditions: Case study Mesh Mould wall of the DFAB HOUSE." *Construction Robotics* 3.1 , 2019

Gheorghîță, Vlad, and Cătălin Gheorghîță. "Applying of a design methodology for a new mobility product." *MATEC Web of Conferences. Vol. 178*. EDP Sciences, 2018

Hammad, Numan Abu, and Mutasem Abu Hammad. "Sustainable design thinking: Adaptability, resilience, and productivity at the core of regionally responsive architecture.", 2017

Hironori Yoshida, et al., "Architecture-scale human-assisted additive manufacturing", *ACM Transactions on Graphics*, no. 88, 2015

Kolarevic, Branko, *Digital fabrication: manufacturing architecture in the information age*, 2001

Koppitz, Jan-Peter, et al. "Metropol parasol-digital timber design." *Computational Design Modelling*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011

Krieg, Oliver David, et al. "Biomimetic lightweight timber plate shells: computational

integration of robotic fabrication, architectural geometry and structural design." *Advances in architectural geometry 2014*. Springer, Cham, 2015, pp.109-125

Lee, Ghang, and Seonwoo Kim. "Case study of mass customization of double-curved metal façade panels using a new hybrid sheet metal processing technique." *Journal of Construction Engineering and Management* 138.11, 2012

Lena-Acebo, Francisco Javier, and María Elena García-Ruiz. "The FABLAB Movement: Democratization of Digital Manufacturing." *Organizational Transformation and Managing Innovation in the Fourth Industrial Revolution*. IGI Global, 2019

Lienhard, Julian, and Jan Knippers. "Bending-active structures." Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen der Universität Stuttgart, *Forschungsbericht* 36, 2014

Menges, Achim, "Morphospaces of robotic fabrication", *Rob/ Arch 2012*. Springer, Vienna, 2013

Piano, Renzo, *Process, Architecture*. No. 100. Process Architecture Publishing Company, 1992

Sacks, Rafael, et al. *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers*. John Wiley & Sons, 2018

Sennett, Richard, *The craftsman*, Yale University Press, 2008

Tessmann, O., Bollinger, K., Grohmann, M., *Structured Becoming : Evolutionary Processes in Design Engineering.*, 2010

Wiendahl, H-P., et al. "Changeable manufacturing-classification, design and operation." *CIRP annals* 56.2, 2007

Yuan, Philip F., and Keke Li. "Novel Bricks: A Scenario of Human–Machine Collaboration." *Architectural Design* 90.5, 2020

建築画報 vol. 56、2020 年 12 月号、2020

a+u 2020 年 4 月号、2020

秋吉浩気, “デジタル時代のクラフツマンシップとは”, 建築討論

(<https://medium.com/kenchikutouron/%E3%83%87%E3%82%B8%E3%82%BF%E3%83%AB%E6%99%82%E4%BB%A3%E3%81%AE%E3%82%AF%E3%83%A9%E3%83%95%E3%83%84%E3%83%9E%E3%83%B3%E3%82%B7%E3%83%83%E3%83%97%E3%81%A8%E3%81%AF-8e606c67437c> 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)

Adam Williams, “Stunning Steampunk pavilion bends wood into weird and wonderful shapes”, NEW ATLAS (<https://newatlas.com/architecture/steampunk-pavilion-fologram/> 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)

Cajsa Carlson, “Snøhetta "managed to push the world forward through architecture" says Jenny B Osuldsen in VDF talk”, Virtual Design Festival
[\(https://www.dezeen.com/2020/05/18/snohetta-push-the-world-forward-architecture-jenny-b-osuldsen-vdf/\)](https://www.dezeen.com/2020/05/18/snohetta-push-the-world-forward-architecture-jenny-b-osuldsen-vdf/) 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)

Zach Mortice, “建材としての竹が実現するカーボンネガティブな建築”, Redshift
[\(https://redshift.autodesk.co.jp/bamboo-construction/\)](https://redshift.autodesk.co.jp/bamboo-construction/) 閲覧日 2020 年 1 月 15 日)

“青森市文化観光交流施設「ねぶたの家 ワ・ラッセ」”, KIKUKAWA
[\(https://www.kikukawa.com/product/nebutanoie-warasse/\)](https://www.kikukawa.com/product/nebutanoie-warasse/) 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)

“インクリメンタルフォーミング”, KIKUKAWA
[\(https://www.kikukawa.com/technology/incremental-forming/\)](https://www.kikukawa.com/technology/incremental-forming/) 2022 年 1 月 15 日)

“四季十楽（門扉）”, KIKUKAWA, [\(https://www.kikukawa.com/product/shikijyuraku/\)](https://www.kikukawa.com/product/shikijyuraku/) 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)

“ツイスト（ひねり）加工”, KIKUKAWA [\(https://www.kikukawa.com/topics-twisting/\)](https://www.kikukawa.com/topics-twisting/) 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)

“日本橋旧テラー堀屋改修”, 三井嶺建築設計事務所
 [\(https://reimitsui.com/nihombashi.html\)](https://reimitsui.com/nihombashi.html) 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)

“ノミの使い方”, KAKURI
[\(http://www.kakuri.co.jp/howtouse/%E3%83%8E%E3%83%9F%E3%81%AE%E4%BD%BF%E3%81%84%E6%96%B9/\)](http://www.kakuri.co.jp/howtouse/%E3%83%8E%E3%83%9F%E3%81%AE%E4%BD%BF%E3%81%84%E6%96%B9/) 閲覧日 2022 年 1 月 15 日)

“曲木 / まげる”, 浜本工芸
[\(https://www.hamamotokougei.co.jp/concept/technique/mageru/\)](https://www.hamamotokougei.co.jp/concept/technique/mageru/) 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)

“まれびとの家”, VUILD Architects [\(https://architects.vuild.co.jp/works/house-for-marebito/\)](https://architects.vuild.co.jp/works/house-for-marebito/) 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)

“横河健+佐藤淳による膜構造プロジェクト「i-cube」展”, japan-architects ブログ
 [\(http://world-architects.blogspot.com/2013/04/i-cube.html\)](http://world-architects.blogspot.com/2013/04/i-cube.html) 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)

“A technician operating a drill press”, Wikimedia Commons
 [\(https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1391089\)](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1391089) 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)

“Bending Bridges —Double-Layered Lightweight Load-Bearing Structures”, ME-ST
 [\(https://www.me-st.com/Bending-Bridges\)](https://www.me-st.com/Bending-Bridges) 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)

















“Designing with Digital Fabrication“, ARUP
 [\(https://www.arup.com/perspectives/publications/promotional-materials/section/designing-with-digital-fabrication\)](https://www.arup.com/perspectives/publications/promotional-materials/section/designing-with-digital-fabrication) 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)

“Digital assembly of a complex roof structure“, ETH Zurich
 [\(https://ita.arch.ethz.ch/archteclab/sequential-roof-.html\)](https://ita.arch.ethz.ch/archteclab/sequential-roof-.html) 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)

















“FSW（摩擦攪拌接合 / Friction Stir Welding）”, KIKUKAWA,












(<https://www.kikukawa.com/technology/fsw-friction-stir-welding/> 2022 年 1 月 15 日)
“Gradual Assemblies, Rome, 2018”, Gramazio Kohler Research
(<https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/lehre/353.html> 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)
“Hungerburg Funicular Stations”, design-to-production
(<https://www.designtoproduction.com/> 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)
“Laarge computer-controlled router often used to cut precise parts out of wood, plastic, and lightweight metal sheets. LOcated at TheShop.build in San Jose, CA“, Wikimedia Commons
(https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ShopBot_PRS_Alpha_CNC_Router.jpg 閲覧
日: 2022 年 1 月 15 日)
“ LOCI”, AA 2016 (<https://pr2016.aaschool.ac.uk/Loci> 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)
“MAS 2016 / 17“, MAS ETH DFAB (<https://www.masdfab.com/work-1617-bricklabyrinth>
閲覧日 2022 年 1 月 15 日)
“MINIBUILDERS”, Iaac, (<https://iaac.net/project/minibuilders/> 閲覧日: 2022 年 1 月 15
日)
“Nordpark Railway Stations”, Zaha Hadid Architects (<https://www.zaha-hadid.com/architecture/nordpark-railway-stations/> 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)
“ZAHA HADID ARCHITECTS DONGDAEMUN DESIGN PLAZA”, DIVISARE
(<https://divisare.com/projects/328000-zaha-hadid-architects-julien-lanoo-dongdaemun-design-plaza> 閲覧日: 2022 年 1 月 15 日)
Digital Grotesque —Printing Architecture (<http://digital-grotesque.com/about.html> 閲覧
日: 2022 年 1 月 15 日)
Precious Plastic (<https://community.preciousplastic.com/academy/intro.html> 閲覧日:
2022 年 1 月 15 日)

















道具の事例出典

















道具の種類		道具・プロジェクト	年代	出典
D (デジタル・ファブリケーション)		Gehry Partners, Guggenheim Museum Bilbao	1997	Ackley, L., et al., Managing the construction of the Museum Guggenheim Bilbao, Boston: Center for Design Informatics, Harvard Design School, 2002
D		Gehry Partners, Guggenheim Museum Bilbao	1997	https://www.archdaily.com/881663/the-unexpected-low-tech-solutions-that-made-the-guggenheim-bilbao-possible
D		Gehry Partners, Neuer Zollhof	1999	Kolarevic, Branko. "Digital fabrication: manufacturing architecture in the information age." (2001).
D		Gehry Partners, Neuer Zollhof	1999	Kolarevic, Branko. "Digital fabrication: manufacturing architecture in the information age." (2001).
D		B. Franken, BMW Pavilion	2000	Kolarevic, Branko. "Digital fabrication: manufacturing architecture in the information age." (2001).
D		Alvaro Siza, Serpentine Gallery Pavilion 2005	2005	https://pdfslide.net/documents/the-serpentine-pavilion-2005-case-study.html
D		ZHA, Hungerburbahn	2005	https://www.designtoproduction.com/en/
D		日建設計、木材会館	2009	http://www.pdweb.jp/column/arc/arc07.shtml
D		IAAC, Fablab House	2010	https://iaac.net/project/fab-lab-solar-house/
D		Matter Design, Foam Tower	2010	http://www.matterdesignstudio.com/periscope
D		Shigeru Ban, Centre Pompidou Metz	2010	Brell-Çokcan, Sigrid, et al. "Digital Design to Digital Production: Flank Milling with a 7-Axis CNC-Milling Robot and Parametric Design." (2009).
D		Architecture 00, Wikihouse	2011	https://www.wikihouse.cc/Projects
D		Jurgen Mayer, Metropol Parasol	2011	Koppitz, Jan-Peter, et al. "Metropol parasol-digital timber design." <i>Computational Design Modelling</i> . Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. 249-257.
D		Snohetta, Norwegian Wild Reindeer Centre Pavilion	2011	https://www.dezeen.com/2020/05/18/snohetta-push-the-world-forward-architecture-jenny-b-osuldsen-vdf/
D		ZHA, Dongdaemun Design Plaza	2014	https://www.arup.com/perspectives/publications/promotional-materials/section/designing-with-digital-fabrication
D		Stuttgart ICD, Stuttgart ICD/ITKE Pavilion 2011	2011	Krieg, Oliver David, et al. "Biomimetic lightweight timber plate shells: computational integration of robotic fabrication, architectural geometry and structural design." <i>Advances in architectural geometry 2014</i> . Springer, Cham, 2015. 109-125.



