

修士論文2014年度（平成26年度）

建築生産におけるオープンデザインの研究

－局所分解・構成を可能とする木質三次元曲面製作技法の提案－

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科

秋吉 浩気

修士論文2014年度（平成26年度）

建築生産におけるオープンデザインの研究
－ 局所分解・構成を可能とする木質三次元曲面製作技法の提案 －

論文要旨

本研究では3軸CNCミリングマシンの使用を前提とした、局所的に分解・再構成可能な木質三次元曲面の製作技法を提案する。また、本提案手法を用いた社会における実践を通して、建築を生産することによるオープンなデザイン環境の実現を目指す。

近年、デジタルファブ리케이션機器による分散型生産システムの普及により、デザインの民主化が展開しつつある。既往研究における提案手法は、単に改変・継承可能なデータを提供するだけのオープンソースデザインの範疇に留まっており、双方向的／生成的ではない。デザインを代理する者が為すべきは、デザインの生成的な連鎖が起きるための「種」と、それが育つ「土壌」を提供する事ではないだろうか。

本論文では、離散的な「構法=種」の提案と、その「社会実装の手法=土壌」の提案を通して、建築生産におけるオープンデザインの可能性を提示する。

キーワード:

1. デジタルファブ리케이션, 2. デジタルマテリアル, 3. 継手・仕口, 4. 建築構法, 5. デザイン支援環境

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科

秋吉 浩気

Abstract of Master's Thesis Academic Year 2014

Open design for Social-Build
– Locally (re)configurable techniques
for fabricating three-dimensional surface in timber –

Summary

This research exhibits a novel construction method for fabricating three-dimensional wooden surface using a CNC milling machine. In addition, we aim to realize an open design environment for Social-Build through the social practices of the proposed method.

Recently, due to the spreading of the dispersed production system by digital fabrication machines, the democratization of design is becoming more common. On the other hand, previous studies have focused on an editable and the inheritable data format and they remain uninteractive. We think that the agent of design has to offer the field and seeds for causing generative design processes.

In this thesis, we describe the total ecosystem of open design through the prototyping and practice of proposed methods.

Keywords:

1. Digital Fabrication, 2. Digital Material, 3. Tsugite-Shiguchi, 4. Building Construction Method, 5. Design Support Tool

Graduate School of Media and Governance
Keio University

Koki Akiyoshi

「確信」を疑え。「認識」を疑え。いま「見えている」と信じている「世界」を疑え。見られているすべてには、それを見ている誰かがいる。その「見る者」の位置、「語る者」の位置を疑う事なく、何かを知ることはできない。何かを知り、おこなうことはできない。まず、すべてを疑え。徹底的に疑え。その上で自分自身が他の人々、あるいは人間だけでなく他のすべての存在との相互作用をつうじて（アクションをつうじて、つまりはただ生きることをつうじて）ともに生起させているこの「世界」の途方もない厚みとゆたかさに、覚醒せよ。

— 管 啓次郎 「文庫版 訳者あとがき」

【知恵の樹】—

目次

[0] 序論	
[0.1] 研究の背景	8
[0.2] 研究の目的と方法	9
[0.3] 本論の構成	10
[1] 導入	
[1.1] フィジカルな世界	12
[1.2] オープンデザインの四層構造	13
[1.3] 建築を生成する基盤	15
[1.3.1] PreFAB から FAB へ	19
[1.3.2] 自律分散協調の未来	22
[1.4] 建築する身体の獲得—Toward Social-Build	25
[1.4.1] 空間／都市生産のプラクティス	28
[1.4.2] Co-Repeat Prototyping と LEGO	32
[2] 背景	
[2.1] パーソナルファブ리케이션と景観	36
[2.2] メタアーキテクトの系譜	37
[2.2.1] Christopher Alexanderと建築生産の7原則	38
[2.2.2] N. J. Habrakenとモジュール開発	39
[2.3] 日本建築のメタデザインシステム	41
[2.3.1] 工匠というメディウム	43
[2.3.2] 西暦2400年の伝統構法へ	44
[3] 問題	
[3.1] 表現可能形状の物理的制限	52
[3.2] ファブ리케이션の複雑性	53
[3.3] 非冗長性／非拡張性	54
[4] 仮説	
[4.1] 構法学的転換—機械制約からの出発	56
[4.2] 超矛盾系の提案—エフェメラリティ	57

[5] 関連研究	
[5.1] デジタルマテリアルの研究	60
[5.2] 継手・仕口の研究	66
[5.3] 本研究の位置づけ	70
[6] 手法	
[6.1] ジオメトリの離散化	75
[6.2] エレメントの離散化	79
[6.3] マテリアルの離散化	85
[7] 設計	
[7.1] CaseStudy01－原型モデル	89
[7.1.1] 実装	90
A) Prototype01－離散的手法の実証	91
B) Prototype02－局所分解性の実証	93
C) Prototype03－局所構築性の実証	96
[7.1.2] 評価	100
A) Workshop01－CRPによる壁の設計	102
B) Workshop02－CRPによる屋根の設計	109
[7.1.3] 考察	114
A) 貢献	116
B) 意義	117
C) 発展	120
[7.2] CaseStudy02－有限要素モデル	121
[7.2.1] 実装	122
[7.2.2] 評価	124
[7.2.3] 考察	127
[7.3] CaseStudy03－構造体モデル	128
[7.3.1] 実装	131
[7.3.2] 評価	136
[7.3.3] 考察	138
[8] 結論	140
参考文献	
謝辞	

[0] 序論

[0.1] 研究の背景

近代合理性による「空間を超えていく普遍性」の獲得は、世界中の伝統的風景や自然環境等、あらゆるモノを恐るべき速度で“消費”してしまった。一方、その後が続く時代が模索したのは「時間を超えていく普遍性」の獲得であった。ここで主役に躍り出たのは“生産”と“市民”である。人々の「生産の営み」がコミュニティをつくり、その共同性の現れが風景として現出していたということに、多くの建築家達が気付きはじめたのである。

現在では、市民による積極的なデザイン行為、すなわち「デザインの民主化」が実現しつつある。このことは、簡易なCAD/CAMの登場と、安価で高性能なデジタルファブ리케이션機器の普及が可能としている。

他方で、オープンデザインという概念も登場した。これは、オープンソースソフトウェアやオープンコンテンツ等の延長線上に位置する。オープンデザイン財団の定義によると、「オープンデザインとは自由な頒布と記録が許可され、さらに改変や派生まで認められたデザインである。」という (Bas Van Abel 他, 2011)。たしかにアクセシビリティはオープンであるが、「どのようなオープンなプロセスでデザインを行うか」や、「どのようにして派生/改変を行うためのリテラシーを獲得するか」といった点はデザインの射程にないのである。すなわち、WikiHouse や CC houseに代表される、他者の付け入る余地のない“完成された”データをアップロードし、ライセンスを付加するだけのデザインは、「オープン“ソース”デザイン」に過ぎないのではないだろうか。

そこで、これら二つのオープンムーブメントを統合する必要性があるだろう。Victor Papanek (1923~1998) の『Nomadic Furniture』や Walter Segal (1907~1985)の『Segal Method』は、構法支援によるデザインのオープン化を目指し、垣内光司や Rural Studio らはオープンネスを体現する為の身体性の構築方法を模索している。このような「デザイン支援環境のデザイン」を含めて、オープンなデザイン、オープンデザインと呼ぶべきではないだろうか。したがって、完成されたデータを一方的に与えるのではなく、主体性の入り込む余地のある“メタモルフォーゼ”可能なデザインの「種」と、その種を育てることのできるような「土壌=身体性」を構築する必要があるのではなかろうか。

[0.2] 研究の目的と方法

本研究では、このような自律的で生成的なオープンデザインの生態系を生み出す事を目的とする。その実現方法として、「構法=フィジカルなファイルフォーマット」の提案と、それを用いてデザイン活動を行うための「社会実装の手法」の提案を行う。

まず、前者に関しては『Digital Frame』という、局所的に分解・構成可能な木質三次元曲面製作技法の提案を行う。具体的には、「幾何学形状の離散化」「構成要素の離散化」「部材の離散化」という三つの離散化手法を用いて実装を行う。

つぎに、後者の手法に関しては『Co-Repeat Prototyping = CRP』という、迅速にプロトタイピング/フィードバックのループを回すことによる共創型設計手法を提示する。具体的には、LEGOブロックや粘土等の、人々が簡単にプログラム可能な「メEDIUM=媒体」を用いて、ユーザー主導による設計を行う。

このように、本研究は「建築生産」を基点として、構法=《オブジェクト》の提案を行い、さらにその社会実装=《プラクティス》を行う事を通して、「オープンデザイン」全体を俯瞰することを目指す。

したがって、本研究の研究方針は、研究のための研究(先行研究や関連研究の見取り図を作る事)は行わず、本研究が提案する手法の「製作」とその「実践」を通して研究領域全体を浮き彫りにすることを目指す。

[0.3] 本論の構成

本論文は「導入」「背景」「問題」「仮説」「関連研究」「手法」「設計」「結論」の8章から構成されている。

第1章では、オープンデザイン環境を構成するための四つのレイヤーを導入し、とりわけ《プラクティス》のレイヤーの重要性について述べる。

第2章では、建築生産におけるオープンソースデザインの危険性を考察する。景観の無秩序な生成を回避するために、「オープンなデザイン環境のデザイン」を行うメタアーキテクトの系譜について述べる。また、近代以前のオープンデザインの生態系の分析を通して、伝統構法との歴史的接続の必要性について問う。

第3章では、メタアーキテクトとして《オブジェクト》を提案するにあたって、既存の構法における三つの問題点を提示する。

第4章では、これらの問題点を解決するための仮説を提示する。

第5章では、仮説を実現するための手がかりとして『デジタルマテリアルの研究』と『継手・仕口の研究』を紹介する。

第6章では、関連研究の手法を応用した、局所的に分解・再構成可能な木質三次曲面製作技法を提示する。

第7章では、この手法を用いた三つのケーススタディを展開する。一つ目は、手法の妥当性を実証するための「製作」と、それを用いた社会における「実践」である。二つ目は、ここで浮上した「相互性不足」の問題を解決するために、ユーザーがリアルタイムに空間を探索可能な開発キットを提案する。三つ目は、浮上したもう一つの問題である「構造安全性」について述べ、試作を行うことで検討を行った。

最後に第8章では、これら三つのケーススタディを通して判明した、「建築生産におけるオープンデザイン」を実現するためのパースペクティブを示す。

[1] 導入

[1.1] フィジカルな世界へ

China Miéville (1972～) のSF小説『都市と都市』には、殺人事件の犯人が二つの都市の境界線を利用しながら逃走を計るシーンが描かれている。同一の空間を共有しながらも、互いを見ることを禁止された都市《ベジエル》と《ウル・コーマ》が織り成す物語であるが、その境界線において人は”シュレーディンガーの通行人＝存在と非存在の重ね合わせ”となる。クライマックスでは、主人公ポルル警部補が、都市と都市の間に存在する秘密組織《ブリーチ》の一員として迎えられ、「自由な越境者」となったところで幕が降りる。

$$F = (B \text{ and } A)$$

デジタル空間
デジタル空間
フィジカル空間

図1.1 フィジカル空間＝情報空間かつ物理空間

デジタルアプリケーションの登場は、ビット（情報空間）とアトム（物理空間）の重ね合わせとしての「フィジカル空間」を産んだ（図1.1）。このような空間を自由に駆使し、デジタルとフィジカルを完全に等価に扱う事のできる世界/感性を「フィジカルな世界/感性」と呼ぶ（田中浩也, 2014）。

かつて、江戸と非江戸の重ね合わせとして出現した『両国橋』の存在は、多種多様な人物が入り乱れるアジールを成立させたが、そこには職業・文化の無限のグラデーションが存在し、己の存在こそが職であり名であった。

このような江戸の文化を解体した {近代} の成立以降100余年が経つが、この新しいフィジカル空間の出現は、我々を「自由な越境者＝フィジカルな感性を備えた者」へと変貌させ、新たな職業・文化を産出する事を可能とするのだろうか。

[1.2] オープンデザインの四層構造

フィジカルな世界が可能とするデザインの一つに、ユーザー主導や共創をキーワードとした、オープンデザインという概念がある。このデザイン環境を可能としているのは、デジタルファブリケーションによる分散型生産システムなのであるが、Michel Avital が纏めたオープンデザインの定義を（表1.1）に示す。

表1.1 Open design =/≠

	Open design =	Open design ≠
アクセス	オープン	クローズド
設計図	デジタル	アナログ
派生物	再構成可能・拡張可能	ブラックボックス・固定
排他性	複製可能	有限・一回限り
生産手段	デジタル	アナログ
製造工程	分散型	中央集権型
潜在力	生成的	閉鎖的

この図から解る通り、デジタルデータを単にアップロードし共有するだけの「オープンソースデザイン」はオープンデザインの部分集合に過ぎない。クローズドな設計プロセスで作成された図面データを公開するだけではオープンデザインとは呼ばず、生成的な連鎖が起こりえないデザイン、拡張不可能なデザインもまた同様である。したがって、本研究は「建築生産におけるオープンデザインの研究」と銘打ってはいるものの、その実、「建築生産における批判的オープン（ソース）デザインの実践」なのである。

一方で、Michel Avital はこのようなオープンデザイン環境を構成するものとして《インフラストラクチャ》、《プロセス》、《オブジェクト》、《プラクティス》の四つのレイヤーがあると述べている。これらの4層による分類を“継承”し、ここに四象限として再構築する（図1.2）。

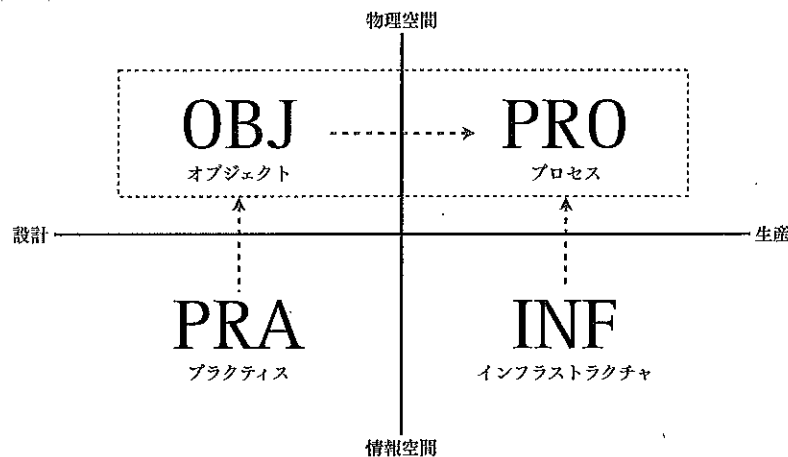


図1.2 オープンデザインの四象限

まず、第1層は《インフラストラクチャ》のレイヤーである。生産における情動的側面を担い、FabLab等の技術的基盤や、建築基準法などの制度基盤を指す。続いて、第2層は《プロセス》のレイヤーである。生産における物理的側面を担い、3DプリンタやCNCミリングマシン等の生産手段を指す。さらに、第3層は《オブジェクト》のレイヤーである。設計における物理的側面を担い、出力される人工物の仕様・形式を指す。このノーテーションがオープンデザインの質を規定しているという仮説から、本研究はこの階層における《オブジェクト》の提案を研究目的とする。最後の第4層は《プラクティス》のレイヤーである。設計における情動的側面を担い、《オブジェクト》を用いてどのように実装するのかといった方法論や、《オブジェクト》を規制するモジュール等の規範を指す。

以上がオープンデザインの四層構造の概要であるが、1章3節では《プロセス》と《インフラストラクチャ》に、1章4節では《プラクティス》に焦点を当て、具体的な活動を踏まえて述べていく。また、6章以降では本研究が提案する《オブジェクト》とそれにとまなう《プラクティス》について述べる。

[1.3] 建築を生成する基盤

前節ではオープンデザイン全体における四層構造を記したが、本節では建築生産のオープンデザインにおける第2層《プロセス》と第1層《インフラストラクチャ》について述べる。

デジタルファブ리케이션には大きく分けて、3Dプリンタに代表される「加算系」と、CNCミリングマシンに代表される「減算系」があるが、本研究では後者をメインの《プロセス》として選定する。とりわけ、本研究においては、大型3軸CNCミリングマシン「Shopbot」を使用する（図1.3）。



図1.3 Shopbot

CNCとは、Computer Numerical Control（コンピューター数値制御）の略称であり、CAMでツールパス＝切削工程を作成し、掃き出した位置情報をコンピューターを介して機械に送信することで加工を行う。スピンドルの先端についたドリルビット（図1.4）が高速に回転しながら、XYZ軸それぞれに取り付けられた4つのモーターが稼働することによって、対象物は削り出されるのである。

また、ShopbotのXY平面における切削加工範囲は最低でも4×8板の建材を切る事が可能な大きさである。PartWorksというCAMを用いてツールパスを作成するが、ユーザーが指定すべきパラメーターとしては大きく分けて7つある。「ビットの形状」「ビットの直径」「切削方向」「主軸回転数（RPM）」「切削深さ（ステップダウン）」「ピックフィード（ステップオーバー）」「送り速度（フィードレート）」である。

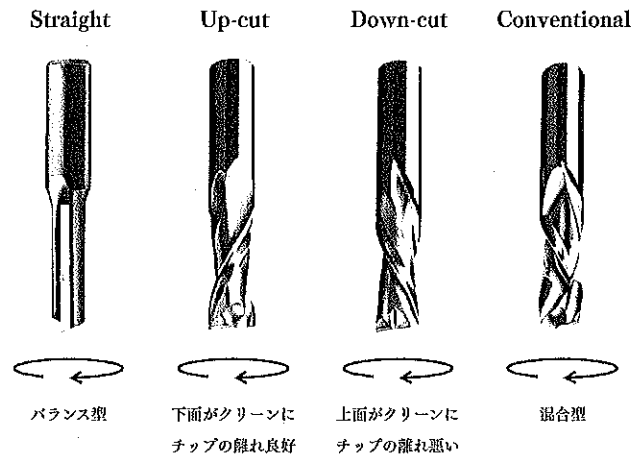


図1.4 標準的なBit 4種

まず、「ビットの形状」「ビットの直径」についてであるが、基本的なビットの形状は4種類ある。特徴や違いについては(図1.4)に整理する。ビットの回転方向(右回り)と、それに対する刃の形状の違いによって仕上がりに差がある。また、3次元の切削を行う場合は先端が丸まっている「ボールノーズビット」を用いるなど、ビットを提供するメーカーによって形状は多種多様である。さらに、工具の直径については代表的なものに「1/2インチ」「1/4インチ」「1/8インチ」「1/16インチ」の4種類ある。径が小さいもの程繊細な加工が可能であるが、切削時間はその分増え、たわみを考慮した設計上、切削可能な深さは浅くなる。

以下に述べるその他の切削パラメータは、このような工具それぞれについて、各々のパラメータを定めなければならない。

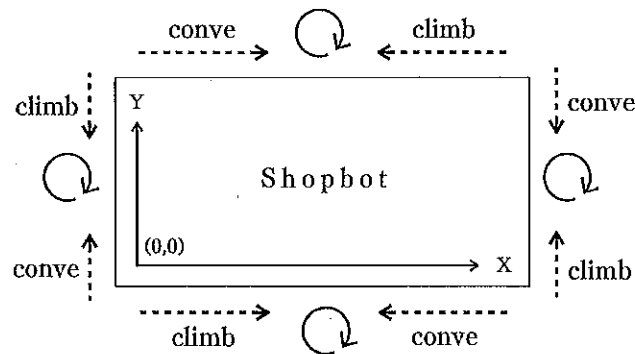


図1.5 Conventional/Climb

次に、「切削方向」であるが、「アップカット=Conventional」と「ダウンカット=Climb」の2通りある(図1.5)。違いとしては、切削抵抗のかかり具合や、それに伴う切削面の粗さに影響が生じる。アップカットは進行方向にビットをスライドしていくが、ダウンカットはビットが素材を押しつける形になる。そのため一般的には、ダウンカットの方がビットの摩耗が少なく、アップカットの方が切削面が綺麗に仕上がるといわれている。

続いて、「主軸回転数(RMP)」であるが、切削速度V(周速)は以下の式によって求められる。この式からVを一定とすると、径の大きいものを使用する場合、回転数を抑える必要があり、逆に小さいものを使用する場合は、回転数を高める必要があることが解る。

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000}$$

V: 周速 [m/min],

D: 工具直径 [mm],

N: 主軸回転数(RPM) [min^{-1}]

さらに、「切削深さ(ステップダウン)」であるが、これはツールパス一周当りの切削深さである。切込みを深くとれば、その分加工時間は短縮されるが、切削抵抗が増す。例えば、12mmの材を切削する場合、3mmに設定すれば4周かかり、4mmに設定すれば3周で済むといった具合である。

そして、「ピックフィード(ステップオーバー)」であるが、工具送り方向に垂直な方向(XY軸方向)における単位時間当りの移動量を表し、XY軸方向の表面粗さを決定する。理論的粗さは近似的に以下の式で表される。したがって、同一加工条件下において、工具半径が大きい程、ピックフィードが小さい程、粗さが小さくなる。

$$\frac{P f^2}{8R}$$

Pf: ピックフィード [mm/min],

R: 工具半径 [mm]

最後に、「送り速度（フィードレート）」であるが、以下の式で求められる。工具送り方向（Z軸方向）における単位時間あたりの移動量であるが、Z軸方向の表面粗さを決定する。一般的には大きい値をとるほうが工具摩耗を抑えることができるが、大きくとりすぎると切削抵抗が増大する。また、送り速度の最大は5080[mm/min⁻¹]程度であると言われており、この値を超えないように設定する事が重要である。

$$F = C \cdot D \cdot n \cdot N$$

F: 送り速度(FeedRate) [mm/min],

C: チップロード (ChipLoad) [1/刃] ≒ 0.005~0.01,

D: 工具直径 [mm],

n: 刃数 [刃],

N: 主軸回転数(RPM) [min⁻¹]

以上のようなパラメータを駆使することにより加工を行うものがCNCミリングマシンであるが、Shopbot が広いユーザー層を獲得している背景には、これらの標準パラメータのデータベースをCAM上で提供している点が挙げられるだろう。したがって、基本的にはユーザーはビットの種類と径を選ぶだけで良いのである。

[1.3.1] PreFAB から FAB へ

さて、以上が《プロセス》のレイヤーの詳細であるが、このようなプロセスを用いて、建築生産における応用を計ってきたパイオニア的研究グループがある。Massachusetts Institute of Technology（以下MIT）のLarry Sassらの研究グループである（図1.6）。

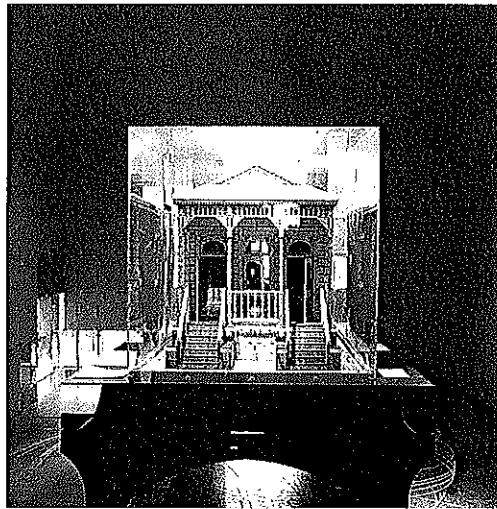


図1.6 A house for new orleans

(Larry Sass <<https://architecture.mit.edu/faculty/larry-sass>>)

彼らは、Shopbot で加工可能な規格合板を用いた建築構法の開発を行ってきた。とりわけ、2Dの部材から3Dの構造体を作成する為の「生成文法」の研究を行っており、任意の形状を彼らの設計した構法＝《オブジェクト》に変換することが可能なツールの作成が目指されている。この研究の背景には、Center for Bits and Atoms（以下CBA）のNeil Gershenfeld が提唱した「FAB」に代表される、高性能化・低価格によるデジタルファブリケーション機器の普及に伴った、分散型ファブリケーション・ネットワークの思想がある。

建築生産の文脈において「PreFabrication=予め製造しておくこと」(以下PreFAB)というジャンルがあるが、この研究はその延長線上にある。しかし、決定的に異なるのが、「予め製造したモノを送る」(図1.7)から「予め設置された機械にデータを送る」という考え方の違いである。Shopbotのような安価で普及した機械の《インフラストラクチャ》さえあれば、予め作成したデータとパラメータを送信することによって、同等の品質の加工が異なる場所でも可能である。これにより、輸送量や輸送時間などのコストを大幅に削減する事が可能となる。

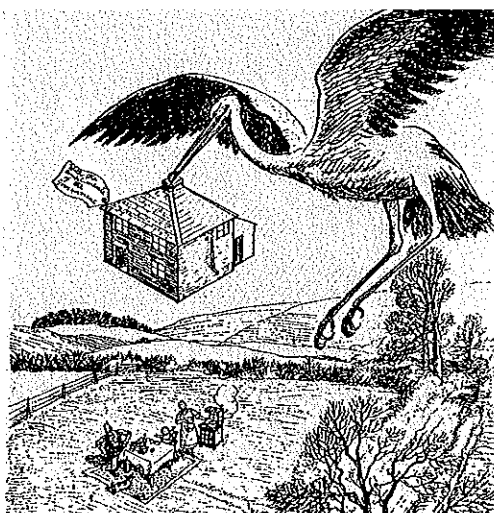


図1.7 PreFAB

(John Cloaghton, Grey Worhthum, "House out of Factory", 1944)

このような、PreFABとFABの違いを(表1.2)に示す。「予め製造したモノを送る=Off Site」という考え方は、同時に、「予め一定量ストックしておく=Just In Case」の考え方であるが、一方で、「予め設置された機械にデータを送る」という考え方は、現地の材料と現地の人材を用いて(On Site)、「必要な時に必要な分だけつくる=Just In Time」事が可能なのである。

また、既存の生産工程では「画一的な」「より少い品種を」「大量に」生産することで合理化しているが、FABにおいてはデジタルファブリケーションの恩恵を受けて「個別的な」「多量の品種を」「必要な分だけ」生産可能である。

さらに、単位要素に関しては、元来「レンガブロック」のように「人の手で運び易い大きさ」によって規定されていたが、PreFABにおいては、施行効率・

部材効率の合理化を計る為、大型化が進んでいる。一方で、FAB においては、個人が自分で作ることを前提としているため、重機を用いる必要性がない様な小型の構成要素による設計／生産が進められている。

表1.2 PreFAB/FAB

	PreFAB	FAB
生産方式	オフサイト	オンサイト
生産体制	ジャストインケース	ジャストインタイム
生産体系	少品種大量生産	多品種適量生産
志向性	画一化	個別化
単位要素	大型	小型
システム	クローズド	オープン
価値観	3K(汚い/キツイ/危険)	Fabulous(嬉しい)

そして、生産システム全体に関してであるが、多くのPreFABメーカーは各社独自の部材システムを用いているため、基本的にクローズドなシステムである。一方で、FAB ではオープンデザインの文脈下にあるため、各々のデータはオープンソースで公開され、自由に寸法・形状の変更が可能であるような、極めてオープンなシステムである。

極めつけは価値観の違いである。当然ながら、PreFAB の建築を提供しているのは企業なのであるが、建設業界全体を俯瞰すると労働（きつくて／汚く／危険な）というイメージが強い。一方で、FAB は「自分（達）の為に、自分（達）の為に」建設が行われるため、「楽しさ」という感情が先行し、付加価値として製作物に「愛着」が湧くこともある。

[1.3.2] 自律分散協調の未来

以上、アカデミズムにおける研究事例と、PreFAB と FAB の根本的な差異について述べたが、プラクティカルな領域で実践を行っている事例も紹介する。ロンドンに拠点を置く『Facit homes』である（図1.8）。彼らは、PreFAB と FAB 両方の利点を合わせた住宅供給ビジネスを行っている。

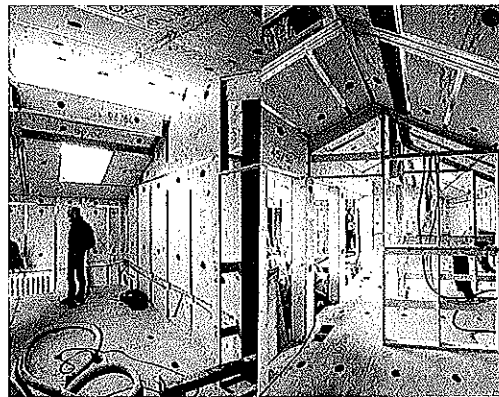


図1.8 Facit homes

(Facit homes <<http://facit-homes.com/>>)

彼らが『D-Process』と名付けている設計／生産システムは、BIM やパラメトリックデザインを設計手法として用い、設計プロセスは基本的には「クライアント／アーキテクト」モデルである。

まず、建設現場にコンテナに搭載した CNC を持ち込み（On-Site）、少数の作業員で8週間かけて躯体の部材を切り出し、BOX状の単位要素を組み立てる。躯体が完成した段階で、ローカルな職人を雇い、仕上げ・電気配線等を施していく。最後に、本社の工房で作成した高度な加工機器による特注品（家具・階段など）を現場に送付し（Off-Site）完成する。以上のように、既存の生産プロセスと新しい生産プロセスを配合しながら、7ヶ月で住宅の建設を行う（Bruce Bell, 2013）。

このように、CNCミリングマシン単体でも十分に利益／仕事を生み出すことが可能（自律可能）であり、建築内部に設置すれば“自律的な”建築の新陳代謝が可能となる。



図1.9 FabLabMap_Netherlands

(Fab Foundation <<https://www.fablabs.io/labs>>)

一方で、Shopbotのような工作機器を用いる最大の利点としては、インターネットを介して“分散”型工房のネットワークと通じる事ができる点である。デジタルファブリケーション機器を備えた分散型市民工房『FabLab』は、2014年12月現在、日本に12カ所、全世界に440カ所存在する（図1.9）。また、先述したShopbotはFabLab標準搭載の機材であり、個人所有のものを合わせると全世界に7000台存在する。このような同じフォーマットに基づいたネットワークを用いれば、シームレスに情報共有／学習が行え（Share／Learn）、世界のどこにいても同様のものづくりが可能となる（Make）。

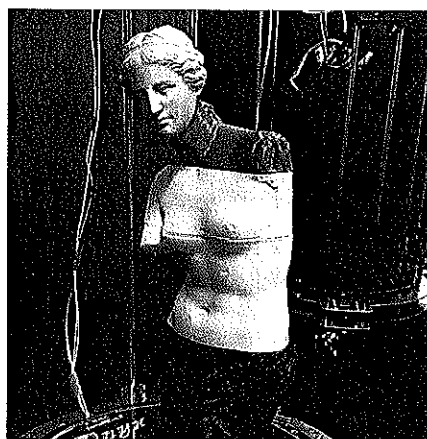


図1.10 分散FAB

(増田 恒夫 <<http://fab.sfc.keio.ac.jp/>>)

ところで、この7000台の Shopbot とつながる事で、どのような事が可能だろうか。（図1.10）のように、複数台の同種の分散したマシンが“協調”し、出力データをシェアすることで、一つのデータにかかる出力時間を大幅に削減することが可能である。多くの工房では深夜時間帯等、マシンが「遊んでいる」状態が多く、マシンの回転率が悪い場合がある。例えば、Amazon Elastic Compute Cloud (Amazon EC2) のようなクラウド上での《インフラストラクチャ》が整備されれば、近隣の「遊んでいる」マシンとコンタクトを取り、協同することで、発注者は納期の短縮が、受注者はマシンの運転効率を上げることが可能となる。