D		Stuttgart ICD, ICD/ITKE Pavilion 2012	2012	http://www.achimmenges.net/?p=5561
D		Michael Hansmeyer, Digital Grotesque	2013	http://digital-grotesque.com/about.html
D		Cyclic Design, ROBOTIC INFILTRATION	2013	https://cyclic.design/robotic-infiltration/
D		IAAC, MiniBuilders	2013	https://iaac.net/project/minibuilders/
D		T_ADS, STIK Pavilion	2014	https://forty-five.com/papers/arms-race
D		Gehry Partners, Fondation Louis Vuitton	2014	https://network.aiaa.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=c4deb415-1df7-4bae-ad53-dd7838ffe849
D		Gehry Partners, Fondation Louis Vuitton	2014	https://network.aiaa.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=c4deb415-1df7-4bae-ad53-dd7838ffe849
D		Gramazio Kohler Research, Remote Material Deposition	2014	https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/lehre/276.html
D		AA School, Osteobotics AADRL 2015	2015	https://www.archdaily.com/778099/bone-like-plastic-structures-form-biodegradable-temporary-pavilions-with-osteobotics
D		AA school, LOCI, 2016	2016	https://pr2016.aaschool.ac.uk/Loci
D		三井礦、日本橋旧 テラー堀屋改修	2016	https://reimitsui.com/nihombashi.html
D		Block Research Group, Armadio Vault	2016	https://www.dezeen.com/2016/05/31/armadillo-vault-block-research-group-eth-zurich-beyond-the-bending-limestone-structure-without-glue-venice-architecture-biennale-2016/
D		AA School, Wood Chip Barn	2016	https://contextbd.com/robotically-fabricated-wood-chip-barn-aa-school-architecture/
D		ETH ITA, ITA-Roof	2016	https://ita.arch.ethz.ch/archteclab/sequential-roof-.html
D		Archi-Union Architects, Chi She	2016	https://www.gooood.cn/chi-she-shanghai-by-archi-union-architects.htm
D		Gramazio Kohler Research, Robotic Pavilion	2016	https://vimeo.com/322265776

D		HENN and DOU, Communication Landscapes	2017	https://vimeo.com/236093225
D		Gramazio Kohler Research, The Brick Labyrinth	2017	https://shaunwu25.github.io/brick/2017/06/18/Brick-Labyrinth.html
D		Stuttgart ICD, ICD Aggregate Wall	2017	https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/icd-aggregate-wall-2017/
D		ETH Zurich, DFAB House	2017	https://inhabitat.com/giant-robots-and-3d-printers-are-building-a-futuristic-house-in-switzerland/dfab-house-by-eth-zurich-2/
D		Robotic Fabrication LAB of HKU, Ceramic Information Pavilion	2017	https://www.archdaily.com/890192/in-china-an-experimental-pavilion-of-ceramic-bricks-fuses-craftsmanship-and-digital-fabrication
D		T_ADS, PAFF	2017	https://architecturephoto.net/65091/
D		Embodied Computational Lab, The Living	2018	a+u 2020年4月号、pp.58-65、2020
D		Gramazio Kohler Research, Gradual Assemblies	2018	https://vimeo.com/280906195
D		Gramazio Kohler Research, Gradual Assemblies	2018	https://vimeo.com/280906195
D		Gramazio Kohler Research, Rock Print Pavilion	2018	https://www.designboom.com/architecture/eth-zurich-rock-print-pavilion-gewerbemuseum-winterthur-10-03-2018/
D		MX3D, MX3D Bridge	2018	https://www.researchgate.net/publication/325747398_Printing_Architecture_An_Overview_of_Existing_and_Promising_Additive_Manufacturing_Methods_and_Their_Application_in_the_Building_Industry
D		Alisa Andrasek, Cloud Pergola	2018	https://www.alisaandrasek.com/projects/li-quid
D		Apis Cor 3D printer	2018	https://contech.jp/apiscor/
D		Phillip Yuan, Cloud Village	2018	https://www.allcadblocks.com/chinese-pavilion-opens-with-robot-printed-cloud-village-at-2018-venice-biennale/
D		ME-ST, Bending Bridges	2018	https://www.me-st.com/Bending-Bridges
D		Gramazio Kohler Research, Human-machine collaboration	2018	https://www.archdaily.com/898145/rob-arch-2018-robotic-fabrication-in-architecture-art-and-design/5b476a54f197cc4be4000715-rob-arch-2018-robotic-fabrication-in-architecture-art-and-design-photo

D		竹中工務店、EQ House	2019	https://www.kikukawa.com/product/eq-house/
D		T ADS, UROCO	2019	https://www.kensetsu-news.com/web-kan/323087
D		Forogram, Steampunk Pavilion	2019	https://www.archdaily.com/925191/steampunk-pavilion-gwyllm-jahn-and-cameron-newnham-plus-soomeen-hahm-design-plus-igor-pantic
D		Gramazio Kohler Research, Concrete Choreography	2019	https://www.bedarf.cc/portfolio/concrete-choreography/
D		MEAN, Deciduous	2019	https://www.youtube.com/watch?v=LeH4NmCrbo
D		Neri Oxman, Aguahojai	2019	https://vimeo.com/377572073
D		VUILD, まればとの家	2019	https://architects.vuild.co.jp/works/house-for-marebito/
D		CO-LAB, Luum Temple	2019	https://redshift.autodesk.co.jp/bamboo-construction/
D		IAAC, ARCHITECTURE OF CONTINUITY	2019	https://www.iaacblog.com/programs/perpetual-city-spatial-notions-3d-printed-future/
D		IAAC, On Site Robotics	2019	https://iaac.net/project/on-site-robotics/
D		Carl Fredrik Svenstedt Architect, the Delas Frères Winery	2020	https://www.metalocus.es/en/news/a-winery-wall-built-be-touched-maison-delas-freres-winery-carl-fredrik-svenstedt-architect
D		ITE, Shotcrete 3D Printing	2020	https://www.researchgate.net/publication/342755061_Shotcrete_3D_Printing_Technology_for_the_Fabrication_of_Slender_Fully_Reinforced_Freeform_Concrete_Elements_with_High_Surface_Quality_A_Real-Scale_Demonstrator
D		WASP, Tecla	2021	https://www.3dwasp.com/casa-stampata-in-3d-tecla/
D		ITE, Robotic Rammed Earth	2021	https://www.tu-braunschweig.de/ite/research/roboticrammedearth
D		ITE, Robotic Rammed Earth	2021	https://www.tu-braunschweig.de/ite/research/roboticrammedearth
D		ZHA and Block Research Group, Striatum Bridge	2021	https://www.archdaily.com/965324/striatum-bridge-zaha-hadid-architects-plus-block-research-group

D	 <small>竹中工務店, EQ House, 2019</small>	竹中工務店, EQ House	2019	https://www.kikukawa.com/product/eq-house/
D	 <small>T_ADS, UROCO, 2019</small>	T_ADS, UROCO	2019	https://www.kensetsunews.com/web-kan/323087
D	 <small>Forogram, Steampunk Pavilion, 2019</small>	Forogram, Steampunk Pavilion	2019	https://www.archdaily.com/926191/steampunk-pavilion-gwyllm-jahn-and-cameron-newnham-plus-soomeen-hahm-design-plus-igor-pantic
D	 <small>Gramazio Kohler Research, Concrete Choreography, 2019</small>	Gramazio Kohler Research, Concrete Choreography	2019	https://www.bedarf.cc/portfolio/concrete-choreography/
D	 <small>MEAN, Deciduous, 2019</small>	MEAN, Deciduous	2019	https://www.youtube.com/watch?v=LeHI4NmCrbo
D	 <small>Neri Oxman, Aguahoja, 2019</small>	Neri Oxman, Aguahoja	2019	https://vimeo.com/377572073
D	 <small>VUILD, まれびとの家, 2019</small>	VUILD, まれびとの家	2019	https://architects.vuild.co.jp/works/house-for-marebito/
D	 <small>CO-LAB, Luum Temple, 2019</small>	CO-LAB, Luum Temple	2019	https://redshift.autodesk.co.jp/bamboo-construction/
D	 <small>IAAC, ARCHITECTURE OF CONTINUITY, 2019</small>	IAAC, ARCHITECTURE OF CONTINUITY	2019	https://www.iaacblog.com/programs/perpetual-city-spatial-notions-3d-printed-future/
D	 <small>IAAC, On Site Robotics, 2019</small>	IAAC, On Site Robotics	2019	https://iaac.net/project/on-site-robotics/
D	 <small>Carl Fredrik Svenstedt Architect, the Delas Frères Winery, 2020</small>	Carl Fredrik Svenstedt Architect, the Delas Frères Winery	2020	https://www.metalocus.es/en/news/a-winery-wall-built-be-touched-maison-delas-freres-winery-carl-fredrik-svenstedt-architect
D	 <small>ITE, Shotcrete 3D Printing, 2020</small>	ITE, Shotcrete 3D Printing	2020	https://www.researchgate.net/publication/342755061_Shotcrete_3D_Printing_Technology_for_the_Fabrication_of_Slender_Fully_Reinforced_Freeform_Concrete_Elements_with_High_Surface_Quality_A_Real-Scale_Demonstrator
D	 <small>WASP, Tecla, 2021</small>	WASP, Tecla	2021	https://www.3dwasp.com/casa-stampata-in-3d-tecla/
D	 <small>ITE, Robotic Rammed Earth, 2021</small>	ITE, Robotic Rammed Earth	2021	https://www.tu-braunschweig.de/ite/research/roboticrammedearth
D	 <small>ITE, Robotic Rammed Earth, 2021</small>	ITE, Robotic Rammed Earth	2021	https://www.tu-braunschweig.de/ite/research/roboticrammedearth
D	 <small>ZHA and Block Research Group, Striatum Bridge, 2021</small>	ZHA and Block Research Group, Striatum Bridge	2021	https://www.archdaily.com/965324/striatum-bridge-zaha-hadid-architects-plus-block-research-group

H		鑿		https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2F99diy.tokyo%2Ffaigakitugi%2F&psig=AOvVaw1OLGBqcAVPzItRTEPSSBk2&ust=1587708020338000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjhxqFwoTCPjzl73v_egCFQAAAAAdAAAAABAD
H		錐		http://www.kakuri.co.jp/howtouse/%E4%BD%BF%E3%81%84%E6%96%B9/
H		リベッター		https://electrictoolboy.com/media/5716/
H		鋺		https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.renovation-soup.com%2Frenovation%2F6506%2F&psig=AOvVaw1LoZlaJolpvaOrs0es8aSw&ust=1587707290615000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjhxqFwoTCLj0wNvs_egCFQAAAAAdAAAAABAF
H		クランプ		https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fja.wikipedia.org%2Fwiki%2F%E3%2582%25AF%E3%2583%25A9%E3%2583%25B3%E3%2583%2597_(%25E5%25B7%25A5%E5%2585%25B7)&psig=AOvVaw0WlqJyiDLrj002TeFSDYjn&ust=1589519349292000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjhxqFwoTCKDu5JbLsukCFQAAAAAdAAAAABAL
H		コーキング工具		https://reform-market.com/caulking/contents/basic
H		ガラス切り		https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.giya-man.com%2Fproduct%2F90%2F&psig=AOvVaw0B7RblR7jRUg9RpEc6OnDz&ust=158831922497000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjhxqFwoTCPidoLjUj-kCFQAAAAAdAAAAABAD
H		金切り鉄		https://www.google.com/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Fblog.livedoor.jp%2Fshokunoibara-ki%2Farchives%2F48462997.html&psig=AOvVaw2ORDUmHopzfVsbMfKj3eEw&ust=1588320568474000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjhxqFwoTCOCrjK_Zj-kCFQAAAAAdAAAAABAM
H		鋸		https://thebest-1.com/a3373/
H		やすり		https://www.google.com/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Fwww.wataoka.co.jp%2Fitem%2F531.html&psig=AOvVaw0NkMoFKiWK4BG6S0tPWilO&ust=1589523865419000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjhxqFwoTCLid2_zbsukCFQAAAAAdAAAAABAI
H		テーバリーマ		http://www.jingle-shop.com/jisaku/jisaku-arekore-2.html
M (工業機械)		鉄筋バンダー		https://www.google.com/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Fwww.dmmel.rs%2Fvoepqgv-286837%2Fqlzepegux-mzpzqgh-mrgydd-hplzntstxk-ynbnlgx%2F&psig=AOvVaw07sfaN0UUGQ6f4VE1uhrif&ust=1588319618447000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjhxqFwoTCLjjiufVj-kCFQAAAAAdAAAAABAb
M		高速カッター		https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fvoltechno.com%2Fblog%2Fcuttoff-machine%2F&psig=AOvVaw2KIAOwgglvNXi-Aw_C6i97&ust=1587708611856000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjhxqFwoTCPCVhdHx_egCFQAAAAAdAAAAABAD
M		シャーリング		https://www.google.com/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Fwww.shinseisteel.com%2Fshearing%2F&psig=AOvVaw1q9tiWxVIVEqLAKmo5iPKt&ust=1587709026657000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjhxqFwoTCLi2qJjz_egCFQAAAAAdAAAAABAO
M		ボール盤		https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.bildy.jp%2Fmag%2Fdrillpress-guide%2F&psig=AOvVaw1xNfPpS9qetkxV6gWmngRO&ust=1587709649759000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjhxqFwoTCOjnv8D1_egCFQAAAAAdAAAAABAD
M		アルミ押し出しプレス機		https://www.ubemachinery.co.jp/product/extrusion.html