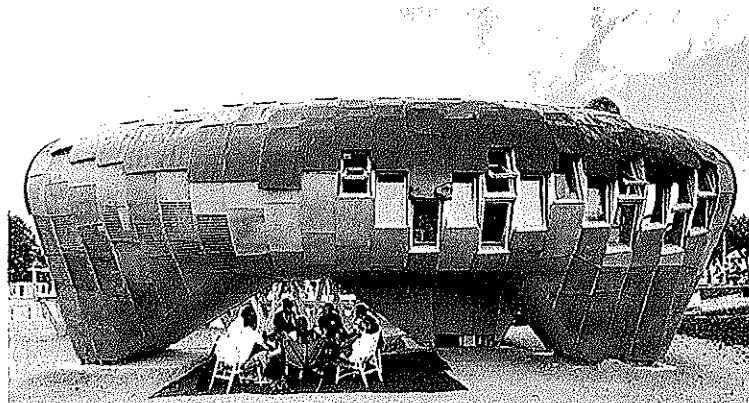


図1.11 Solar Fab House

(FabLabBarcelona <<http://www.fablabhouse.com/en/>>)

また、このようなタスクレベルの話だけでなく、一番の魅力は、おなじフォーマット／ネットワークを共有していることで、世界中の FabLab に所属するデザイナー／エンジニアと“協同”して、互いの知恵を出し合うことで、一つの建築をつくることも可能であることだ（ソーシャルビルド）（図1.11）。

このように、自律的で分散的で協調的な《インフラストラクチャ》が立ち現れつつあるのである。

[1.4] 建築する身体の獲得—Toward Social-Build

本節では建築生産におけるオープンデザインの第4層《プラクティス》のレイヤーについて述べる。

実は、オープンデザインの要石はこの《プラクティス》のレイヤーである。なぜならば、いかなる優れた機械、いかなる優れたデザイン、いかなる優れた構法、いかなる優れた方法論が揃ったところで、それを実際にユーザーが使うことができなければ何の意味も為さないからである。

つまり、「素人にとって使いやすい機械／インターフェースが世の中に普及すること」と、「それを実際に素人が思い通りに使う事が出来る」ということは必ずしも同値ではない。この溝を埋める事こそが、オープンデザインを稼働させる為に必要なエンジンなのであり、最大のデザイン対象なのである。

したがって、オープンデザイン環境を構築するには、人々それぞれのデザインリテラシーを高める必要があるが、建築生産においては、生活者各々が、各々の身の回りの環境（環世界）を能動的に読み替え／改変し続けることが出来るような「建築する身体」を獲得しなければならぬ。すなわち、20世紀的なクローズドな建築という「名詞」から、21世紀的な建築(する)というオープンな「動詞」への転換が求められているのである。

$$HO = (1.PR, 2.VE, 3.HS)$$

住まい

プリミティブ

ヴァナキュラー

ハイ・スタイル

図1.12 住まいの三種

一方で、このような個人に於ける身体性も然ることながら、社会全体のスケールにおいても、このリテラシーを高める必要がある。何故ならば、建築とは単体であることと同時に、社会的な存在であるからだ。A.Rapoport (1929～) は、住まいの形式を三つに分類した (A.Rapoport, 1969) (図1.12)。自律的な住人が、専門家なしで、同等の材料によって、同等の形式を無自覚に、反復的に建築する方式《プリミティブ》と、すまいの共通言語を作り出す専門家（職人）が

出現し、彼のファシリテーションによって共同体で建築を行う方式《ヴァナキュラー》、そして、住み手と作り手が極度に分断し、住み手が建設に参加せず、住宅の仕組み／作り方に無関心／無知であるような現在の形式《ハイ・スタイル》の三種である。

また、乾尚彦（1953～）はこのような三種類のうち、《プリミティブ》と《ヴァナキュラー》における共同体による家づくり＝「結（SocialBuild）」（図1.14）のシステムを、「相互扶助の四面体」として纏めている（図1.13）。

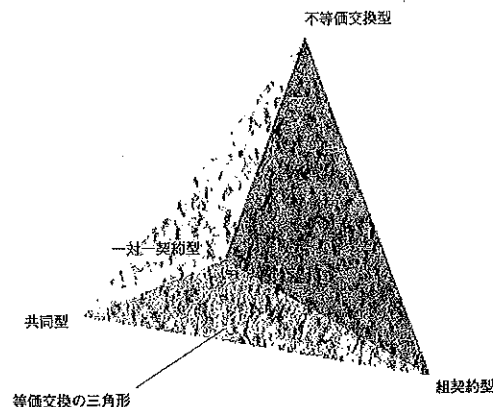


図1.13 相互扶助の四面体

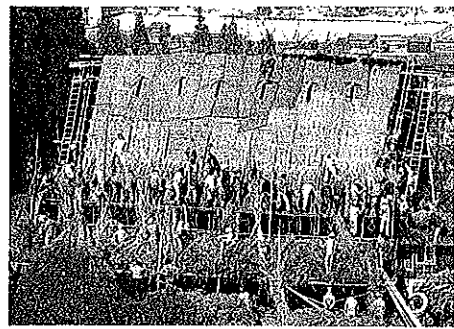
（安藤 邦広, 乾 尚彦, 山下 浩一『住まいの伝統技術』1995）

まず、《不等価交換型》であるが、近代技術における普遍的なやり方で、労働力や建材に対して報酬によって応える場合である。つぎに、《一対一契約型》であるが、個々人の間で、信頼関係に基づき互酬性によって労働交換を約す場合である。続いて、《組契約型》であるが、数10名で構成される組によって、全員が一体となって、順番に組の構成員の建設を行う場合である。最後に、《共同型》であるが、共に作業を行うことが当然とされた共同体において、利益・労働を共同体無内で分配する場合である。また、これらを頂点とする四面体内に、各地方の相互扶助の仕組みは位置づけられる。

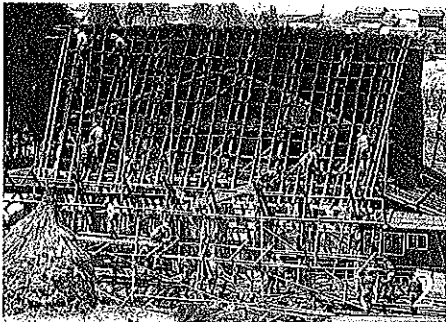
このように、共同体による建築方式には各地域によって多様に存在したが、再び“生産”が住まいの中に戻りつつある現在、オープンデザインのコンテキストにおいて、どのような相互扶助の仕組みを作ることが可能だろうか。次節以降では、この問いに答えるにあたって実行した筆者の《プラクティス》を示す。



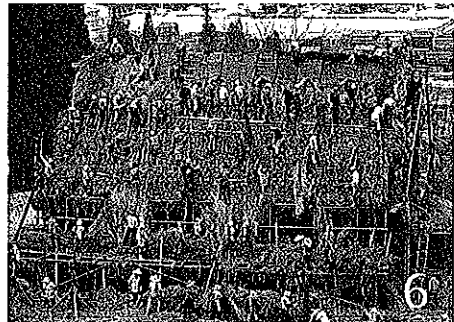
屋根むき



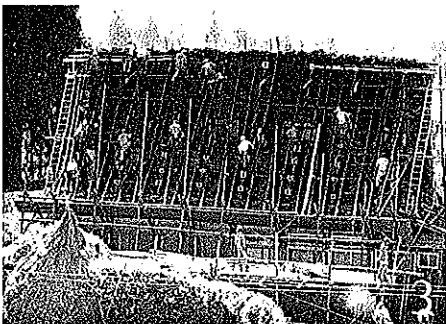
軒付け



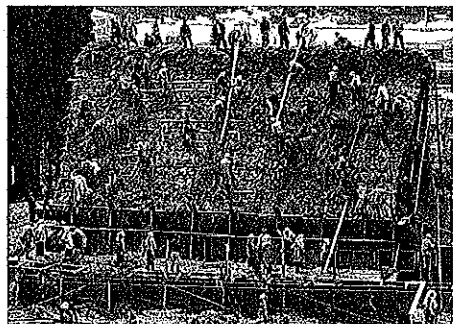
足場づくり



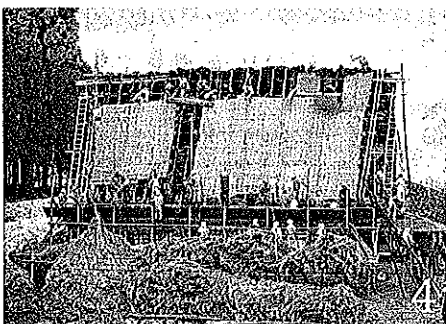
平葺き



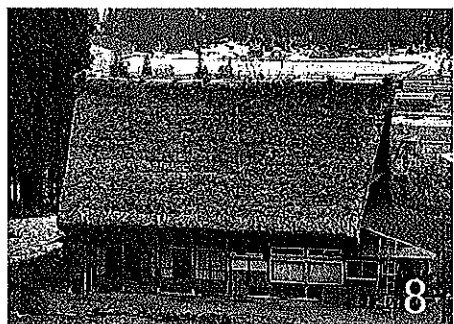
下地修理



棟包み



簀の子取り付け



仕上げ

図1.14 「結」

(安藤 邦広, 乾 尚彦, 山下 浩一『住まいの伝統技術』1995)

[1.4.1] 空間／都市生産のプラクティス

はたして、受動的な消費者である「ふつうの人」が、能動的に身の回りの空間／都市を編集することは本当に可能なのだろうか。このようなりサーチクエッションに応えるべく、筆者は株式会社岡村製作所の庵原悠と共に、以下の2つの実験を行った。

まず一つ目としては、慶應義塾大学田中浩也研究会に所属することになった新規履修生を対象に、「自分の為だけの、自分の椅子を、自分の力でつくる」という授業／実験を行った。対象者はこれまで、3次元CADやプログラミングツール、デジタルファブリケーション機器を使用した経験のない、「ふつうの人」達であったが、モデリング（Rhinceros）／プログラミング（Grasshopper）の習得に1週間、機械操作習得（Shopbot）／試作に1週間、改良に1週間の計3週間で、履修者全員が課題をクリアした。

結果として、各々の意思に基づいた自分だけの椅子が誕生した（図1.15）。たとえば、吉田正人の『メトロノームチェア』は、メトロノームの様に横揺れする事によってリズムを刻む事ができる椅子である。座ることによって椅子がリズムを刻み、このテンポに合わせてギターを弾くことのできるという、元ミュージシャンである彼らしい椅子である。

このように、市場では購入しえない、制作者のパーソナリティが反映された椅子が出現した。受講者に話をきくと、どの生徒もアイデアを形にすることの“愉しさ”、自分だけの環境を手にした“居心地の良さ”を口にした。これこそが自分で自分の身の回りを構築することの価値である。そしてこの実験は、だれでも空間創出に参画できる事を証明したのではないだろうか。

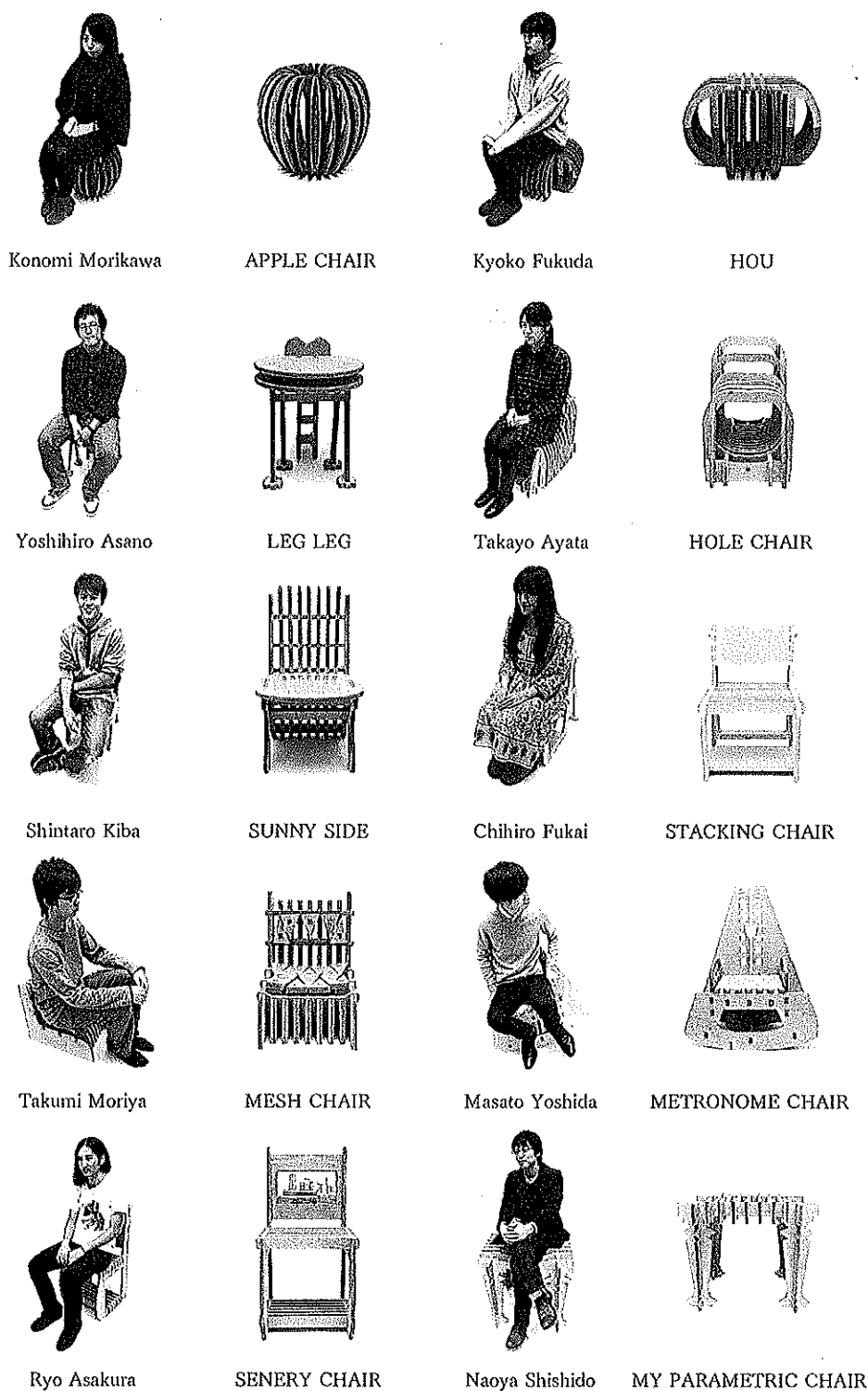


図1.15 Fab Chair Project

(Fab Space <<http://fabcity.sfc.keio.ac.jp/fabspace/project/chairx/chairx.html>>)

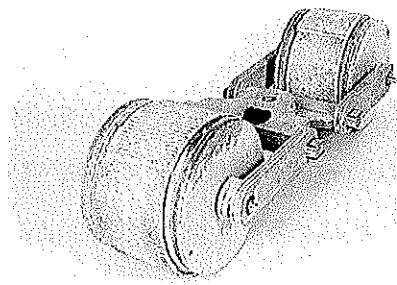
このような実践を社会に対して当てはめることは可能だろうか。都市においても、人々が主体的にものをつくる事によって、自分達の“場所”を獲得することは可能だろうか。

次の授業／実験は、「都市の中で FAB する為の道具をつくる」という課題に取り組んだ。ここでソーシャルの対象としたのは、人や、人が感じたコトではなく、都市や都市に溢れるモノたちである。

都市に点在する特異な“場”そのものがどうなりたがっているのか。都市に偏在する意味を持った“かたち”がどうなりたがっているのか。具体的な場の“観察”から取得したモノのエッセンス=寸法／動力／材料を手がかりとして、アイデアとプロトタイプを何度も試作した。

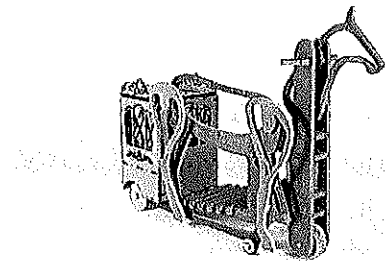
結果的に5つの場所の為だけに、5つの作品が生まれた(図1.16)。例えば、木場晋太郎と福田香子の『PILLOW CARRY』は、野毛山公園を敷地とし、公園に入る為の険しい階段と、くつろぐ場所の少ない公園に着目した。彼らが製作したのは枕を生成するキャリーケースである。キャリーケースを引きながら階段を昇れば、公園に着くころには枕が完成しているという代物だ。公園が持つ豊富なリソースである落ち葉というマテリアルを用い、高低差という位置エネルギーを動力に変換し、さらには階段の寸法をギアのパラメーターとして取り込んだ。彼らは FAB を通して、階段を昇る辛さを喜びに転換し、閑散とした大地に人々が憩える“場”を創造したのだ。

この実験は、個々人がモノをつくることで都市の権利を主張し、都市部においても同様に、自らの意思で空間の生産に参画することのできる可能性を示したのではないだろうか。



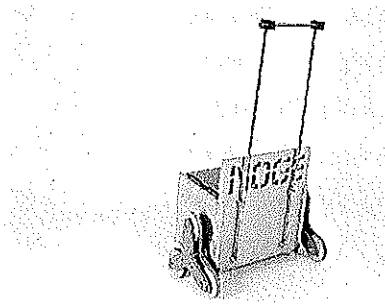
Sakamori

Naoya Shishido, Takumi Moriya



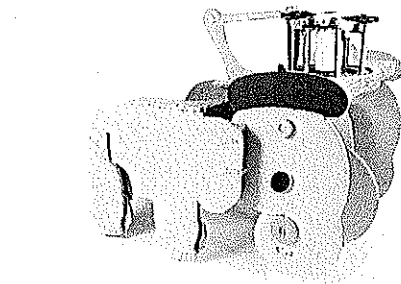
Kickboard Icecream Machine

Ryo Asakura, Konomi Morikawa



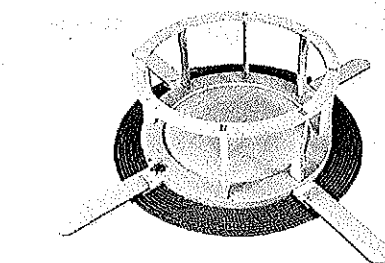
Pillow Carry

Shintaro Kiba, Kyoko Fukuda



Drawing Elephant Machine

Yoshihiro Asano, Takayo Ayata



Personal Space Fabricator

Masato Yoshida, Chihiro Fukai

図1.16 Fab X Project

(Fab Space <<http://fabcity.sfc.keio.ac.jp/fabspace/project/fabx/fabx.html>>)

[1.4.2] Co-Repeat Prototyping と LEGO

ところで、ここまでは住居／身の回りの環境に関してや、その集合体である都市／集落等の生産プロセス／ビルド方法については既に述べたが、その形態やデザインはいったいどのようにして決定されるのであろうか。乾尚彦はこう述べている。

「伝統的な集落の景観には、強いまとまりがあるものだ。一つ一つの家はよくみれば個性もあるが、色は総じて風景に溶け込み、あたかも全体が計画的にデザインされたように見える。これはその地域の材料や構法による制約、気候の影響によるものだろうか。自然条件のほとんど変わらない近隣の集落でもデザインが異なっている例は多いから、どうもどうではなさそうだ。集落景観のまとまりとは、結局、その共同体のまとまりを反映しているものと考えた方がよさそうだ。」

(乾 尚彦, 1995, p.8)

それでは、その共同体のまとまりはどのようにして形に反映され、どのようにして形式となるのであろうか。この問いに応答するに当り、筆者が庵原悠（株式会社岡村製作所）と共に、横浜市ファブシティコンソーシアムにて行ったワークショップを紹介したい。

FAB から都市を考えることを目的とした「ファブシティコンソーシアム」の参加者と共に、「FabCity横浜のFab施設をつくる」ということを目的として、ワークショップを行った。ここで行った実験としては、単なる議論やアイデア出しに終わるのではなく、LEGO を用いて実際に形に落とすことであった。四人一組でグループに別れ提案を行ったが、普段発散する類いの議論も、物質化する過程を通して、制限時間内に切斷され収束した（図1.18）。

このような、参加者と“ともに”、アイデアを短時間で、“何度も”、リアルタイムでプロトタイピングをおこないながら、設計に落とし込んでいく手法を「Co-Repeat Prototyping」（以下CRP）と名付けることにした。この迅速なラピッドプロトタイピングを支えているのは、3Dプリンタのようなデジタルファブリケーション機器ではなく、LEGO という媒体=メディウムである。

このメディウムがそのまま現実の空間に拡大することができれば、普段の建築設計の過程における、スタディ模型と同等の役割を持つことになるだろう。しかし、ここで注意しなければならないのは、LEGO という形式が、最終的な成果物の物理的な形式を規定していることである。

実空間による構法を忠実に再現し、それを人がLEGOのように手軽にプログラム可能なメディウムに落とし込むことができたならば、建築設計におけるCRPが可能になる。既存の設計プロセスは、クライアントから得た与件を、アーキテクトが持ち帰り案を作成し、またプレゼンテーション/フィードバックを得るというサイクルであるが。この場合、そのフィードバック・ループがその場で、クライアントと一緒に、迅速に回すことが可能なのである。

本研究の提案する《オブジェクト》も上述したメディウムであることを目指し、CRPによる実践を通して設計を行うこととする（図1.17）。

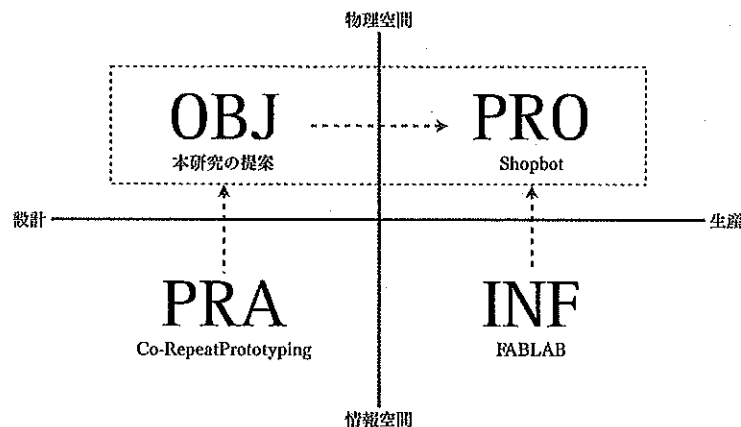


図1.17 本研究におけるオープンデザイン環境

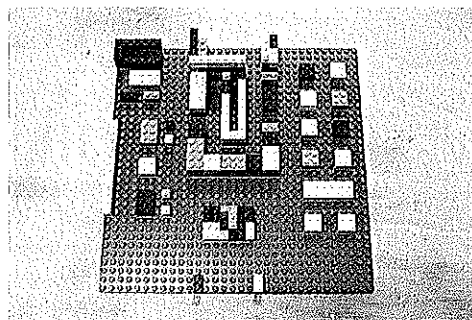
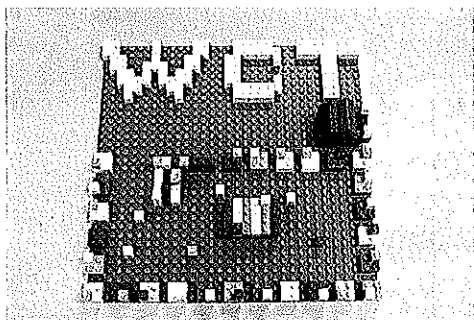
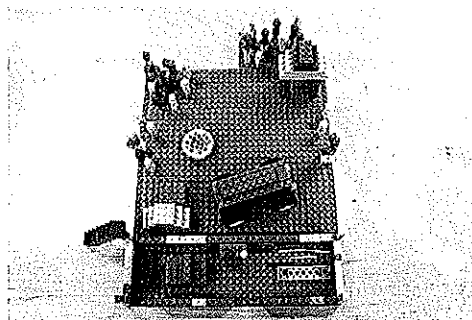
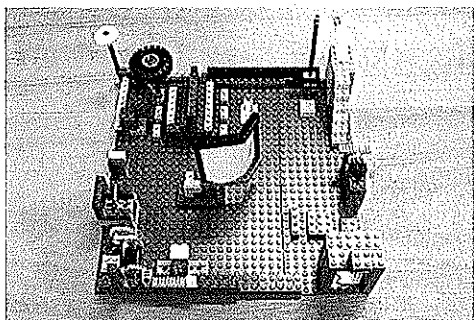


図1.18 CRP×LEGO

(Fab City <<http://fabcity.sfc.keio.ac.jp/>>)

[2] 背景

[2.1] パーソナルファブリケーションと景観

本節では建築物のオープンソース化の危険性について考察する。デジタルファブリケーションを用いた住宅のオープンソースの代表的なものに、『Wiki-House』というプロジェクトがある。ロンドンのソーシャルデザインファーム『00』のメンバーである Alastair Parvin が中心となり、CNCミリングマシンで切削可能な住宅データをオープンソースで公開している（図2.1）。

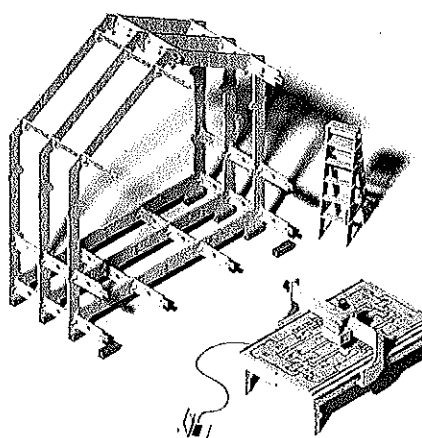


図2.1 Wiki-House

(Wiki-House <<http://www.wikihouse.cc>>)

オープンデザインの基盤が整った場合、このデータを単にダウンロードするだけで、誰もが簡単に住宅の建設が可能となる。しかし、実現可能な形状は「家型」や「矩形」といったプリミティブなジオメトリであり、現在進行中である景観の均質化に拍車をかけてしまう恐れがある。

このように、住宅規模の人工物における、一方的なオープンソースは無責任な行為なのである。オープンデザインの時代において求められるのは、完成された「形」をアップロードするのではなく、ユーザーがプログラム可能な「型＝オブジェクト」を定義し、それをユーザーが容易に利用可能な「インターフェース＝仕組み」を設計することではないだろうか。したがって、建築家を消滅させるのではなく、「システムの中に建築家を消去する」ことが必要となる。つまり、既存の建築家という職能は、地域毎のローカルな「オブジェクト＝ファイルフォーマット」を定義する「メタアーキテクト」へと解体されなければならない。

[2.2] メタアーキテクトの系譜

メタアーキテクトとはどのような存在のことをいうのだろうか。この新たな職能を語る上で、「近代と近代以前」というフレームを提供したいと思う。

近代建築が追い求めたのは、「空間を超えていく普遍性」の獲得であった。ル・コルビジェの『ドミノシステム』に代表される様に、どこにでも／安く／だれもが建設できる形式が追求された。あげく無秩序に生成されたのは、「ジェントリフィケーション」や「ジェネリックシティ」という言葉に現されているように、歴史性や場所性が剥奪された景観の姿である。

$$M = D = (S + I)$$

近代化
民主化
科学(設計)
工業(生産)

図2.2 建築の近代化=科学/工業の民主化

その後続くポストモダンの建築家達が追い求めたのは、「時間を超えていく普遍性」の獲得である。多くの建築家が、過去のシュミラークルをなぞった建築を提案したが、その中でも「無名の質」とも呼ぶべき、形の背後に潜む建築の生成原理に着目した二人の建築家がいる。Christopher Alexander (1936～) と N. John Habraken (1928～) である。

近代化における建築家の目的は「建築の民主化」を達成する事であったが、これには「建築設計=科学の民主化」と「建築生産=工業の民主化」の二つのベクトルが存在する(図2.2)。この二人の建築家は、これらの使命を見失った後期モダニズムの修正を行い、二つのベクトル両方の観点から建築の民主化を推し進めた。建築の近代化が見失った一番の対象は「人=ユーザー」と、それを現象する「建築の固有性」なのであるが、彼らは“ユーザー主導の”建築のあり方を模索した「メタ・アーキテクト」の源流なのである。

[2.2.1] Christopher Alexander と建築生産の7原則

Alexander の処女作である『形の合成に関するノート』では建築設計プロセスにおける設計科学が展開され、『パターン・ランゲージ』では他者と共有可能な言語による設計方法論が示されている。このように、彼の主眼は「科学」にあるのだが、『パターン・ランゲージによる住宅の生産』では生産システムの考察を行っており、「住宅生産システムの7つの原理」が示された。

「1 建築家と施行は分離されてはならない。(アーキテクトビルダー) 2 生産システムは、地域の高度に分散化された職人郡(拠点)を利用する。(ビルダーズヤード) 3 共有地はユーザーにとって最も大切な場所であり、彼らの管理下にあるべきである。(共有地の共同設計) 4 ユーザーは、自分自身の住まいの間取りについて、現代建築のような受け身の姿勢ではなく、各家族によってそれぞれ異なる間取りができるような積極的な姿勢で参加しなければならない。(個々の住宅のレイアウト) 5 施行のシステムや技術やディテールは、プロセスそのものが必要とする、連続的な巧妙かつ微妙な修正の利くものを選びなくてはならない。(一步一步の建設) 6 コストコントロールは、柔軟な設計施工プロセスに適応しなければならない。(コストコントロール) 7 建物の細部は、手づくりの楽しいものでなくてはならない。(プロセスの人的リズム)」

(Alexander, 1985, p.7)

見ての通り、1章で述べたオープンデザインの文脈と完全にシンクロしているのが解るだろう。1で書かれている建築家と施行の統合はデジタルファブリケーションによって可能になることであり、2の拠点は FabLab と読み替えることもできる。4とはまさにオープンデザインのことであり、7で書かれている事はまさしく FAB (Fabulous) のことである。

このように、Alexander はパターン・ランゲージという「住民参加の為の設計ツール=《プラクティス》の開発」と、ツールを用いて建設活動を行う為の職能や場の提案といった「生成場=《インフラストラクチャー》の開発」を平行して行ったのである。

[2.2.2] N. J. Habraken とモジュール開発

一方で、Habraken が住民参加の方法論として開発したのは「サポート／インフィル」という構法＝《オブジェクト》である。サポートという利用者全体に影響する躯体部分のデザイン方式と、インフィルという利用者個々人に影響するパーソナルスペースのデザイン方式を明確に分けることを提案した。このミームは、オランダの Habraken からベルギーの Lucien Kroll (1927～) へと伝播した。

『Medical Faculty Housing』のプロジェクトでは、サポート／インフィルの概念に対応した独自のCADを開発することで、ユーザー（学生）が主体的に設計／生産プロセスに参加可能となり、CADにビルドインされたCAAS (Computer Aided Assembly)によって学生がセルフビルドで学生寮を完成させた。

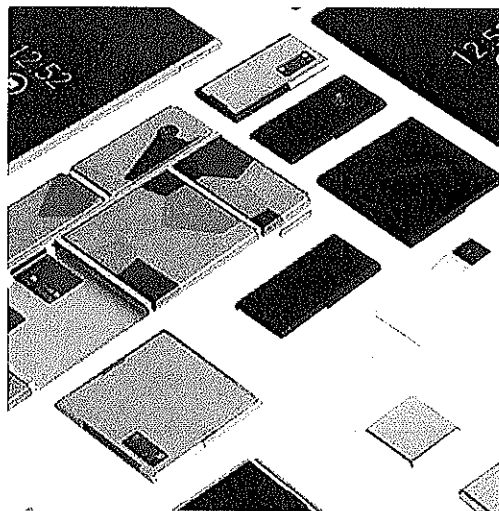


図2.3 Project Ara

(Google <<http://www.projectara.com/>>)