M		タイル押出成形機		https://www.biz-lixil.com/column/manufacturing/tile005/
M		バンドソー		https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.nc-net.or.jp%2Fcompany%2F69378%2Fproduct%2Fdetail%2F76798%2F&psig=AOvVaw3v2067lleJyZoZMXmx7XDg&ust=1587708855167000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjhXqFwoTCKj-hcXy_egCFQAAAAAdAAAAABAJ

謝辞







本論文の執筆にあたり、お世話になった方々に御礼申し上げます。主査の権藤先生には2年間の研究生生活全般においてお世話になりました。研究と関係がない部分でも助けていただき、恩義に感じております。心より感謝申し上げます。また、1年近くにわたって本研究で制作したパビリオンのアドバイスをいただいていた型枠研究会の皆様には大変お世話になりました。名古屋市立大学の木村先生にはパビリオンの構造解析を手伝っていただき、多くの構造的な観点からのアドバイスをいただきました。堀江製函合板所の武藤さんにはオリジナルのボルトの開発をしていただくとともに、曲面型枠制作の観点からアドバイスをいただきました。キヤマの山崎さんには型枠研究会でアドバイスをいただき、大変役立ちました。型枠研究会の皆様には心より感謝いたします。また、同じ構法系研究室の松村先生、清家先生、藤田先生、福島先生には研究室会議での発表で研究に関する多くのアドバイスをいただきました。心より感謝いたします。京都大学金多研究室の金多先生と西野先生には2度にわたる合同研究会の発表で修士研究のフィードバックをいただきました。心より感謝いたします。Domino Architectsの大野さんには研究会でデジタル・クラフトマンシップに関する大変興味深い発表をしていただき、自分の修論の内容にもフィードバックをいただきました。大野さんの発表内容と修論の内容が非常に近く驚いたことを覚えています。心より感謝申し上げます。また、構造の佐藤淳先生には非常に有益な構造のアドバイスをたくさんいただきました。パビリオンの組立の際にも、実際に現場を見てくださり、多くのアドバイスをいただいた結果パビリオンを自立させることができました。心より感謝いたします。佐藤研究室の氏岡君には自身の修士論文で忙しい中パビリオンの構造解析を手伝っていただきました。心より感謝いたします。佐藤研究室のマリヤさんと宮野君には佐藤研究室のShopbotを貸していただいたとともに加工を手伝っていただき、大変お世話になりました。心より感謝いたします。権藤研究室の皆様、同期の皆様、千葉研究室の皆様をはじめとするパビリオンの組立を手伝っていただいた方々のおかげで無事パビリオンを完成させることができました。心より感謝いたします。藤田研究室の福島先生、権藤研究室の河野さん、安原研究室の成瀬君にはパビリオンの素敵な写真をたくさん撮っていただきました。心より感謝いたします。最後に学生生活を支えていただいた家族に感謝して謝辞に代えさせていただきます。







淡路 広喜















[illegible]







木工具や工業機械の歴史に関する研究はなされているが、電動工具以降の道具を論じた研究はほとんどされていない。そのため、電動工具やデジタル・ファブリケーション、自動化施工といった新たな道具をこれまでの建築生産の道具の歴史に位置づけることが必要である。電動工具以降の道具を既存の道具の歴史に位置づけ、年表を制作した。







						
	Stratford Kohler Architects, Concrete Technology, 2019	OMA, Museum Bonn, 2016	OMA, Museum Bonn, 2016	OMA, Museum Bonn, 2016	OMA, Museum Bonn, 2016	OMA, Museum Bonn, 2016
Input	コンクリート	アッシュ材	コンクリート	MDF	レンガ	角材
Motion	コンクリートをノズルから出す	木材の曲率を固定する	CNC製の型等で打設	穴をあける	レンガを積み	平面的に切削する
Output	3次元形状のコンクリート柱	曲率の異なる木材	3次元曲面のコンクリート	MDFの曲面版	3次元曲面のレンガ壁	異なる長さの角材

						
	Lorenzo Kohler Architects, Paper House, 2010	OMA, Museum Bonn, 2016	OMA, Museum Bonn, 2016	OMA, Museum Bonn, 2016	OMA, Museum Bonn, 2016	OMA, Museum Bonn, 2016
Input	金属(液体)	レンガ	合板	鋸り器	コンクリート	合板
Motion	3Dプリントされた鋸型で鋸削	レンガを積み	平面的に切削する	鋸り器を落とす	ノズルからコンクリートを出す	平面的に切削する
Output	ランダムな金属のパターン	固定の異なるレンガ壁	異なるサイズの合板パネル	鋸り器の壁	3次元曲面のコンクリート	カスタマイズされた合板

						
	Studio UO, Kiyomasa, 2017	OMA, Museum Bonn, 2016	OMA, Museum Bonn, 2016	OMA, Museum Bonn, 2016	OMA, Museum Bonn, 2016	OMA, Museum Bonn, 2016
Input	プラスチックのユニット	角材	石膏、漆	板材	合板	鉄筋
Motion	ユニットを上から落とす	角材の位置を3次元座標上に固定	漆を出しながら小石を積み	平面的に切削する	平面的に切削する	鉄筋を積み
Output	プラスチックのユニットでできた壁	ランダムな高さの角材の壁	小石の柱	接合部を持つ板材	異なる形状のフレーム	曲面の鉄筋

						
	Studio UO, Kiyomasa, 2017	OMA, Museum Bonn, 2016	OMA, Museum Bonn, 2016	OMA, Museum Bonn, 2016	OMA, Museum Bonn, 2016	OMA, Museum Bonn, 2016
Input	カーボンファイバー	砂	バインダー	LVL	木の柱	バインダー
Motion	カーボンファイバーをフレームに巻く	横断面をつながら形を出す	3次元的に切削する	平面的に切削する	3次元的に切削する	3次元的に切削する
Output	カーボンファイバーによる3次元曲面	高解像度の砂岩	木材による3次元曲面	接合部を持つ異なる形状のLVL	接合部を持つ木の柱	接合部を持った曲面的な木材

						
	OMA, Museum Bonn, 2016	OMA, Museum Bonn, 2016	OMA, Museum Bonn, 2016	OMA, Museum Bonn, 2016	OMA, Museum Bonn, 2016	OMA, Museum Bonn, 2016
Input	合板	堅木	数枚	プラスチック	アルミ	ステンレス鋼
Motion	平面的に切削する	ARによって3Dモデルを投影する	板をつかんで固定	ノズルからプラスチックを出す	穴をあける	ノズルから全面を鋸削
Output	接合部を持つ異なる形状の合板	3次元曲面の板	曲面的な形状のユニット	3次元曲面のプラスチック	異なる形状のアルミパネル	3次元曲面のステンレス

						
	OMA, Museum Bonn, 2016	OMA, Museum Bonn, 2016	OMA, Museum Bonn, 2016	OMA, Museum Bonn, 2016	OMA, Museum Bonn, 2016	OMA, Museum Bonn, 2016
Input	生分解性プラスチック	発泡スチロール	樹脂	粘土	石材	繊維素材
Motion	ノズルからプラスチックを出す	3次元的に切削する	樹脂をノズルから出す	粘土を投げる	石材の位置を固定する	繊維素材を選び出す
Output	3次元曲面のプラスチック	3次元曲面	高解像度の樹脂の柱	粘土の壁	石材によるヴォールト天井	ランダムな形状の繊維

デジタル・ファブリケーション事例の収集

デジタル・ファブリケーション事例を収集し、道具のインプット（素材）、動作、アウトプット（形態）で整理を行った。

	切断する	削る	穴をあける	ビスを打つ	割る
木	ノコギリ 丸鋸	カンナ ノミ サンダー	電動ドライバー	電動ドライバー	
鉄	ディスクグラインダー 高速カッター バンドソー シャーリング ディスクグラインダー	ディスクグラインダー	電動ドライバー ボール盤 アトラ	電動ドライバー	
コンクリート	レンブラソー 石材用ノコギリ カットギザル	ディスクグラインダー	振動ドリル ハンマードリル	ハンマードリル	
石	ディスクグラインダー	ディスクグラインダー	振動ドリル ハンマードリル 電動ドライバー	ハンマードリル	
竹	竹引き鋸 丸鋸	サンダー	鋸 電動ドライバー		ナタ

■ 電動工具 ■ 伝統的な工具 ■ 工場機械

	平面的に切削する	3次元的に切削する	積む	ヘッドから出す	削る	穴をあける	ビス・釘を打つ	塗る	位置を定める	押し出す	縛む	曲げる	引き延ばす	投げる
木														
コンクリート・モルタル														
石・レンガ														
金属														
小石・砂・土														
プラスチック・樹脂														
スタイロフォーム														
繊維素材														

- デジタルファブリケーション特有の道具
- 既存の道具のみ
- 既存の道具とデジタルファブリケーションの共存

動作と素材による道具の分類

建築生産の道具を機能（動作と素材）によって分類し、デジタル・ファブリケーションにしか見られない道具の機能、既存の道具にしか見られない機能、既存の道具とデジタル・ファブリケーションが共存する道具の機能を明らかにした。

		コスト小 ← 自由度低 → 自由度大 → コスト大				
スキル要 多様な形 ↑ ↓ スキル不要 形の多様さ	① input: 作業が多様 output: 多様な形 (スキル要)	市販品	一部調整	既存の道具の組み合わせ	拡張部品を作る	エンドエフェクターをつくる
	② input: 情報が多様 output: 多様な形 (スキル不要)	コテ 金型リブ ヤスリ	カンナ ノミ			
	③ input: 単一 output: 多様な形 (スキル不要)	Wikihouse Fabula House Digital Grottoque CNC ガラス自撮り鏡装置 Neuer Zollhof (Styrolcom) Neuer Zollhof (Steel) Fondation Louis Vuitton BMW Pavillon Hungerbergbahn Centre Pompidou Metz Dongdaemun Design Plaza		The Living	粘土押し出し機	LOCI Armadio Vault Wood Chip Barn ITA-Roof Gradual Assemblies Foam Tower Communication Landscapes The Brick Labyrinth Chishe Concrete Choreography Deciduous Aguahojé Cloud Piegola ICD/ITKE Pavilion 2012 Upe, Delas Frères Winery ICD/ITKE Pavilion 2011 Serpentine Gallery Pavilion
	④ input: 単一 output: 限られた形 (スキル不要)	まねびとの家 鉄筋ベンダー レシプロソー 高圧カッター 電線カンナ サンダー シャーレンチ スリッ コーキングガン リベッター バンドソー シャーリング ボール盤 カッターゼム ターバリーマ 鋸 クラップ	電動ドライバー ハンマードリル ディスクグラインダー 鋸	Hephaestus		Robotic Infiltration Communication Landscapes Rock Point Pavilion astrobolites ANDRL 2015 STIK Pavilion ICD Aggregate Wall Remote Material Deposition