ところで、オープンデザインの文脈で興味深いのは、Alexander のパターン・ランゲージが情報工学における『wiki』に転用された様に、Habraken のサポート／インフィルという概念もオープンソース・ハードウェアの文脈で転用されつつある。Google が2014年に発表した『Project Ara』では、Endoskeleton という躯体をマスマイクロプロダクションの原理で流通させ、モジュールを各々のユーザーが自作もしくは購入することで、マス・カスタマイゼーションを実現するという

新しいスマートフォンである（図2.3）。まさに今、Habraken が渴望した「住民参加」夢が、プロダクトのレベルでは叶いつつあるのである。

このように、本節ではメタ・アーキテクトの系譜として Alexander と Habraken を紹介した。Alexander は科学に主眼を置き、オープンデザインの《プラクティス》と《インフラストラクチャ》のレイヤーを開拓した。後年は『Wiki』に代表される情報空間上でその方法論は転用され、酒井康史の『LMNarchitecture』のように再び建築を設計するための方法論として再帰しつつある。

一方で、Habraken は工業に主眼を置き、オープンデザインの《オブジェクト》と《プロセス》のレイヤーを開拓した。後年は『ProjectAra』に代表されるデジタルな空間上でその方法論は転用されている。本研究が目指すところは、その建築における再帰である。したがって、本研究の提案する《オブジェクト》は Habraken の研究の系譜にある（表2.1）。

表2.1 Alexander/Habraken

	Alexander	Habraken
比重	科学 > 工業	工業 > 科学
開拓	プラクティス インフラストラクチャ	オブジェクト プロセス
転用	ビット (Wiki)	アトム (Project Ara)
再帰	LMNarchitecture	本研究

[2.3] 日本建築のメタデザイン・システム

前節では近代建築とメタ・アーキテクトについて述べたが、そもそも建築や建築家という概念は、近代化と共に日本に輸入されてきたものである。したがって、近代以前には建築家という職能は存在しなかったのであるが、近代化以前の日本では、一体誰が街並みや住宅をつくってきたのだろうか。ここで内田祥哉(1925～)の言葉を引用する。

「3尺6尺の寸法体系の中に完成された江戸時代の民家には、以上のような内容が盛り込まれている。この優れた民家が完成したのは、特別な指導力を持った棟梁がいたからではないし、名の知られたデザイナーによって、全国的指導がされたわけでもない。それは、江戸時代300年の間に庶民の目が高められ、平均的大工の技術が比較的優れていたためだと考えられる。だから、もし日本の未来の住宅について、優れた形態が期待されるとすれば、やはり庶民的なレベルでの生活感覚の高まりが必要であり、住む人の一人一人が優れたデザイナーとして、生活の道具をはじめ、生活そのものをデザインすることが必要である。」

(内田祥哉, 1987, p52)

このように江戸時代ではオープンデザイン環境が成立しており、この環境が風景や住居をつくりだしてきた。その要因として「1、寸法体系と構法が確立していたこと」「2、大工というコンサルタントの生態系が普く存在していたこと」「3、庶民のデザイン・リテラシーが高かったこと」の3点に要約できる。さらには、この後続く文章で、メタ・アーキテクトの使命を的確に予言している。

「例えば四季折々の気候に耐え、風土になじみ、地形を生かし、あるものは家並みを整え、あるものはランドスケープを形成して、その土地の環境の構成要素となり、また、その土地の生活要素と

なる。それこそが、技術を支える人々からも、また、生活に参加する人々からも、手の及びにくい部分であって、建築として個別に解決しなければならないところである。これが、建築家の仕事として残された部分であろう。(中略)。しかし、建築家の役割の重点は、自然と風土に対する個別的な対応にあつて、生活の個性に対しては、個性豊かな生活構成を可能とする、柔軟性(flexibility)を持って対応すべきではあろう。」

(内田祥哉, 1987, p53)

つまり、メタ・アーキテクトが為すべきは、「柔軟性」をもったオープンデザイン環境を成立させるために、自然・風土に対する「個別性の問題」を解決可能な《オブジェクト》を地域毎に翻訳・抽出する事なのである。

このような《オブジェクト》を提案するにあたり、本節では、江戸時代のオープンデザイン環境を成立させていた「工匠のネットワーク／大工＝《インフラストラクチャ》／《プロセス》」と「伝統構法＝《オブジェクト》」について詳しく述べる(図2.4)。また、「如何にして庶民のデザイン・リテラシーを向上させるか＝《プラクティス》」に関しては、1章4節を参照されたい。

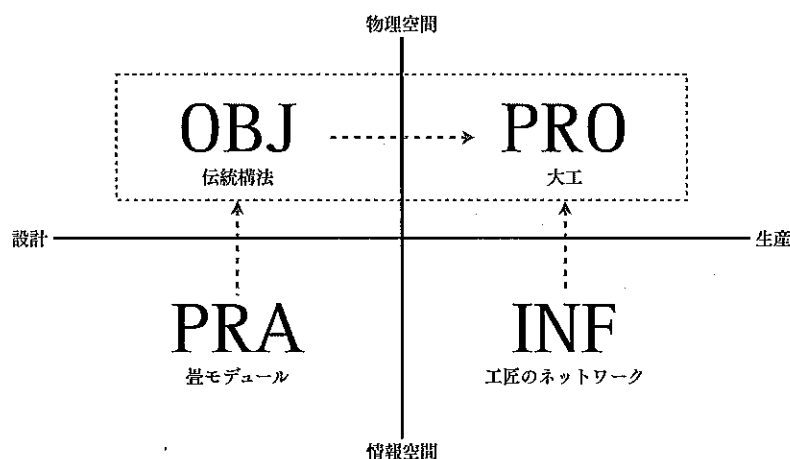


図2.4 江戸時代のオープンデザイン環境

[2.3.1] 工匠というメディウム

江戸時代のオープンデザイン環境を成立させていた要因の一つに、有能な大工のネットワークが存在していた事が挙げられる。畳割にもとづいて自分で「間取り」させ書けば、あとは大工が勝手に組み上げてくれる、そんな仕組みが昔は存在していた（図2.5）。したがって、近代以前には大工のネットワークが《インフラストラクチャ》として機能しており、建築とユーザーとを繋ぐ媒体＝メディウムになっていた。

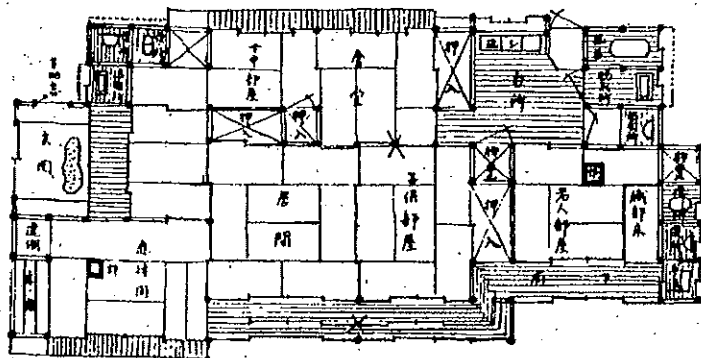


図2.5 畳割による平面

(Habraken 『支え構造と分離ユニット』 1972年)

ところで、大工＝工匠の歴史は、5世紀の木工（こだぐみ）猪名部真根（いなべのまね）から始まるが、当時の工匠は木工技術全体を扱う存在であり、家大工であり船大工であった（伊藤ていじ, 1967）。つまり、家の様に船をつくる事ができ、船の様に家をつくることもできたのである。佐渡の『宿根木』はその事を如実に現しており、山大工の規矩術や曲尺では創り得ない、曲面体住居群の可能性を示している（石山修, 2010）。一方、屋根の「反り」も直線材である「撓み尺」を用い、薄板を撓ませることで流麗な曲線を作り出して来た（伊藤ていじ, 1966）。

つまり、工匠はその場所に発生する力の流れ（川の流れ／雨の流れ）を直感的／経験的に掴むことができ、それを3次元の形態に落とし込む事ができたのである。このことから、極めて優れたメディウム＝翻訳者であるといえよう。

[2.3.2] 西暦2400年の伝統構法へ

江戸時代のオープンデザイン環境を成立させていたもう一つの要因は、大工達が発明し確立した「伝統構法」という構法が存在したことである。この構法は、国土の2/3が森林という恵まれた日本の風土/文化が、永い歴史の中で醸成した「適正技術」である。他方で、近代化以降、特に1891年の濃尾地震以降、学士建築家やヨーロッパの建築家達による伝統構法の否定の上で作られた「在来構法=軸組構法」というものがあるが、両者の違いを（表2.2）に示す（増田一眞, 1998）。

表2.2 伝統構法/在来構法

	伝統構法	在来構法
時代	近代以前	近代以後
主応力	曲げ	軸力
応力	分散型	集中型
主材	横架材・柱	垂直材・筋違
架構	3D	2D
接合	継手仕口	金物
節点	柔	剛
材料	自然素材	工業素材

このように、作られる住宅の形は一見して同じなのであるが、全くもってシステムが異なるのである。むしろ、相反するものであり、歴史的にも技術的にも

連続していない。しかし、現代において圧倒的な数を占めているのは在来構法の方である。この理由は、1950年に制定された建築基準法や、住宅を大量供給するために定められた住宅金融公庫の仕様書の影響による。このことについて広瀬鎌二（1922～2012）はこう述べている。

「日本の伝統建築をその精神から技法まで消し去ろうとしている諸悪の根源が、基準法であり、それを整理すると次のようになる。一、無批判に西欧技術を採用、法制化した罪。一、その結果日本の伝統技術を抹殺した罪。一、伝統の職人技術を軽視し、甚しい技術低下を招いた罪。一、偏向した構造省力化を強制した罪。一、建築技術の自由な発想を奪った罪。一、日本の伝統文化の健全な発展を阻んだ罪。一、木造建築の耐久性を1/10以下に低下させた罪。ということになるようである。」

（広瀬鎌二, 1984, p3）

つまり、伝統構法が建築基準法によって制約を受けたために、事実上建築不可となり、それにともない、制定以後100年以上の年月をかけて大工の数／質は落ちていったのだ。したがって、前項で述べた工匠の《インフラストラクチャ》はもう存在しないのである。2000年以降、限界耐力計算を適用することによる申請など、制限は緩くなったものの、未だに「石場立て構法＝礎石造」による設計は認められていない。結局のところ、法規や申請書類などは役人が処理するのであって、彼らに都合の良い「容易に可読可能な形式」のみが生き残る形となっている。

さらに、戦後の住宅政策がこれに拍車をかける。経済の活性化を目的とし、住宅の着工件数を増やすために、中間層に向けた住宅融資が始まった。国と結託したハウスメーカーは、大量の短命の住宅を安く提供したのである。この場合、金融公庫の指定した構法による建築でなければならないため、当然、伝統構法はその範疇にない。30年ローンを組んで一生かけて返済を行うが、返済を終える頃には「住宅の資産価値」はほぼゼロに等しいのである。経済全体からしてみれば

ば、これほど美味しい話はないのであって、耐久性や環境の問題を正論としてかざした所で、これが受け入れられる事はない。

このような、保守的かつ停滞的な日本の「悪い場所」では、イノベーションは起こりえない。目先の規則・利益に固執するあまり、過去も未来も捨て去っているのである。

一方で、広瀬鎌二は「日本の伝統」について述べる文章の中で、建築史において、イノベーションのサイクルが600年に一度訪れており、その度に伝統構法はアップデートされていったと述べている（広瀬鎌二, 1996）。したがって、江戸時代の伝統構法は、中国からの外来技術導入等の、幾多の技術革新を経て、その度に自国の文化へと咀嚼し、作り上げてきたものである。然らば、近代以降出現した在来構法やその他のモダニズムが産んだ技術は、すべて伝統構法へと昇華されるべきなのである。

1800年の600年後は2400年である。本研究は、「2400年における伝統構法の種」となるべき《オブジェクト》を提示することを目指す。

また、600年のサイクルには細分化すると200年の小周期が存在する。公文俊平（1935年～）の「出現」「突破」「成熟」の三局面の分類を援用するならば、1800年から2000年迄の時期は、まさに近代の「出現」の時期であり、2000年からの200年は「突破」の時期であると言える。本論文では、前者を単に{近代}と呼び、後者を{ポスト近代}と呼ぶ。そして、2200年からの「成熟」期を{ラスト近代}と定義する（図2.6）。

したがって、本論文を書いている2014年現在は、近代化によって出そろった技術革新を、近年成熟しつつあるデジタルアプリケーションやコンピューテーションの能力を援用しつつ、{近代}の「突破」＝「伝統構法のアップデート」を計る時期なのである。

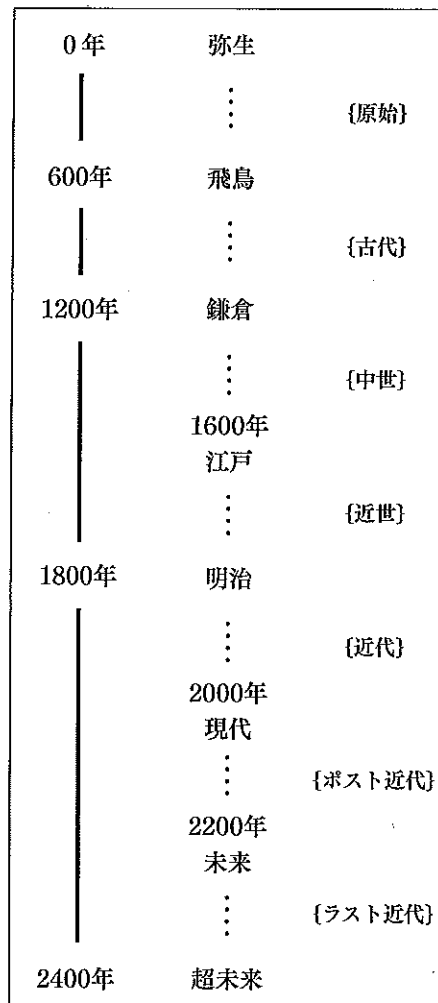


図2.6 建築革新の600年周期

ところで、伝統構法／在来構法ではどのような形態が表現可能なのであろうか。実は、日本の建築物の形態／意匠を大きく定義しているのは「屋根」形状である。日本建築と西洋建築の大きな違いとしては、西洋の建築が壁によって空間を仕切られているのに対して、日本の建築は屋根によって空間を仕切っていることが挙げられる（伊藤ていじ, 1982）。この要因は、日本の高温多湿な気候によるところが大きく、降って来た雨（湿気）を如何にして室内から遠ざけるか、如何にして合理的に流すか、そのような意匠の追求として日本の屋根は成立した。さらには、建築基準法第2条第1号の「建築物の定義」においても、「建築とは屋根を有するものである」と記されている。したがって、日本建築とは即ち屋根なのである。

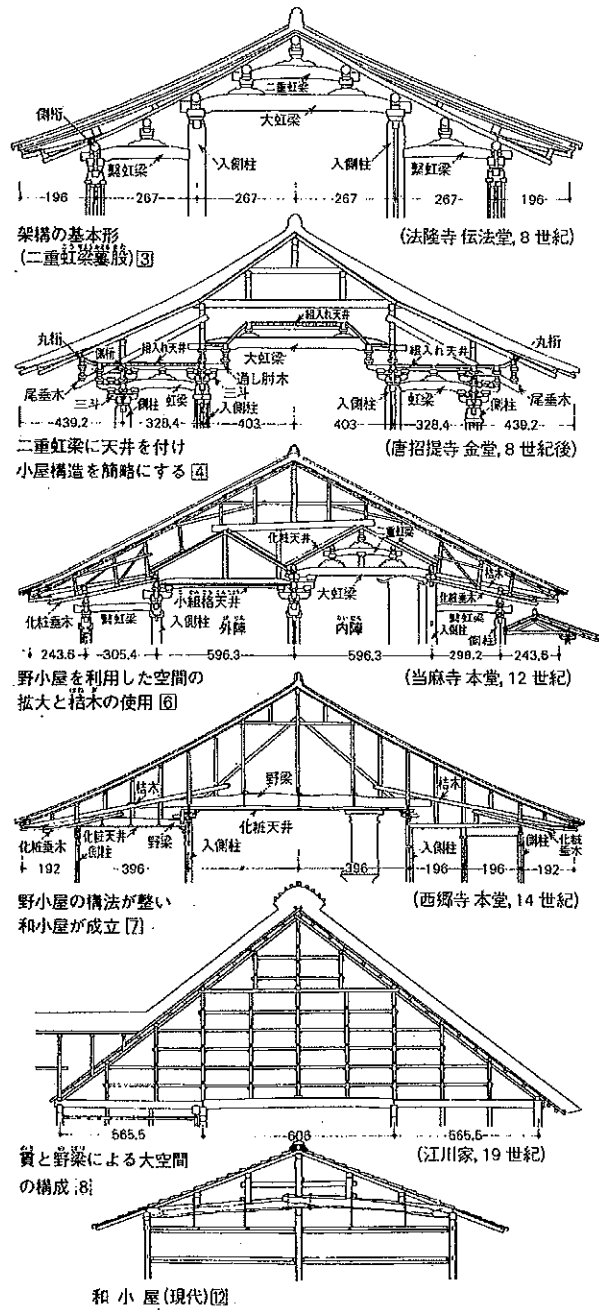


図2.7 和小屋の変遷

(日本建築学会編 『建築資料集成10集』 1983年)

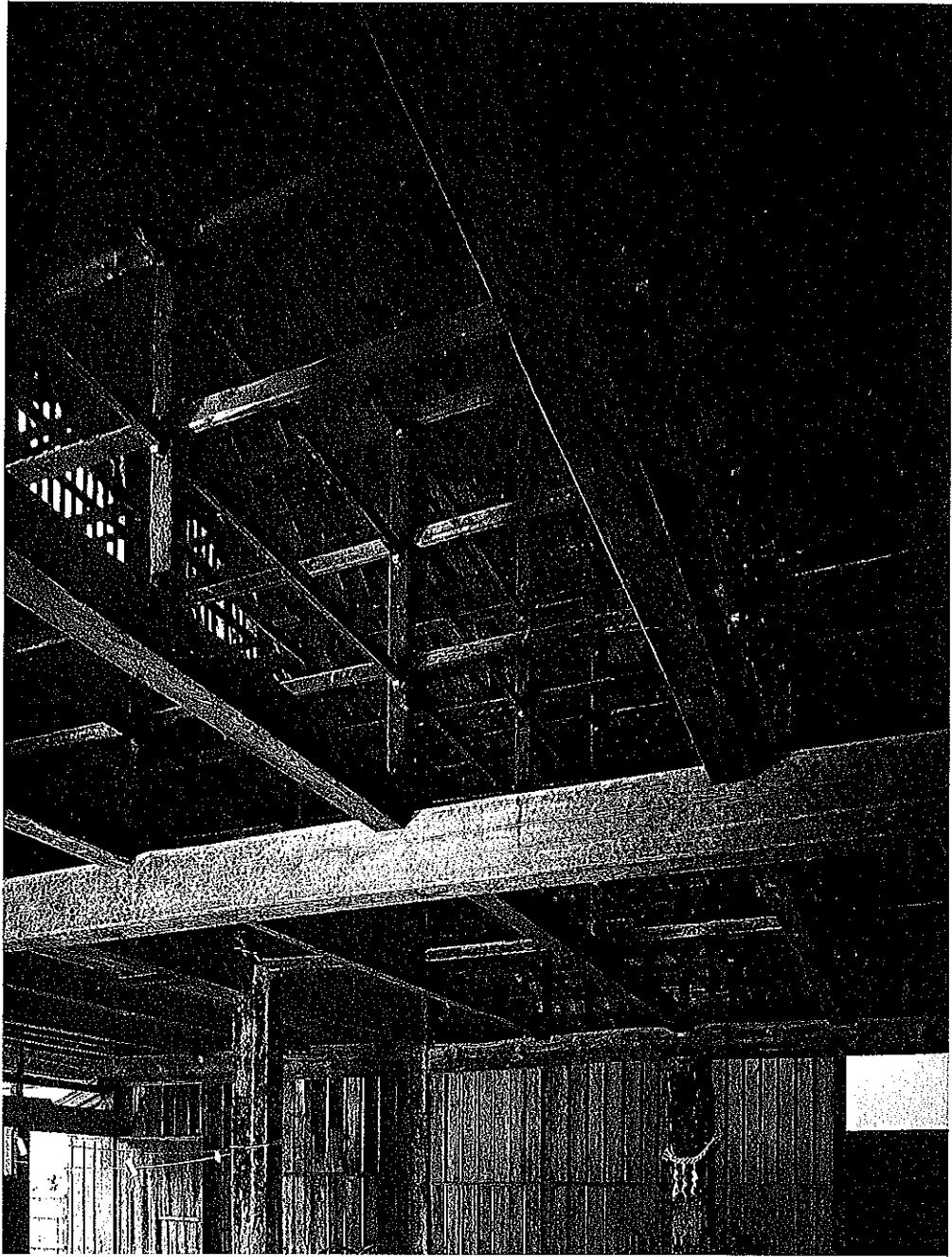


図2.8 江川家和小屋(1)

(関野克監修, 鈴木嘉吉, 工藤圭章編集協力『日本の民家 第2巻 農家II 中部』1981年)

さて、前掲したイノベーションのサイクルに倣って、「屋根の変遷」をみていこう。まず、屋根と軸部が未分化である「扱首組」から始まり、600年前後において「屋根と軸部の分離」が起り、「組物／小屋組」が出現した、やがて、1200年前後には「野小屋」の出現によって構造と意匠が分離し、一定の間隔によって梁の上に束をたてる「和小屋」が成立した。1800年頃には、その間隔は半間によるモジュールによって規定されるようになり、束と束の間に貫を通すことによって和小屋の大型化が成立した。さらに、現代においては和小屋のプレファブ化が進んでいる（図2.7）。

ところで、この「和小屋」こそが在来構法の“うまみ”であり、日本の木造住宅に柔軟性を与えるものである（内田祥哉, 2009）。和小屋という自立した構造体が軸部の上に架かることで、その下の柱や壁が自由に動かせる。これにより、自由なプランニング、改築／増築を可能としているのだ（図2.8）。

一方、和小屋を駆使して作られる日本建築の屋根の基本形として「寄棟」「切妻」「入母屋」「方形」がある。日本全国に存在する木造住宅のほとんどが、「片流れ」や「陸屋根」をくわえた6種類の屋根形状によって成り立っている。

本研究では、2400年の伝統構法を目指すために、この和小屋形式の次の形式となるべく、より個別性を表象可能な《オブジェクト》を提示する事を目的とする。

以上のように、本節では日本建築を成り立たせていたメタデザイン環境の要因である「有能な大工による《インフラストラクチャ》」と「伝統構法という《オブジェクト》」について述べた。

次章では筆者がメタアーキテクトとして、Shopbotを用いたオープンデザイン環境を成立させるための《オブジェクト》を提案するにあたっての問題点を提示する。

[3] 問題

[3.1] 表現可能形状の物理的制限

前章で示した通り、伝統構法／在来構法の屋根形状の基本形は「寄棟」「切妻」「入母屋」「方形」の4種類であり、海外における木造民家屋根形状の基本形も同様に9種類に分類可能である(図3.1)。このことから、時代区分を問わず、世界的にみて住宅の屋根形状＝住宅の表現可能形状は画一的であるといえよう。また、これらは全て「中心の存在する形態」である。

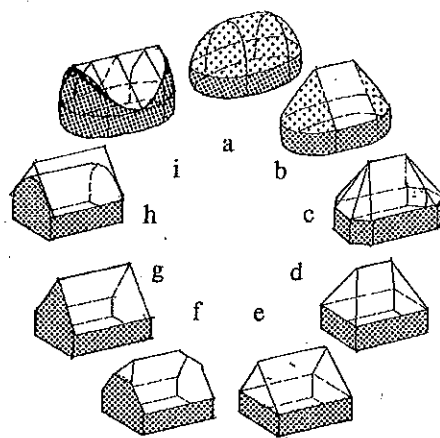


図3.1 ヨーロッパの木造民家の屋根の基本形
(太田邦夫 『住居における木造架構の比較研究(3)』1982)

PreFab 構法の延長線上に位置する『Wiki-House』や Larry Sass らの研究グループのデジタルファブリケーションを用いた構法でさえも、表現可能な形状は「家型」などの単純なジオメトリである。このことは、用いられる構法と表現可能形状の関連性を示唆している。つまり、ものの構成の方法＝構法が表現形状を規定するのである。

一方で、Zaha Hadid や Frank Gehry など曲面を多用する建築家達が切り開いたのは「中心の存在しない」自由なジオメトリの世界であった。90年代初頭、これらの建築家の提案したモデルは「ブロップ」と揶揄され、とりわけ Zaha Hadid は「アンビルドの女王」と呼ばれた。しかし、2014年現在、新興都市には必ずと言っていい程 Zaha Hadid の建築があると言われ、建築不可能と呼ばれた建築群も実現可能な時代になっている。

[3.2] ファブリケーションの複雑性

このような建築が実現した背景には、CAD等の設計支援ツールの進化やデジタルファブリケーション技術の進歩が挙げられるが、建築家と施行業者との間に立って、幾何学形状やファブリケーション方式を最適化する職能である「ジオメトリエンジニア」の貢献が大きいのではないだろうか。『Centre Pompidou Metz』や『Haesley Nine Bridges Golf Club House』のプロジェクトでは、設計者である坂茂建築設計と建設業者である Blumer Lehmann 社とを仲介する役目として Design To Production が間に入った。

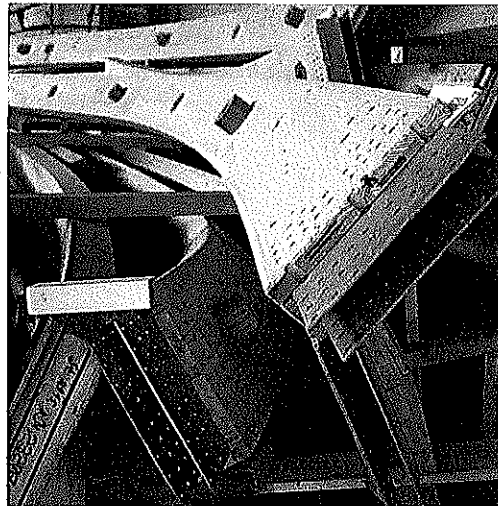


図3.2 Centre Pompidou Metz の構成部材

(Design To Production <<http://www.designtoproduction.ch/>>)

しかし、ここで用いられているファブリケーション・メソッドは、バンディングした薄板を積層し、さらに5軸加工機でミリングするといった複雑なプロセスを踏んでおり、部材一つ一つの形状は全て異なる(図3.2)。自由度の高いジオメトリを一般化するためには、このような複雑なプロセスを単純化する必要がある。完成されたデザインから作り方を考える「分断されたプロセス」では、このような「力技」になってしまうのではないだろうか。ここにジオメトリエンジニアの限界がある。ビットとアトムを自由に行き来することのできる時代において求められるのは、より包括的な視点から全体を設計する能力なのである。

[3.3] 非冗長性／非拡張性

また、Frei Otto の『Mannheim Multihalle』に代表される木質自由曲面を実現した既往作品のほとんどが、金具を用いた「一体成形」型の構法を採用しており、一部に破損が生じた場合、部分的な修復は難しい（図3.3）。当然、金具の耐性に全体の耐性が依存しているため、系全体の寿命も短い。また、金具に依存した接合部になっているため、容易に分解／再構成することも難しい。つまり冗長性に欠けているのである。さらに、全体のジオメトリもドームの様な「閉じた系」であることがほとんどであり、空間の拡張性も当然ないのである。

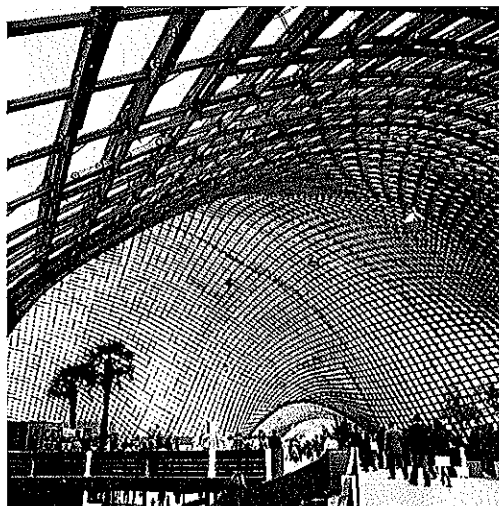


図3.3 Mannheim Multihalle

(Frei Otto <<http://www.smdarq.net/case-study-mannheim-multihalle/>>)

このように、本章では既存の木造建築の構法の「表現可能形状の制限の問題」と、その制限を超えようとする木質自由曲面製作の事例における「ファブリケーション・プロセスの複雑性の問題」「冗長性／規模拡張性の問題」の三つを挙げた。次章では、これらの問題を解決するにあたっての仮説を提示する。

[4] 仮説

[4.1] 構法学的転換－機械制約からの出発

前章では「ファブリケーションの複雑性」の問題を提示したが、この原因は設計と生産の「分断されたプロセス」にあるのではないだろうか。

設計という上流から生産という下流に降ろしていく方針では、無理やり実現しようと「力技」になることは必然である（図4.1）。翻って、「機械制約」や「材料特性」といった生産における前提条件から出発することで、この問題を解決できないだろうか。すなわち、フィジカルな世界に立脚することで、上流下流という垣根を超えて「設計／生産における全プロセスをデザインする」という転換を計る（図4.2）。以上が一つ目の設計仮説である。



図4.1 従来の設計/生産のプロセス



図4.2 本研究における設計/生産のプロセス

本研究では Shopbot の使用を前提とするが、具体的な機械制約としては、先ず第一に 3 軸の CNC ミリングマシンであることが挙げられる。すなわち、XYZ 3 つの軸それぞれにモーターが取り付けられ、各々の制御によって切削が為されるものである。このことは、切削可能なアウトプットが 2D の形状もしくは 2.5D の形状に限られることを意味する。したがって、自由度の高い三次元の曲面を、二次元の部材によって構成することが本研究の目的である。それを実現するためには、独自の幾何学的処理が必要となるのだが、詳細は第 6 章にて述べる。

[4.2] 超矛盾系の提案—エフェメラリティ

もう一方の前提条件である「材料特性」に関しては、本研究では「エンジニアード・ウッド」特に「合板」の使用を前提とする。材料の選定理由としては、何処の国においても同等の規格寸法の材料が入手可能であること、大量に普及していることで単位枚数あたりの価格が低いこと、無垢の木とは異なりヤング率等の「マテリアル・プロパティ」が明示されていることが挙げられる。問題点としては、耐久性が接着剤に依存しているため、もろく短命であることである。

しかし、「短命さ」を「弱さ」と読み替えることでポジティブな解釈が可能となる。元来、日本の橋や日本建築は、災害の度に崩れ、立て直し、時には移築し、有効活用できる部位は継承されてきた。このように、先人達は人工物の「フラジャイルな宿命」を“前提として”物質に命を宿してきた。一方で、先の 3.11 の大津波と堤防の関係性は、近代理性による「完全系の敗北」をまざまざと見せつけたが、自然と人間との間に完全にソリッドな境界線を引くことは不可能なのである。武田信玄が築いたと言われる『信玄堤』や両国に存在した『百本杭』は、何層ものレイヤーによって、水の勢いを分散的に流す合理的なインターフェースとなっている（図4.3）。