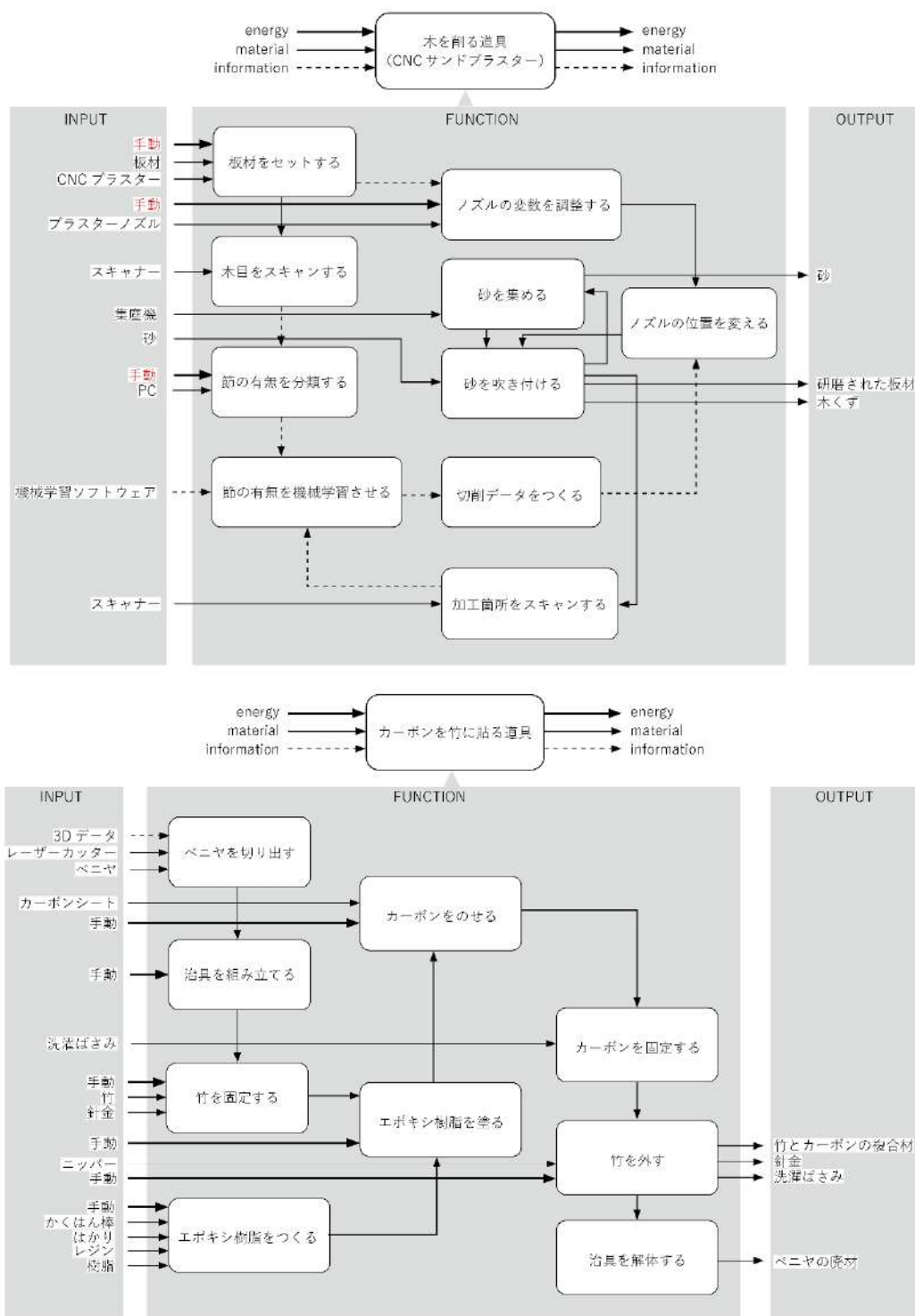
道具の二軸分析 (道具に必要な技能×道具の制作手法)

建築生産の道具を、道具に必要な技能によって分類し、道具の制作手法との二軸分析を行った。

		コスト小 ← 自由度低 → 自由度大 → コスト大				
汎用性高 ↑ ↓ 汎用性低	機能の汎用性が高い	市販品	一部調整	既存の道具の組み合わせ	拡張部品を作る	エンドエフェクターをつくる
	素材の汎用性が高い	Wikihouse (木) Fabula House (木) まねびとの家 (木)	電動ドライバー (木) ハンマードリル (コンクリート、石、木) ディスクグラインダー (金属、コンクリート)	Hephaestus (コンクリート)	粘土押し出し機	ICD/ITKE Pavilion 2011 (木) Serpentine Gallery (木) Foamboard Chip Barn (木) Armadio Vault (石) the Delas Frères Winery (石)
	汎用性が低い	クラップ (木、金属など) 鋸 (木、金属) ヤスリ (木、金属) レシプロソー (木、プラスチック) サンダー (木、金属) 丸鋸 (金属、レンガなど)				ITA-Roof (木) The Brick Labyrinth (レンガなど) Chishe (石など)
		Digital Grottoque (石) 鉄筋ベンダー (金属) 高圧カッター (金属) 電線カンナ (木) シャーレンチ (金属) バネリソー (金属) シャーリング (金属) ボール盤 (金属) カッターゼム (コンクリート) ターバリーマ (金属) リベッター (金属) コーキングガン (樹脂) 金型リブきみ (金属)	ノミ (木) カンナ (木) 鋸 (木)	The Living (木)		SAM 100 (レンガ) Robotic Pavilion (木) DFAB House (金属) LOCI (金属) STIK Pavilion (木) Gradual Assemblies (木) Foam Tower (発泡スチロール) Communication Landscapes (樹脂) Rock Point Pavilion (小石) Concrete Choreography (コンクリート) Deciduous (プラスチック) Aguahojé (プラスチック) Cloud Piegola (プラスチック) ICD/ITKE Pavilion 2012 (カーボンファイバー) astrobolites ANDRL 2015 (プラスチック) Robotic Infiltration (プラスチック)

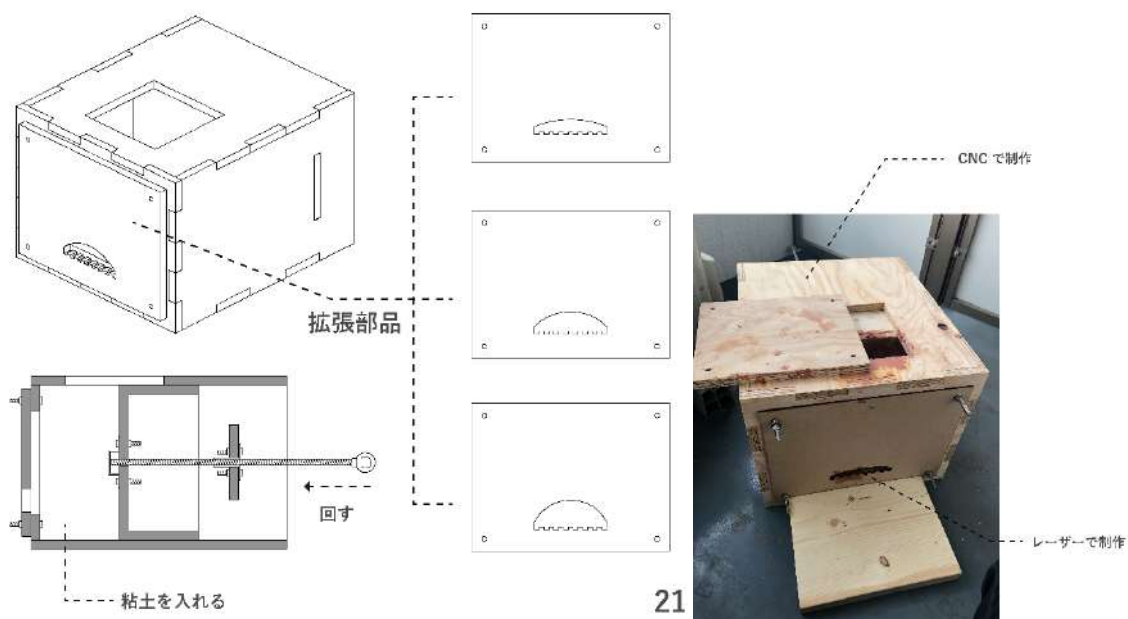
道具の二軸分析 (道具の汎用性×道具の制作手法)

建築生産の道具を、汎用性の有無によって分類し、道具の制作手法との二軸分析を行った。



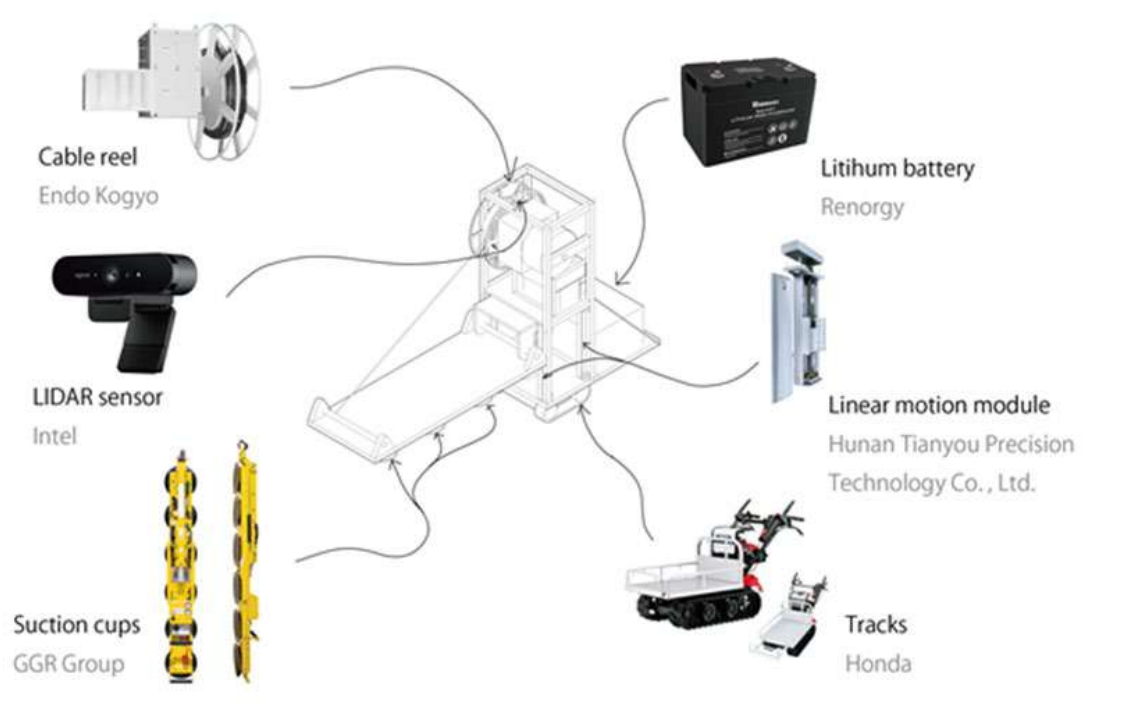
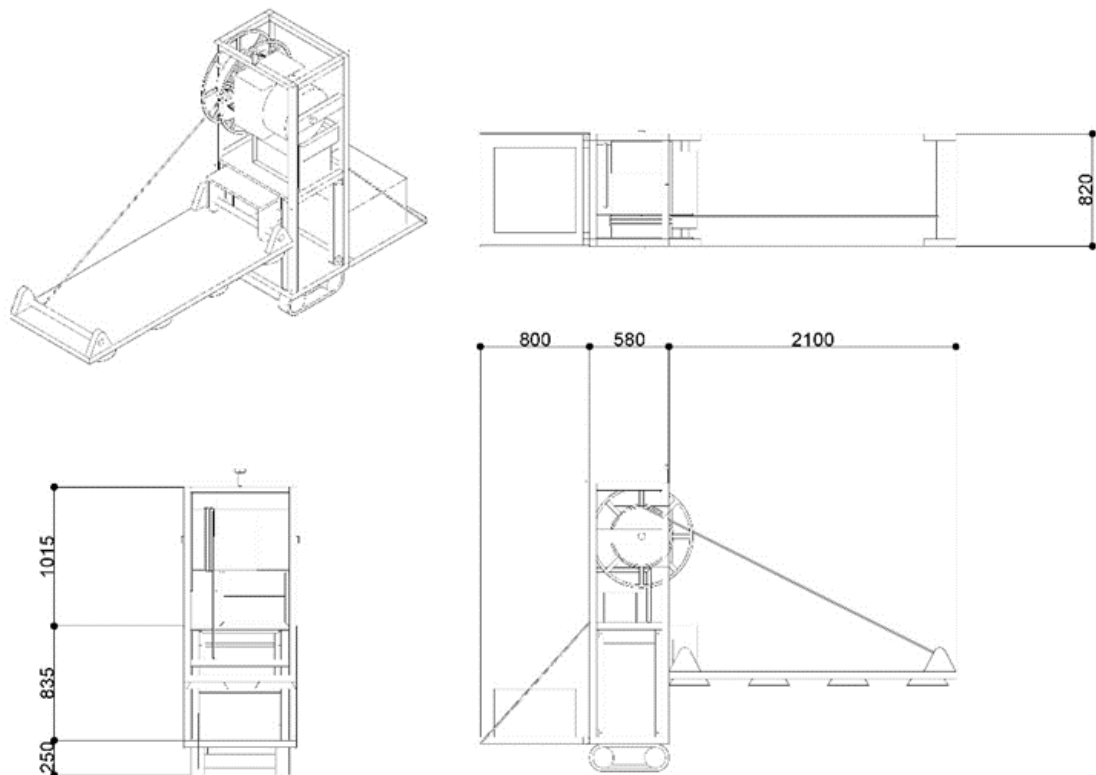
道具の機能分析