図4.3 両国百本杭
(『仁山智水帖』, 1902)

伝統構法も同様に「応力集中系」ではなく、力をゆらゆらと流す「応力分散系」である。建築家の内藤廣（1950～）はこのような木造建築の性質を「矛盾系」と名付けたが、この性質をドライブさせることはできないだろうか。部材と部材という単位ではなく、より細かい粒子のレベルで柔らかく繋がり、各々の粒子毎に性能を評価し、朽ちれば当該領域だけ置換し、粒子毎の組み替えも容易であるような、いわば「超矛盾系」とも呼ぶべき系を創り出すことはできないだろうか。すなわち、材料単位で見れば合板という「エフェメラルな物質」であるが、系全体として長命であるような仕組みを創ることは可能だろうか。以上が二つ目の設計仮説である。

以上、本章では「機械制約や材料特性から発想して合理的な設計を行うことは可能か」、「短命な材料で長命なシステムをつくることは可能か」という二つのリサーチ・クエッションを提示した。次章ではこれらの仮説を実証するにあたって、関連する研究手法を提示する。

[5] 関連研究

[5.1] デジタルマテリアルの研究

前章で示した「超矛盾系」の構想を具現化している研究グループがある。Massachusetts Institute of Technology (以下MIT) の Center for Bits and Atoms (以下CBA) の研究者達だ。田中浩也はフィジカルな世界におけるモノの最小単位を「フィクセル=フィジカルなピクセル」と名付けたが、彼らはフィクセルによって構成される材料=「デジタルマテリアル」の研究を行っている。George A. Popescu は、以下の様にデジタルマテリアルを定義した。

[A digital material is a material made out of components with the following properties: デジタルマテリアルとは、以下の性質を持った構成要素によって成り立つ材料である。・ the set of all the components used in a digital material is finite (i.e. discrete parts). 構成要素の形状が有限種類であること・ the set of the all joints the components of a digital material can form is finite (i.e. discrete joints). 構成要素の接合方式の種類が有限種類であること・ the assembly process has complete control over the placement of each component (i.e. explicit placement). 組立プロセスによって、各構成要素の配置を完全に制御できること]

(George A. Popescu, 2007, p15)

このような材料を代表するものとして、CBA の所長 Neil Gershenfeld とその娘である Grace Gershenfeld が開発した『GIK KIT = Great Invention Kit』(以下 GIK) がある (図5.1)。これは、大量供給された材料を基に作成された2Dのパーツを組み合わせることで、立体物を作成するものである。したがって、デジタルマテリアルとは離散的な要素の集合なのである。

また、デジタルマテリアルがもたらす造形上の機能は、「スケーラビリティ(規模拡張性)」「リバーシビリティ(可逆性)」「マテリアル・ダイバーシティ(素材の多様性)」の3点であると言われている (Wikipedia, 2013)。三つ目の素材の

多様性については、GIK で用いられている素材はモノマーであるが、Kenneth C.Cheung は炭素繊維強化ポリマー（Composite=複合物）を用いて作成したデジタルマテリアル=「デジタルコンポジット」の提案を行っている（図5.2）。

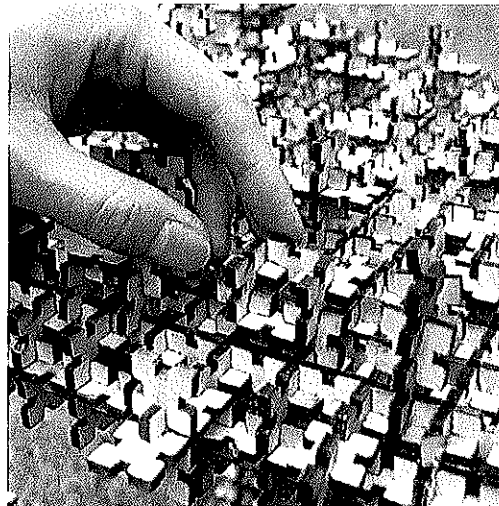


図5.1 GIK

(Kenji Kanasaki <<http://fab.sfc.keio.ac.jp/>>)

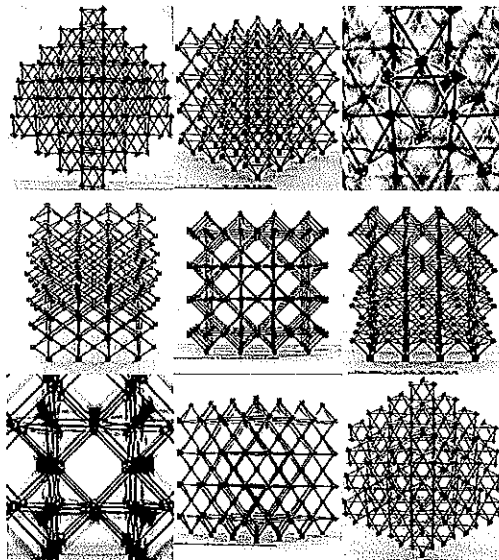


図5.2 Digital Composite

(Kenneth C.Cheung <<http://cba.mit.edu/people/kenny.cheung/>>)

ところで、これらの研究の背景について Neil Gershenfeld はこう述べている。

「信頼性の高い通信と計算にデジタル化が果たす役割と、リボソームによる分子の構築にデジタル化が果たす役割との類似性は、デジタル通信(コミュニケーション)およびデジタル計算(コンピューテーション)の革命と、未来のデジタル工作(ファブ리케이션)革命との類似性を示唆している。そこから類推すれば、リボソームのように、構築の方法を指示するコードが組み込まれた素材と、計算しながら構築するツールを利用するデジタルファブ리케이션が、製造革命をもたらすことがわかる。(中略)。現代の技術の粋を集めた工場でさえ、デジタルコンピュータを使ってアナログ素材を加工しているにすぎない。デジタルファブ리케이션では、組立工程そのものに知性が組み込まれることで、通信と計算のデジタル化とまったく同じ利点が製造にもたらされる。つまり、不完全な機械が、きわめて完璧な部品を製造できるようになるのだ。」

(Neil Gershenfeld, 2005, p225-226)

したがって、現在のデジタルファブ리케이션が真にデジタルたりえるためには、素材のデジタル化(デジタルマテリアル化)が必要なのである。我々の身体を形作っているタンパク質の組立工程は、リボソームという分子機械が担っている。この分子機械は、メッセンジャーRNA (mRNA) によってアデニン (A)、グアニン (G)、シトシン (C)、ウラシル (U) の四種類の分子にデジタルコード化された情報を解読し構築する。このようにして、リボソームは 10^{23} 個(アボガドロ数)もの構成要素をエラーなく正確に製造しているのであるが、この生命の生産システムを人工物に応用するために、アナログな素材から離散的な素材への進化が求められたのである。

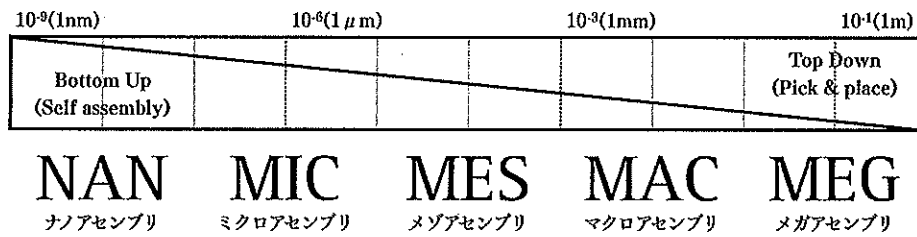


図5.3 デジタルファブリケーションの科学

Claude Shannon (1916~2001) が発明した情報理論の延長線上に、今日のデジタルファブリケーションはある。このような背景のもと2013年3月7日に『The Science of Digital Fabrication』というシンポジウムが開かれたが、ここではデジタルマテリアル/アセンブリプロセスの違いがそのスケールによって分類された(図5.3)。本研究が目指す建築規模のデジタルマテリアル/アセンブリプロセスは、「メガアセンブリ」という区分に含まれる。Hod Lipson によると、スケールが大きくなるにつれ、アセンブリプロセスにおけるトップダウンの影響が支配的になり、小さくなるにつれボトムアップによる影響が支配的になるという(図5.3)。

メガアセンブリにおいては、LarrySass らの研究や『WikiHouse』のように、一つ一つの部材形状は非有限であり、接合形式も非有限である。すなわち、メガスケールの領域においてデジタルマテリアルの研究は十分に為されておらず、おびただしい数の異なる部材を Pick&Place することによって成り立っているのである(図5.4)。

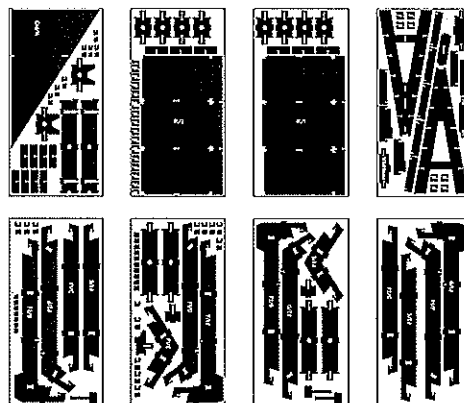


図5.4 メガアセンブリの構成部材例

(WikiHouse <<http://www.wikihouse.cc/>>)

他方で、スケールが小さい場合の構成手法として Self-assembly があるが、代表例として Skylar Tibbits の『Logic Matter』が挙げられる。この研究はシャノンの情報理論を応用した、デジタルマテリアルにおけるバイナリ表現の模索である。単位要素のジオメトリは4面体であり、内2面をインプット、残る2面をアウトプットのNANDゲートとし、0/1のノーテーションによってユーザーがエラーなく組み立てを行うことを可能としている（図5.5）。

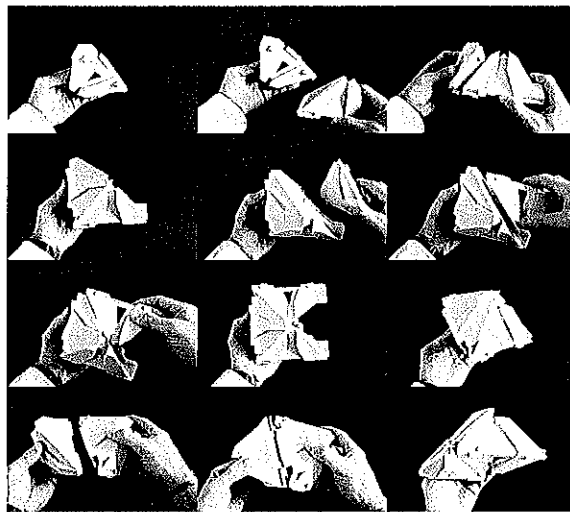


図5.5 User Programmability

(Skylar Tibbits <<http://www.sjet.us/>>)

このように、デジタルマテリアルは対象とするスケールによって分類可能であるが、その接合方式によっても分類は可能である（図5.6）。

$$DM = (1.P, 2.T, 3.A)$$

デジタルマテリアル 嵌合(Press-Fit) 外力(Take-On) 内力(Attraction)

図5.6 デジタルマテリアルの接合方式

まず、『GIK』や『LogicMatter』のように、要素同士を嵌め合わせることでアセンブリを行う接合方式がある。これを「嵌合接合 (Press-Fit)」と定義し、第一の接合方式とする。次に、水溶性接着剤を用いた Joris Laarman の『Digital Matter』のように、構成要素自体に、何らかの接合能力をもった外力を与えることによってアセンブリを行う接合方式がある。これを「外力接合 (Take-on)」と定義し、第二の接合方式とする。最後に、磁力を用いた関島慶太の『ケルビンブロック』のように、構成要素そのものが持つ引力によってアセンブリを行う接合方式がある。これを「内力接合 (Attraction)」と定義し、第三の接合方式とする。

以上、デジタルファブリケーションのアセンブリスケールの分類と、デジタルマテリアルにおける三つの接合方式による分類を明示したが、本研究では木材を用いた嵌合接合(Press-Fit)による、メガスケールのデジタルマテリアルの提案を行う。

[5.2] 継手仕口の研究

日本には古くから嵌合接合（Press-Fit）の一種である「継手・仕口」という伝統技術が存在する。これは金具を使用せず、木材同士を嵌め合わせることによって一体化を計る木工技術であるが、この優れた接合技術によって日本建築は元来分解／再構成可能な離散的特性を備えていた（図5.6）。

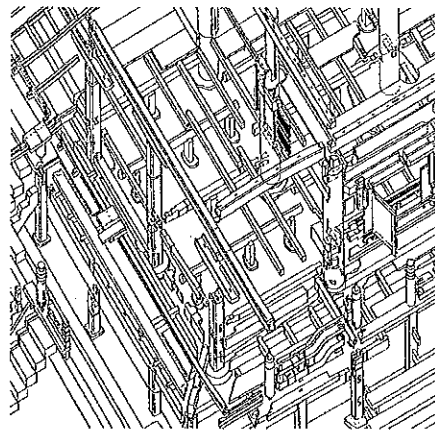


図5.6 法隆寺聖霊院の継手仕口

(法隆寺国宝保存委員会編 『法隆寺國寶保存工事報告書第十二冊』 1955年)

当然、世界各地にも同様の技術は存在するが、日本ほど繊細で複雑な継手・仕口が発達した国はない（図5.7）。多くの国は、釘や金具に頼った接合方式へと、早くから転換を計ったからである。

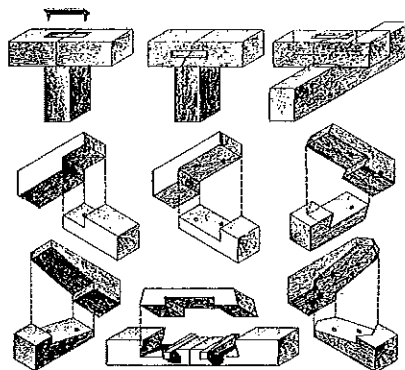


図5.7 ドイツの継手仕口

(太田邦夫 『継手仕口 --日本建築の隠された知恵』 1984年)

さて、継手と仕口の分類に関して解説書によって定義は多様だが、ここでは継手を「ふたつの材を長手方向に継ぎ足すこと」とし、仕口を「ふたつの材をある角度をもって接合すること」と定義する。

ところで、継手・仕口は約300種の接合パターンがあると言われているが、現在、在来構法で用いられているのは、その内の限られた数種類であり、技術をもった専用の大工が精緻な加工を施すことによって製作されている。

一方、プレカットと呼ばれるNC加工機による自動化も行われているが、ここで用いられている形状は「腰掛け蟻継ぎ」と「鎌継ぎ」のおおよそ二種類であり、構造的な合理性よりは、施行容易性が重視され、最終的には金具によって接合されている。したがって、現在の機械加工による継手・仕口は、元来大工達が追求してきた「完全な嵌合による一体化」を目指しておらず、単なるアセンブリのガイドとして使用されているのである。

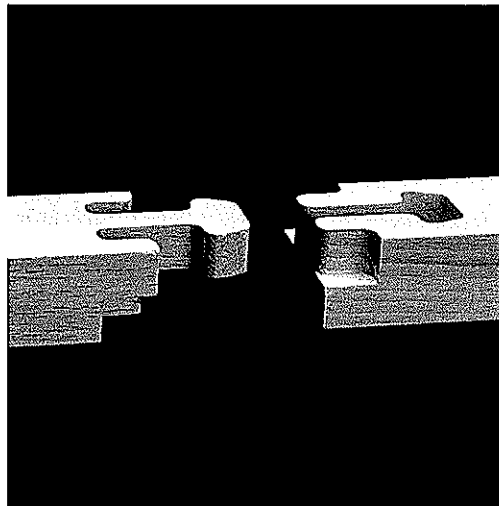


図5.8 CNC継手仕口

(Jochen Gros <<http://www.flexiblestream.org/project/50-digital-wood-joints>>)