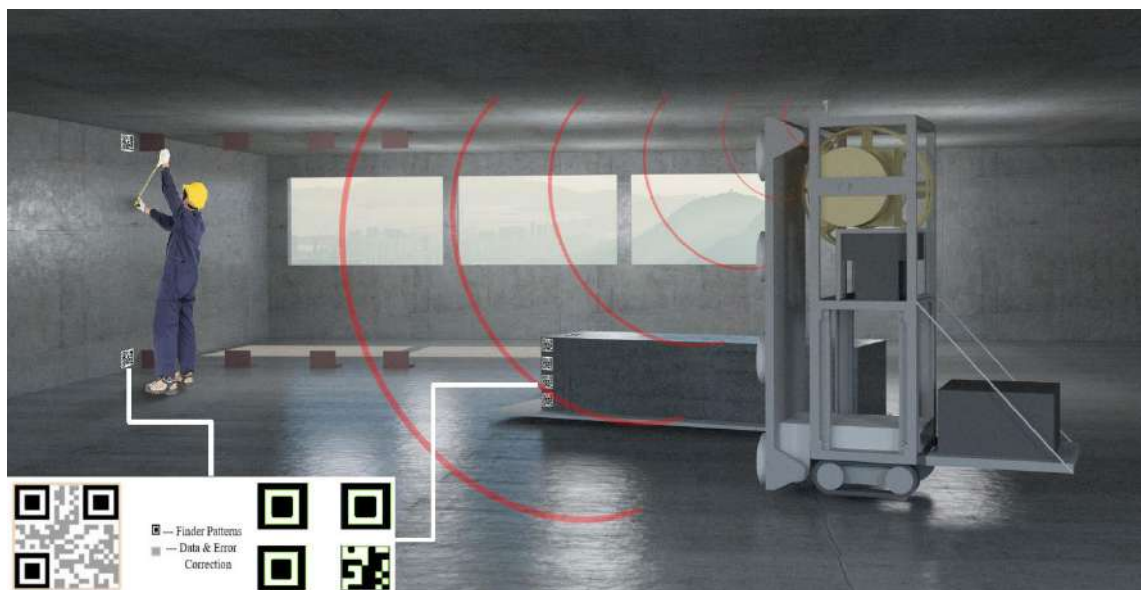
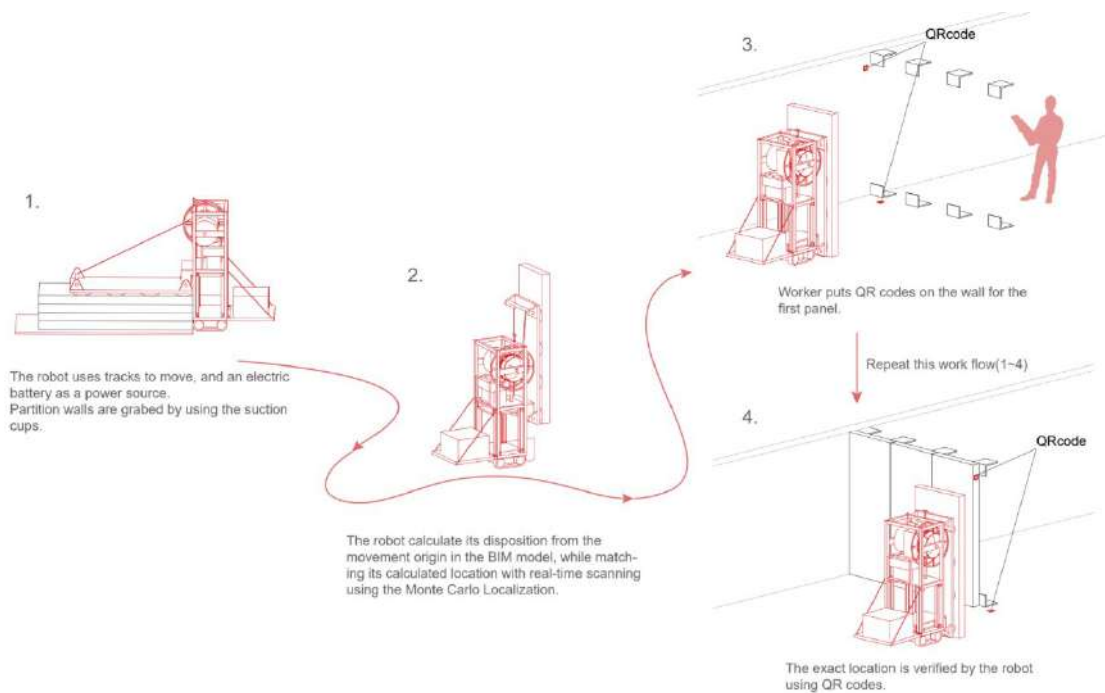
The Living (Embodied Computational Lab, 2018)で用いられた CNC サンドブラスターと Bamboo Ring (Kengo Kuma Laboratory, 2019)で用いられた竹を曲げる治具に関して、道具の機能分析を行った。



粘土押し出し機の制作

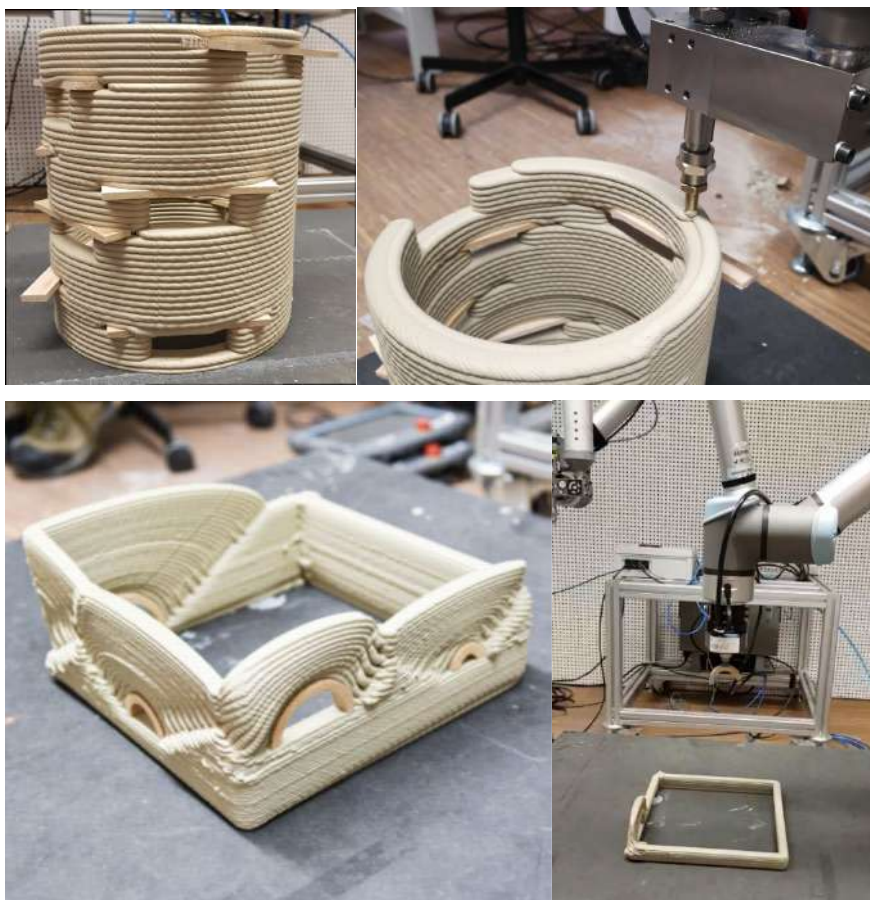
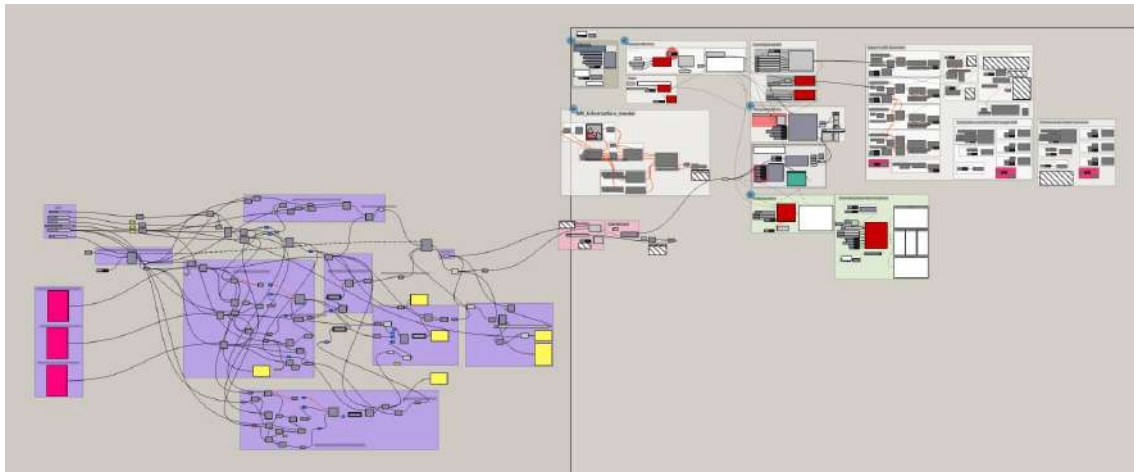
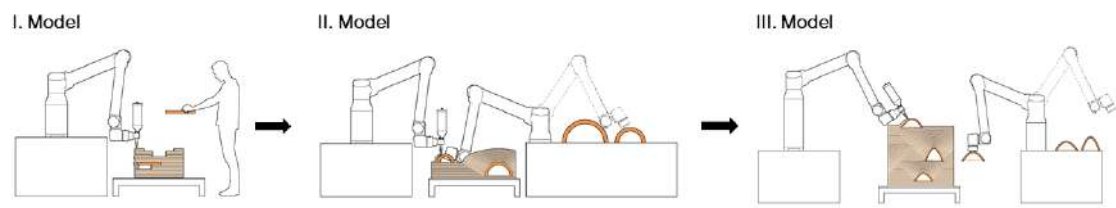
粘土を手動で押し出してタイルを生成する道具を制作した。ボルトを回すと、内箱が内部の粘土に圧力を加え、型の穴の部分から粘土が押し出される。この粘土押し出し機の本体は 18mm ラワンベニヤの CNC 加工で制作し、タイルの型は 4mmMDF 板のレーザー加工で制作した。タイルの型をレーザーカットで自由に作ることで、様々な形状のタイルを制作できると考えた。

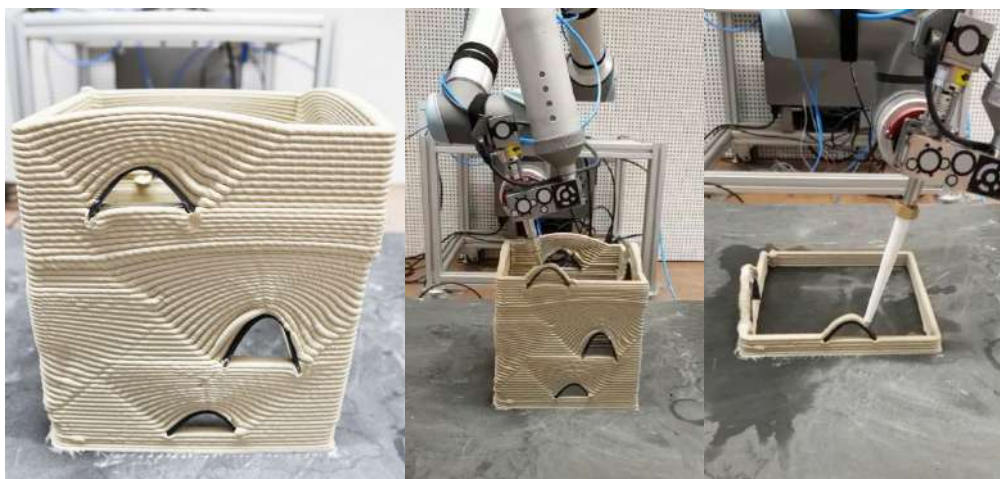




PC パネル設置ロボットの設計

PC パネルの設置を半自動化するロボットを設計した。PC パネルを平積みになされている状態から立て起こし、設置する位置まで移動させてから施工者が手動で固定作業を行う。このロボットはできるだけ既製品を組み合わせながら制作するとともに、全自動化するのではなく人が行う作業と自動化の作業を組み合わせることで、道具の開発コストを抑制した。





Clay Printing による開口部制作のスタディ

粘土を押し出して積層させることで構造物を作る Clay Printing Robot を用いて、開口部を保持する壁面の 1/10 モックアップを制作した。このロボットはエンドエフェクターを換えれば、部材を吸着して運搬・設置を行うこともできる。Grasshopper によりパラメトリックな形態をモデリングすれば、その形態に合わせてロボットのパスが自動的に生成され、ロボットはそのパス通りに加工を行う。開口部の部材へのプリントにおいては、ロボットのエンドエフェクターを傾けることでより精度の高い加工を目指した。総じて、3D モデルと実際の位置との誤差の修正（キャリブレーション）が課題となった。



プレカット機械メーカーの見学

プレカット機械メーカーである宮川工機への見学・インタビューを行った。一般的なプレカット加工機、産業用ロボットを用いた特殊加工機、現在は使われていない汎用機など、幅広く木材加工の道具を扱っていた。



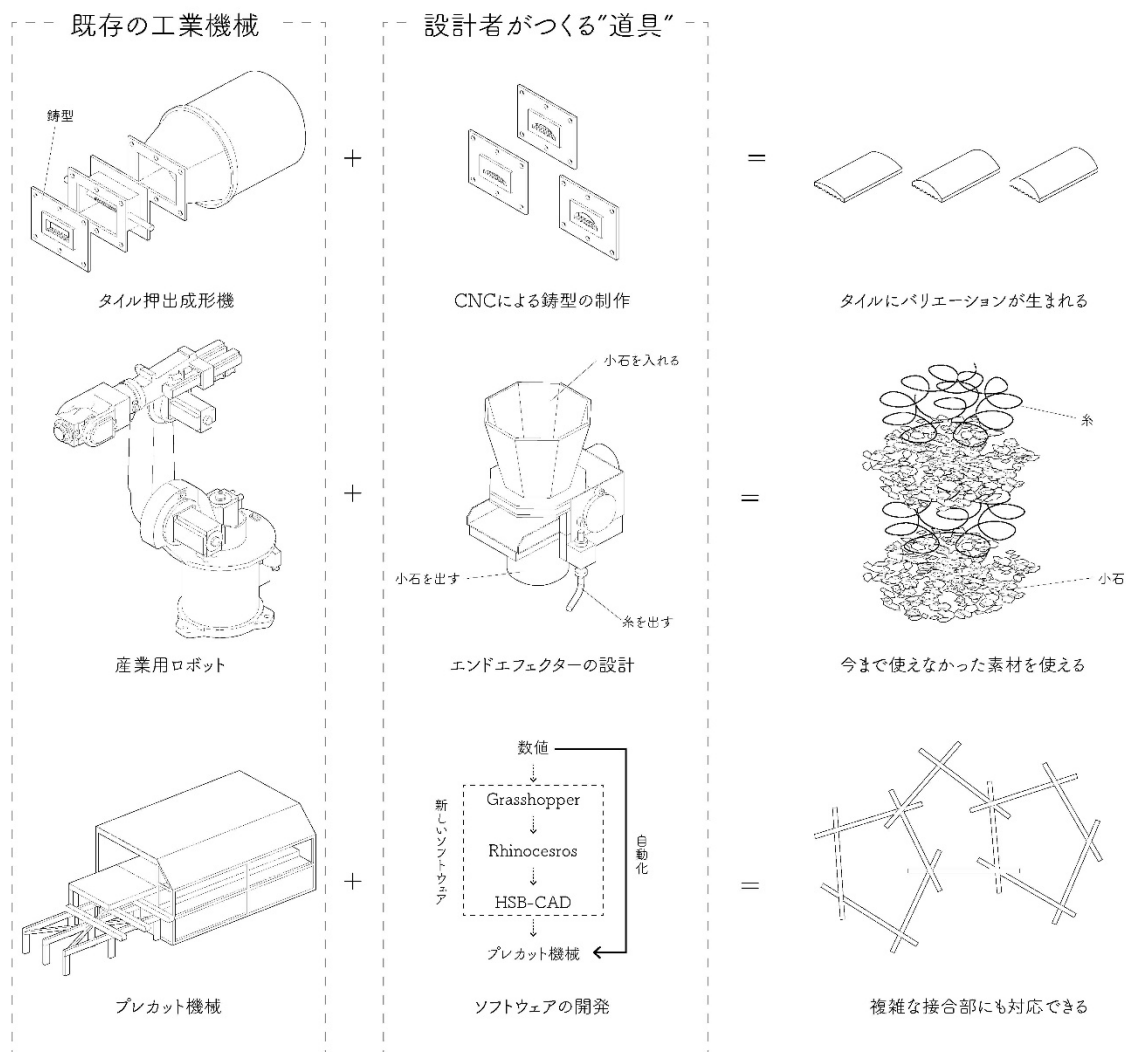
造作材メーカーの見学

造作材加工メーカーの木村木材工業への見学・インタビューを行った。最新のモルダーから台車付きシングルバンドソーなどの汎用機まで様々な機械が用いられていた。



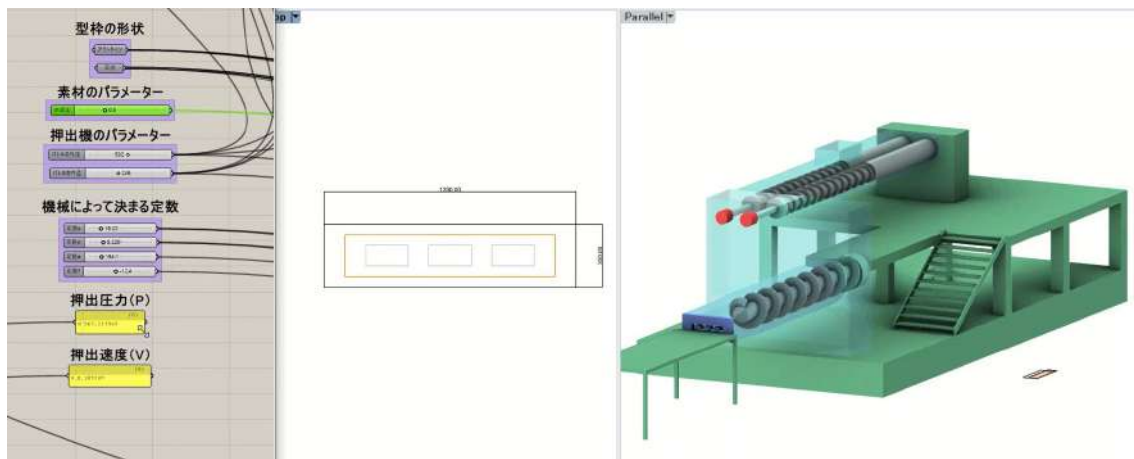
タイルメーカーの見学

タイルメーカーの水野製陶園ラボへ見学・インタビューを行った。タイル押出成形機やそれに付随する型、タイルに模様をつける治具などがみられた。



「道具の拡張」のコンセプト

タイル押出成形機は押出機械の本体部分に作りたい形状に合わせて制作した鋳型を取り付けることで、タイルを大量生産することができる。これまではこの鋳型部分を制作する作業を職人が行っていたが、現在のデジタル・ファブリケーションの技術を活用すれば設計者が作りたいタイルの形状に合わせて鋳型部分を制作することも可能であると考えられる。この鋳型は木で制作する場合もあり、その際には既存の CNC 加工機で十分制作可能である。このような型・治具を付属する汎用機は「道具の拡張」を行うことで自由度の高い制作物を実現できる可能性が高いと考えられる。



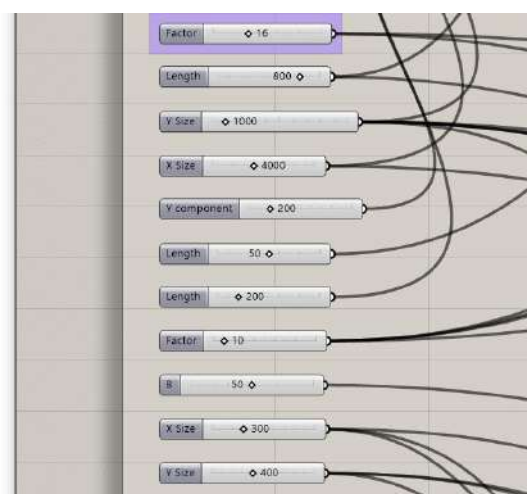
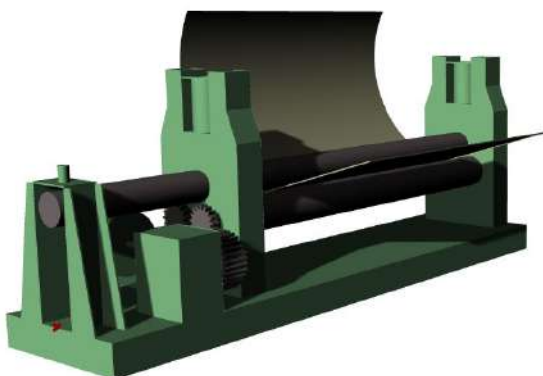
$$P = t_{e0} \cdot t_e / t_{e0} - 1 \times e^{1/d} \times (eW + f)^{-1/d}$$

$$V = (t_{e0} - t_e) / (t_{e0} - 1)^d \times nc / A \times P^d$$

(P: 押出圧力 V: 押出速度 t_{e0} : パレル開口の有効厚 t_e : 金型開口の有効厚 W: 水量比 n: 軸の回転速度 A: 金型開口の面積 c, d, e, f: 機械によって決まる定数)

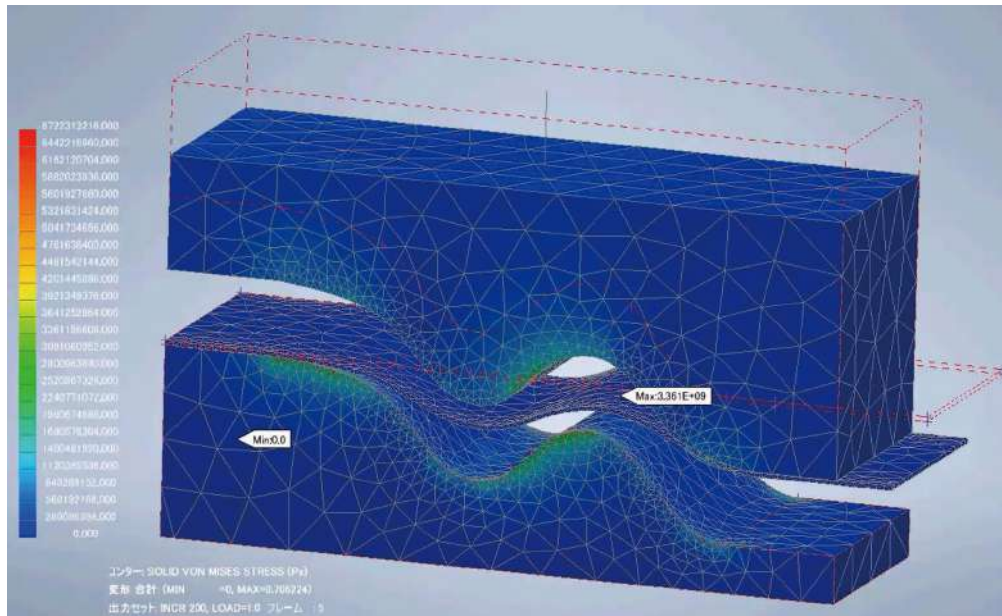
セメントの押出加工のパラメーターの制御

押出加工は「道具の拡張」を行える可能性が高いが、型を制作するだけでなく、設計者が型の形状に合わせて機械のパラメーターを制御できれば、生産により深くかかわることができると考えられる。セメント押出加工の機械のパラメーターは、型の形状や素材特性などによって導き出すことができる。そのため、作りたい部材の形状や素材特性を入力すれば、設計者が機械のパラメーターを決定できるようなアルゴリズムを制作した。このアルゴリズムを用いれば、設計者は作りたい形状と実際の加工を同時に考えながら自由度の高い制作を行うことができると考えられる。



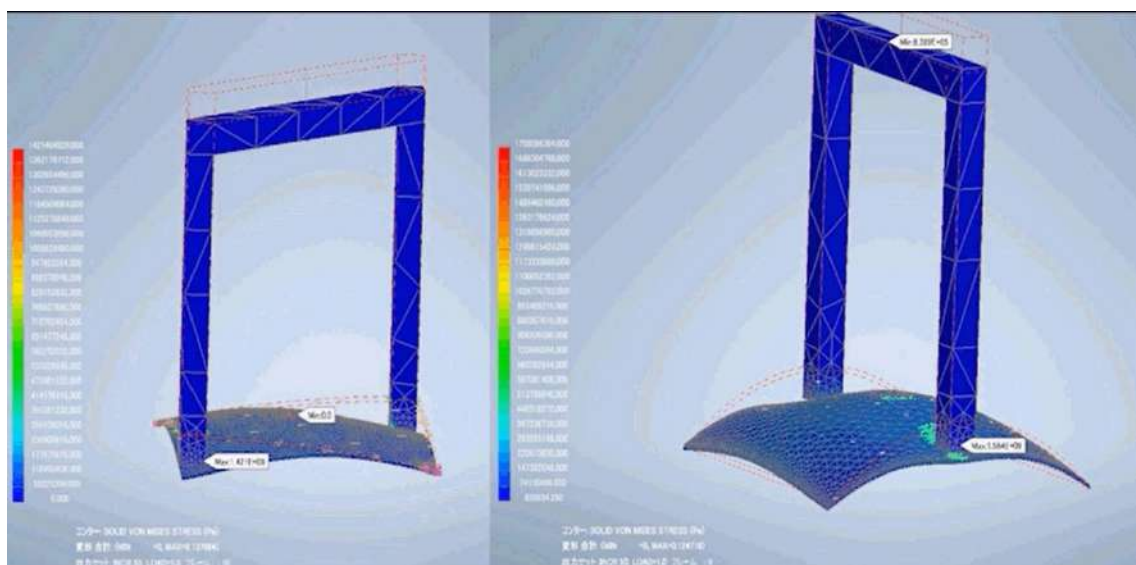
ロールベンダーのパラメトリックモデル

ロールベンダーのパラメトリックなモデルを作成した。回転軸を上下方向に移動させることで、曲率の調整や個別的な素材への対応を行う。



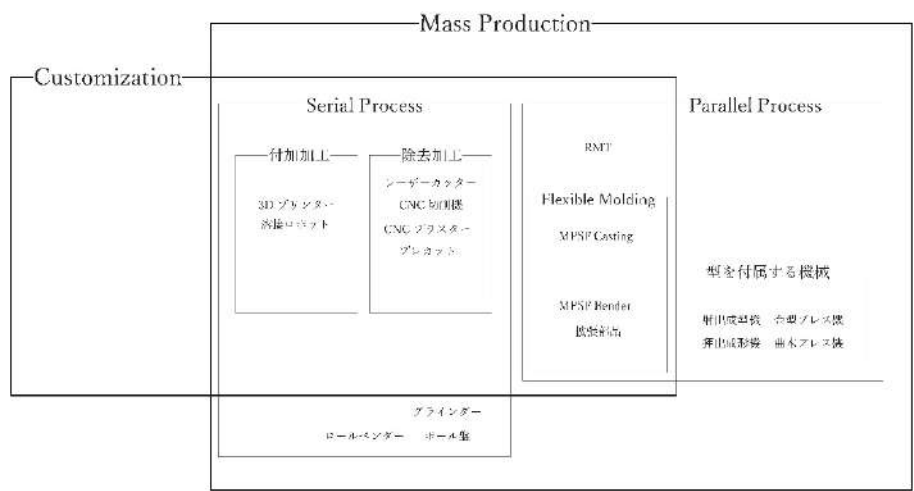
金属板パネルのプレス曲げの FEM 解析

曲げ加工は FEM 解析を行うハードルが低く、加工の挙動を把握しやすい。設計者が FEM 解析を用いて作りたい部材を作るための曲げ加工のシミュレーションを行えば、実際にその部材が制作可能かを自身で判断することができる。その一例として、金属板パネルのプレス曲げの解析を行った。



ガラスのコールドベントの FEM 解析

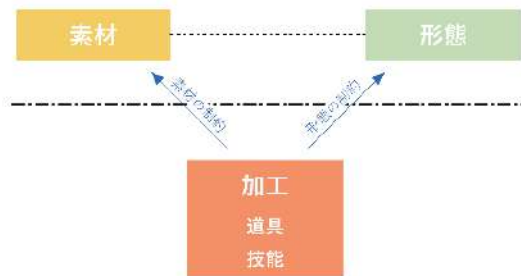
近年、低コストでガラス曲げを行う手法としてガラスのコールドベントが注目されている。ガラスを何点かの接点で押して曲げるような長さ調節可能な治具があれば、設計者が作りたい曲面形状のガラスのコールドベントを実現できると考えた。治具とガラスをモデル化し、FEM 解析によりコールドベントの加工シミュレーションを行った。



機械生産の分類

既存の機械をベン図により分類し、現状の機械生産を俯瞰的に把握することを試みた。

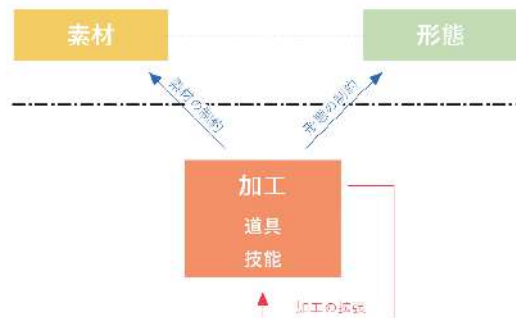
A. 一般的なプロセス



設計が先行

加工は形態・素材の制約を与える

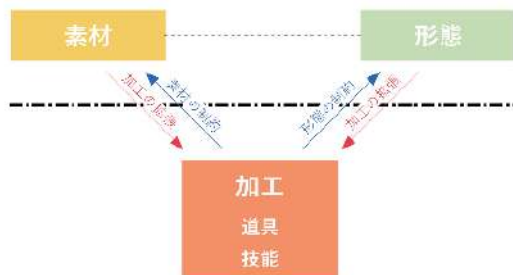
B. 自動化・プレカットなど



拡張は生産側で完結

加工による制約はむしろ強くなる

C. 一部デジファブなど

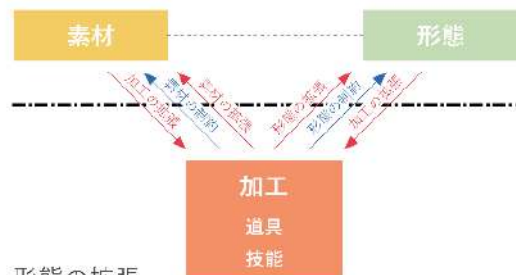


一方的に精度要求・カリブレーション技能要

新しい道具を開発するコスト大

熟練技能への依存

D. 今回の開発



形態の拡張

・ランダムさ・手仕事感

・模様・パターン

・自然な形状

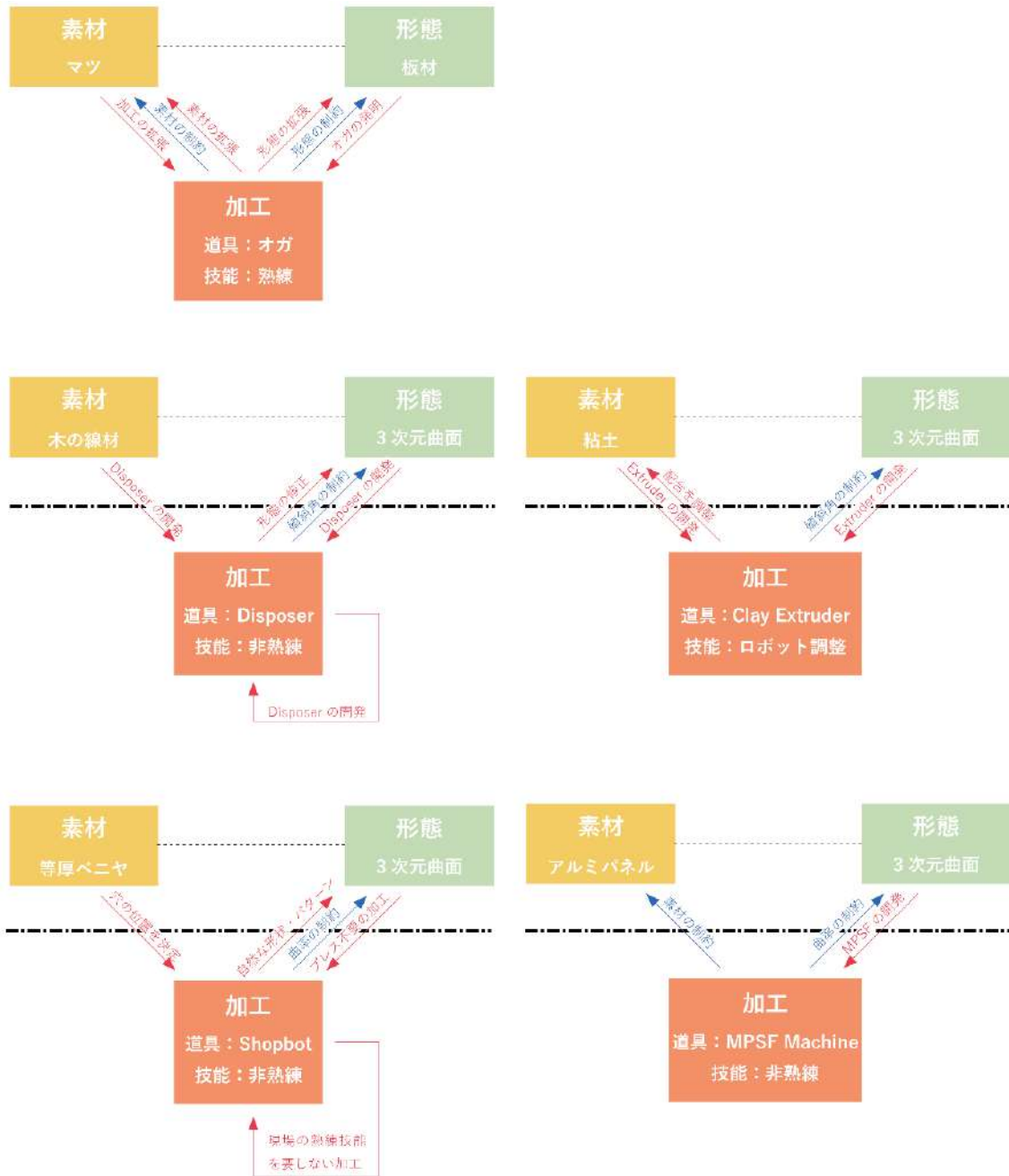
素材の拡張

・シミュレーションによる最適な素材

・道具に合う素材

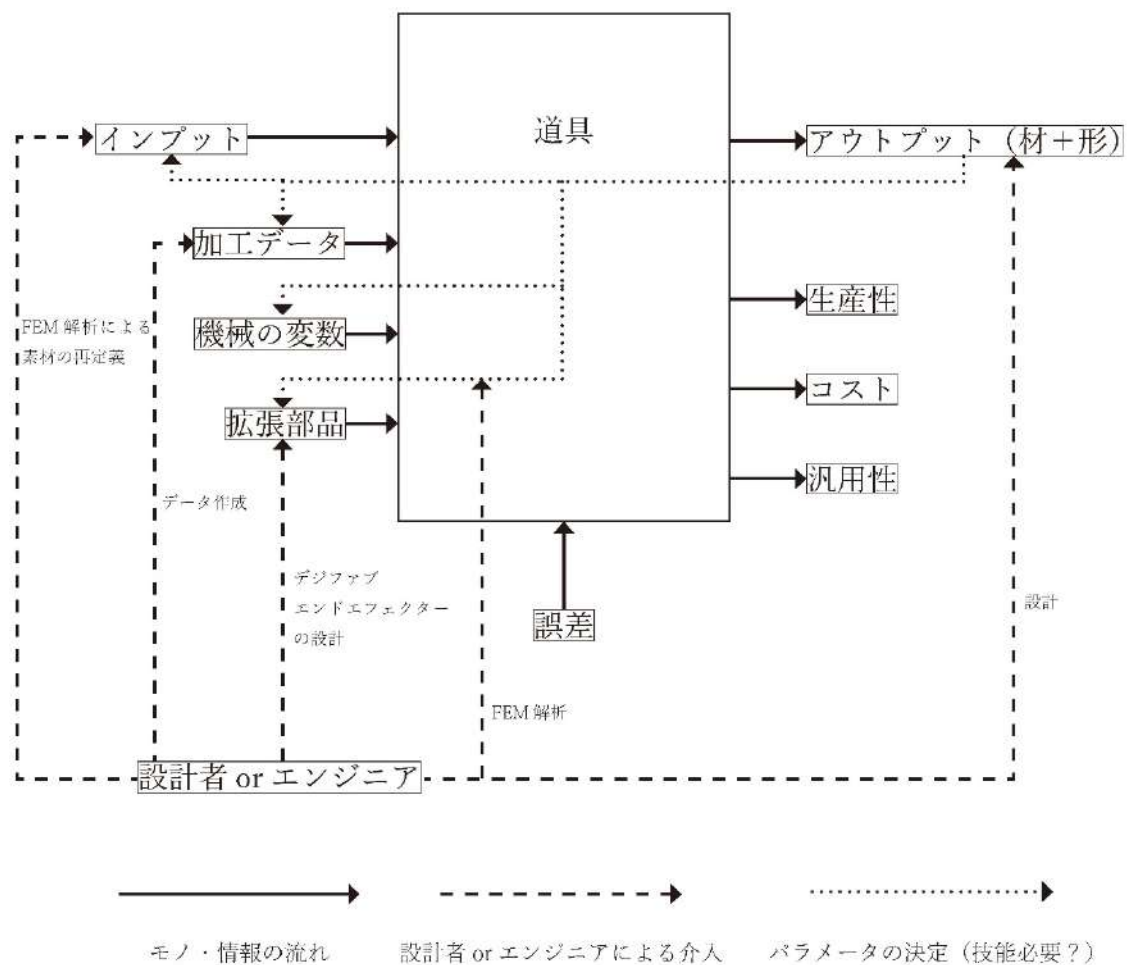
道具のモデル化

形態・素材・加工（道具・技能）の三者の関係性により、道具のモデル化を試みた。一般的なプロセスでは、道具・技能は形態・素材に対して一方的に制約を与える存在である。自動化施工やプレカットは、生産の効率化を図った結果、より一層形態・素材に制約を与える。これまでのデジタル・ファブリケーションは、形態・素材に合わせて道具を開発するが、プロセスが一方的であるために高度な技能・高コストを要する。そのため、形態・素材と道具・技能がたがいにフィードバックを与え合うプロセスが望ましいと考えた。



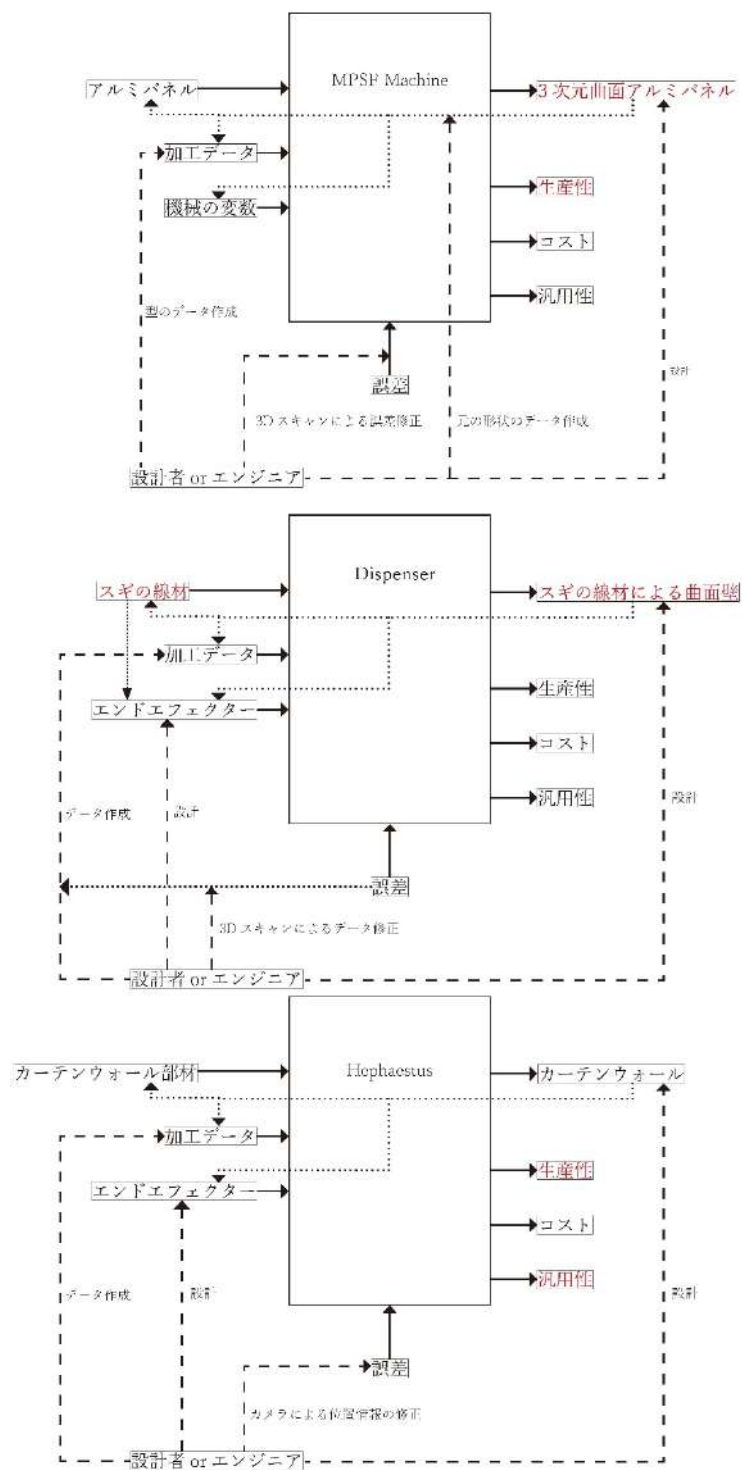
形態・素材・加工モデルの例

形態・素材・加工のモデルをオガ、STIK Pavilion の Disposer、Clay Extruder、Shopbot、MPSF Machine に適用した。



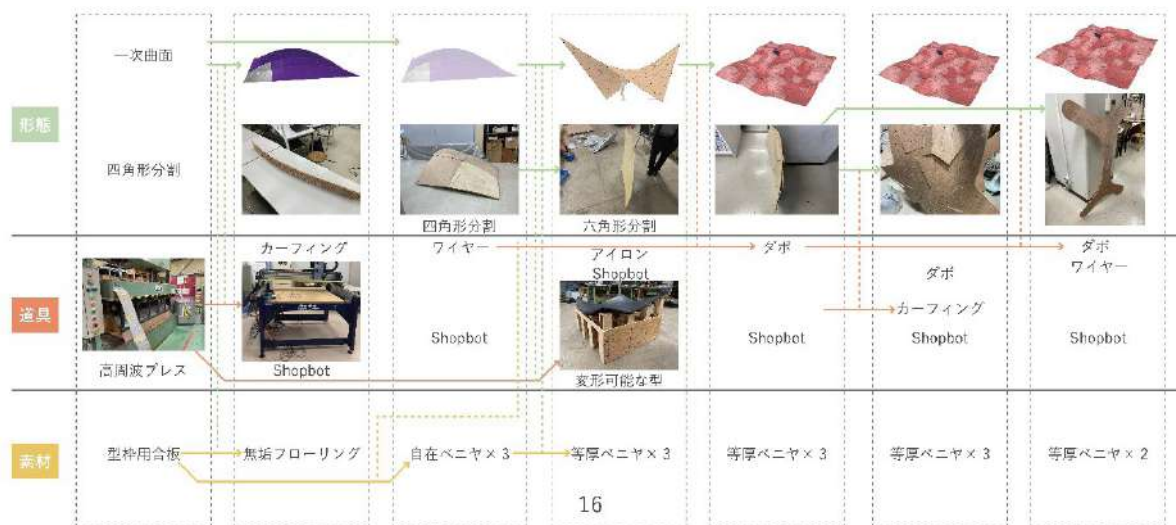
インプット・アウトプットによる道具のモデル化

道具をインプット（材料、加工データ、機械変数、拡張部品、誤差）とアウトプット（加工された材料、生産性、コスト、汎用性）によりモデル化することを試みた。さらにこの道具のインプット・アウトプットに設計者やエンジニアが以下に介入できるかを示している。



インプット・アウトプットによる道具のモデル化の例

インプット・アウトプットによる道具のモデル化を MPSF Machine、STIK Pavilion の Dispenser、Hephaestus（カーテンウォール設置ロボット）に適用した。



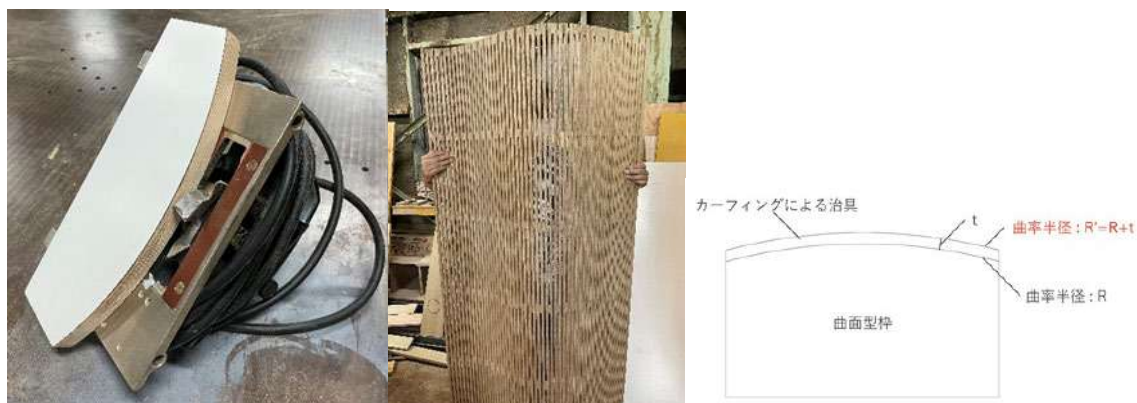
形態・素材・道具モデルによるプロセスの図式化

パビリオンの開発プロセスを形態・道具・素材の関係性によって図式化を試みた。形態、道具、素材が相互に影響を与えながら制作物が発展していくプロセスを視覚化した。



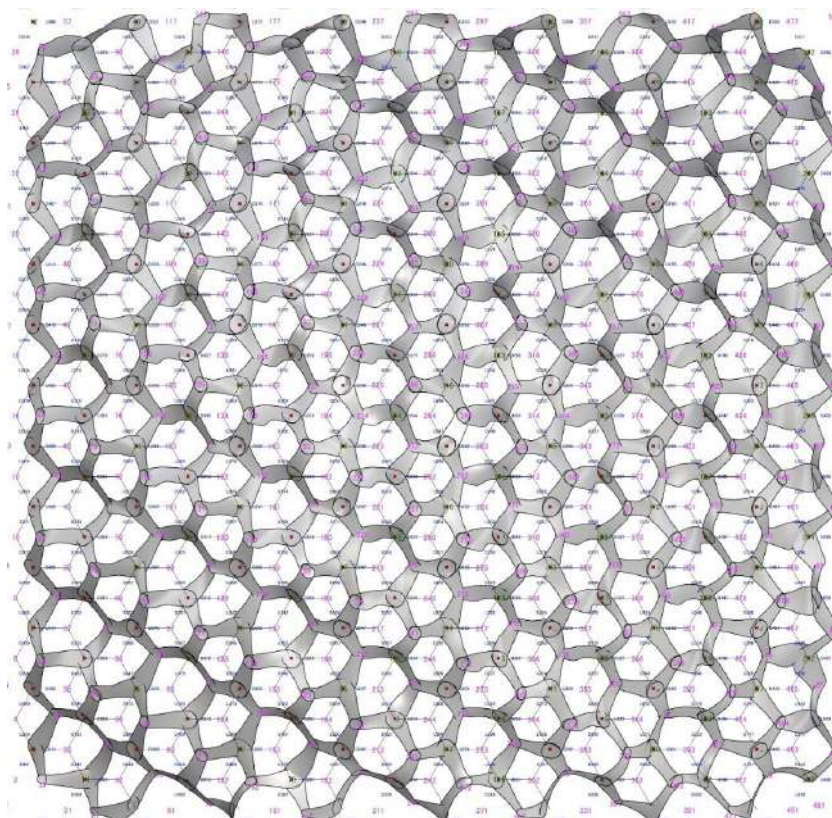
様々な合板、フローリングの熱曲げ、三又パネルのワイヤーによる曲げ、三又パネルのテンセグリティによる曲げ

材料は無垢フローリング、ラワンベニヤ、曲げベニヤ、等厚ベニヤ、コンパネを試行した。三又パネルを用いて様々な曲げ工法を試行した。三又パネルとワイヤーによって曲げながらテンセグリティ構造を形成するモックアップも制作した。



曲面型枠メーカーの見学

曲面型枠メーカーの堀江製函合板所への見学・インタビューを行った。電動工具に付属させる治具や、既成の曲面型枠よりも一回り大きなアールの曲面を作りたいときに使用する治具を CNC で制作するような「道具の拡張」がみられた。



施工情報を付与した俯瞰図

施工の際には三又ユニットのユニット番号、接点番号を付与した俯瞰図を用いてユニットの配置やワイヤー巻き取り作業を行った。このユニット番号や接点番号は部材にも CNC 加工で転写されており、この図面と部材を見比べることでだれでも混乱することなく施工を行うことができる。