このような形骸化がおきている要因の一つには、プレカット“工場”という大量生産／大量供給モデルに基づいた生産体系に準拠していることが挙げられるだろう。大工の優れた能力として、一つ一つの木材の性質／癖を読み解き、それに最適な加工を施すことが挙げられるが、大量生産の工場のラインにおいては、一つ一つの部材の特性に対応し、その都度補正をすることが不可能だからである。ところが、パーソナルなものづくりの文脈においては、緻密な個別対応が可能と

なる。多くの CNC の使い手達は、素材／気温／湿度ごとに操作する機械のパラメータを CAM 上で調整し加工を施している。Jochen Gros は、このようなユーザー層に向けて、既存の継手・仕口を CNC によって加工可能なデータへとアップデートした『50 DIGITAL WOOD JOINTS』という50種類の接合形状のデータを公開している（図5.8）。

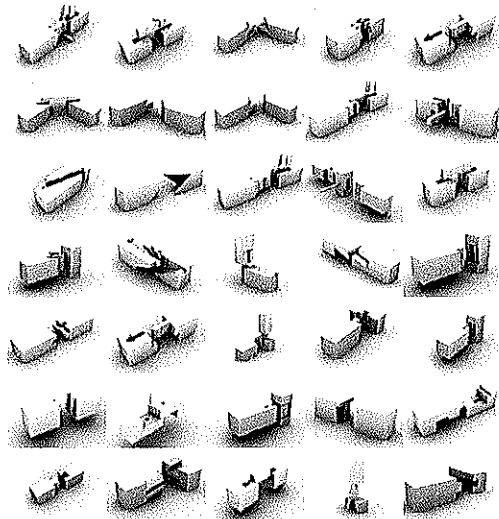


図5.9 継手仕口のオープンソース化

(Kenji Kanasaki <<http://www.thingiverse.com/thing:169723>>)

他方で、金崎健治は日本の代表的な54種類の継手・仕口の3Dデータをインターネット上で公開した（図5.9）。これにより、縮小して建築以外の用途で用いることや、異なる材料による使用等、新しい展開が期待される。

以上二つの試みは、継手・仕口のオープンソースデザインの事例として興味深い。真のオープンデザインを達成するには、これらを生み出すための生成的なインターフェースが必要となる。実は、日本の継手・仕口は、20種類程度の基本形の組み合わせによって成り立っている（源愛日児, 1989）（図5.10）。例えば、腰掛け蟻継ぎは、「腰掛」と「蟻継」の複合によって成り立っている。このように継手・仕口は、使用される部位や、それに伴って材に生じる変形等を加味し、基本形を組み合わせることによって生成されてきたのである。本研究では、このような継手・仕口の生成原理を Press-Fit の手法として採用し、ものを離散化するにあたって生じる接合部の設計において、その現代的応用を計る。

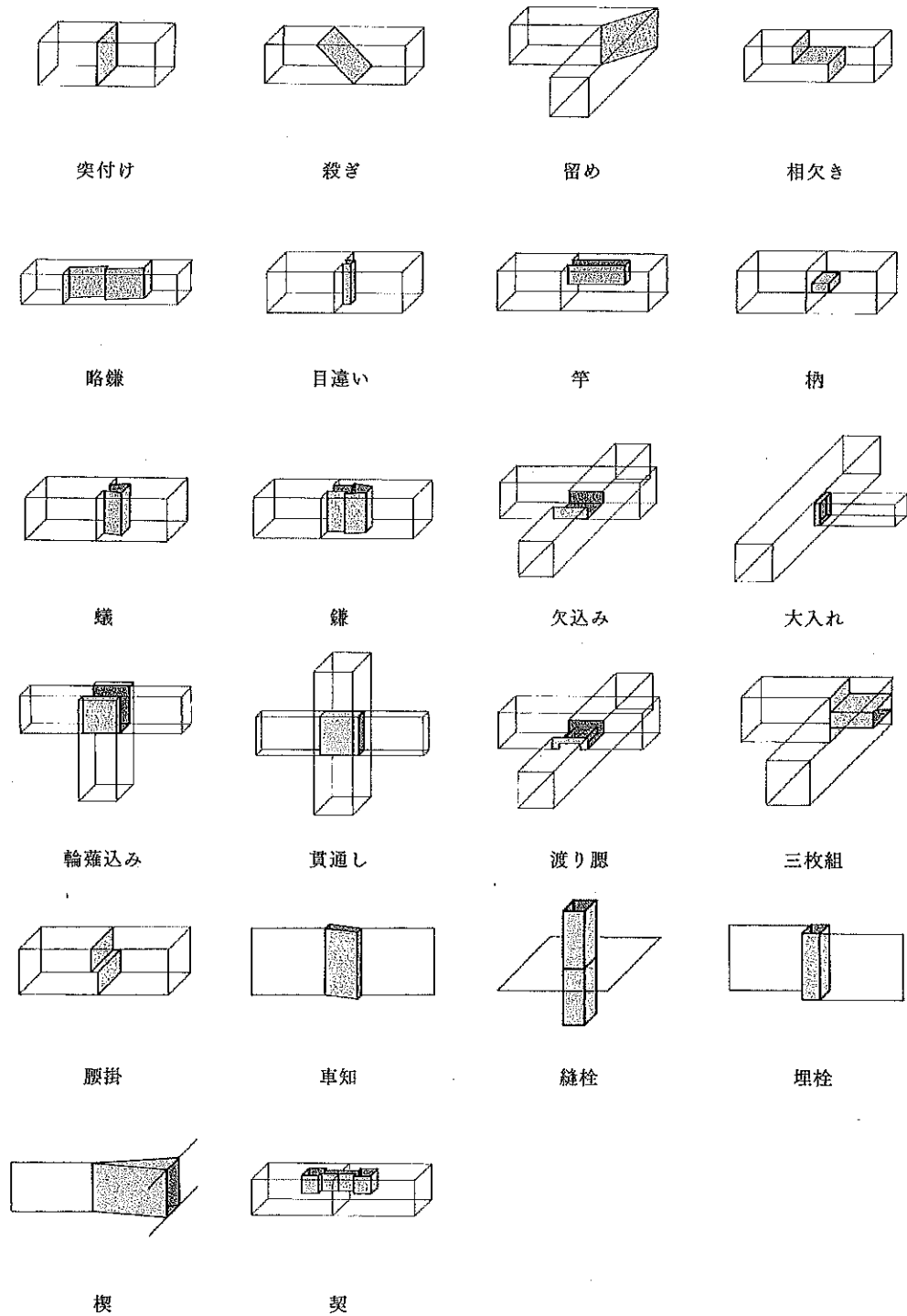


図5.10 継手仕口基本形

(内田祥哉 『在来構法の研究 --木造の継手仕口について』 1993)

[5.3] 本研究の位置づけ

以上のように、本研究では継手・仕口の手法を応用したメガスケールのデジタルマテリアルを設計し、オープンデザイン環境を構築するための《オブジェクト》として提示することを研究の目的とする。ここで、本研究の目指す手法の位置づけを示す（表5.1）。

3DCADの分類方法の一つとして、《ソリッドモデラ》と《サーフェイスモデラ》という区分がある。データ形状を密実なモデルとみなすか、面のみで構成されるモデルとしてみるかの違いである。本研究が対象とする建築は、内部に空間を内包するモデルである。GIKに代表されるデジタルマテリアルの多くは、密実でソリッドな物体を構成することを目的としているが、建築等の巨大なスケールにおいては、物理世界におけるサーフェイスモデラを模索する方が合理的である。

表5.1 Digital Material/本研究

	Digital Material	本研究
属性	ソリッド	サーフェイス
解像度	Hi-Fi	Lo-Fi

また、デジタルマテリアルの解像度は、その単位の大きさに依存する。例えば、砂のような大きさにまで構成要素が小さくなれば、その分全体の解像度が上がる。しかし、メガスケールの構築物において、単位要素が小さくなればなるほど、アセンブリの複雑性が増すのである。

ここで、Human Computer Interaction Group の Stefanie Mueller の提唱する『Lo-Fi Fabrication』という概念を導入する（図5.11）。試作段階であれば、出力に時間のかかる高い解像度（Hi-Fi）のプロトタイプよりも、解像度を低くした（Lo-Fi）プロトタイプを何度も出力する方が合理的であるという発想であ

る。ここで用いられているのは、対象とする3Dモデルの輪郭をワイヤーフレーム形式に変換して出力するという手法である。

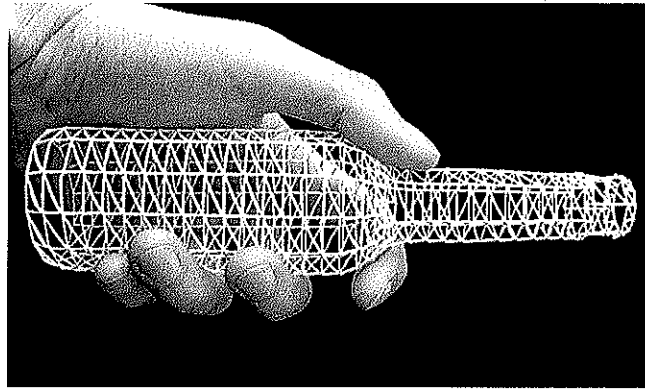


図5.11 WIREPRINT

(Stefanie Mueller <<http://stefaniemueller.org/>>)

そもそも、建築のような否が応でも自然環境と呼応する必要のある構造物は、外環境と内部空間との間に幾つもの層を纏っており、部位により用いられる素材が異なるといった「コンポジット構造」なのである。したがって、構造体そのものには、そもそも高い解像度は必要ではなく、最終的な仕上げ材が建築の解像度を決定するのだ。たとえば、白川郷等の茅葺き屋根は、まず Lo-Fi の扱首構造を組み上げた上に、何層もの茅を葺くことで成り立っている（図5.12）。

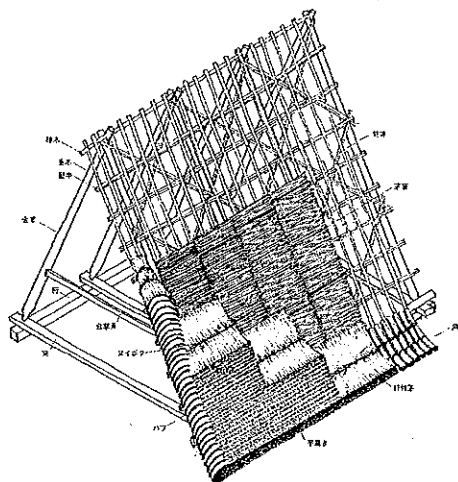


図5.12 白川郷の扱首・駒尻

(安藤 邦広, 乾 尚彦, 山下 浩一『住まいの伝統技術』1995)

また、扱首構造だけでなく、和小屋成立後の茅葺き屋根も同様に、Lo-Fi のストラクチャーに縛り付けるようにして、柔らかい自然素材が《オブジェクト》に絡み付くことによって、流麗な屋根形状を生み出している（図5.13）。

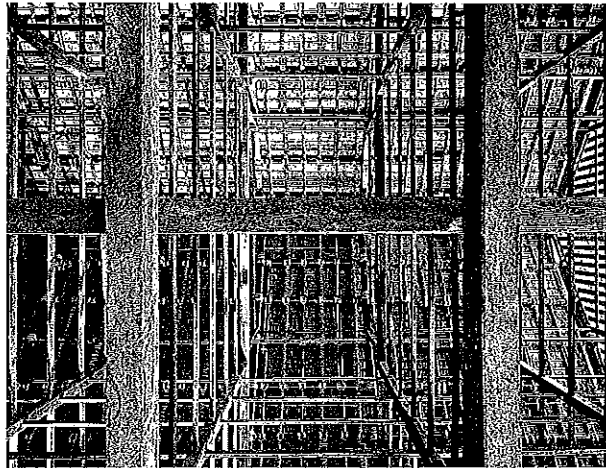


図5.13 江川家和小屋 (2)

(関野克監修, 鈴木嘉吉, 工藤圭章編集協力『日本の民家 第2巻 農家Ⅱ 中部』1981年)

このような歴史的背景から、その延長線にある「未来の民家」を夢想すれば、茅の様に柔軟な人工物が、洋服のように何層も被さることによって屋根が仕上がるような、そんな「柔らかい構造体と柔らかい仕上げ材」による構法の実現が期待される。未来の住処は、やはり「やわらかくて毛深いものになる」のだろう。

ところで、構造体と仕上げ材を分離する考え方の根源は、人体の構成手法にある。2007年に『スキン+ボーンズ：1980年代以降の建築とファッション』という展示が開催されたが、人体を構成する要素は骨と皮だけではない。そこで、人体をアナロジーとした筆者の建築の解釈について（表5.2）に纏める。人体は外環境と呼応するために、皮膚をインターフェースとして内環境を調節しているが、建築においてはそれぞれ役割の異なる幾つものインターフェースによって為されている。例えば、木造建築は「1. 外装材」「2. 通気胴縁」「3. 防水層」「4. 野地板」「5. 断熱層」「6. 構面」「7. 躯体」「8. 屋内胴縁」「9. 内装材」という9層の薄いレイヤーによって、環境をコントロールしている（西沢大良, 2010）。

表5.2 人体/建築

	人体	建築
support	骨	躯体
shell	皮	仕上げ材
infill	脂肪・筋肉	充填材
life-line	血	水道
power-line	神経	電気

他方で、Larry Sass らの研究は合板をそのまま外壁として利用しているが、上述したような仕上げ材を付け加える事のできる形式、断熱材のような素材を内部充填可能な形式を達成するには、やはり Lo-Fi のワイヤーフレームの構造形式が相応しいのではないだろうか。

このような前提に立ち、次章では Lo-Fi のワイヤーフレーム形式による、《サーフェイスモデル》としての《オブジェクト》を設計するための手法の提示を行う（図5.14）。

$$\begin{array}{ccccccc}
 \text{“X”} & = & (\text{MA} \times \text{TS} \times \text{SM} \times \text{LF}) \\
 \text{研究手法} & & \text{メガアセンブリ} & \text{継手・仕口} & \text{サーフェイスモデル} & \text{Lo-Fi} & \\
 \end{array}$$

図5.14 研究手法“X”

[6] 手法

[6.1] ジオメトリの離散化

本章では、本研究が提案する「ジオメトリの離散化」「エレメントの離散化」「マテリアルの離散化」の3つの離散化手法について述べる。さらに、これらすべてを適応した構築物を『Digital Frame』と定義する。

まず始めに、大前提として、Shopbot の機械制約から派生する幾何学的制約について述べる。Shopbot のような2次元の切削機によって製作可能な部材の自由度は「1」である。つまり、切削面 (XY平面) に対して、1次の変形操作が可能である。一方で、Z軸方向に変形を施そうと思えば、切削した部材に対してZ軸方向へのベンディング (2次の変形) を行う必要があり、ファブリケーションの手順が増える。したがって、本研究では、曲げ加工を必要とせず2次元切削によって3次元の構造体を製作可能な手法を提示する。

前章で述べた通り、本手法は Lo-Fi のワイヤーフレームによる構造体を製作することを目的とするが、このような製作手法のプリミティブな形状として、三角形もしくは四角形を幾何学単位とするものが挙げられる。Buckminster Fuller (1895~1983) (以下 Fuller) の提案した『Geodesic dome』は三角形を幾何学単位としたものの代表例であるが、辺の長さの異なる三角形によって六角形と五角形による2種類の「第一システム」を構成し、さらにそれら二つの上位幾何学 = 「第二システム」によって球体を構成する仕組みになっている。

一方で、Helmut Pottmann (以下 Pottmann) らの『Discrete Surface』の研究で用いられるメッシュ形式は、Planar Quadrilateral Mesh (PQ mesh) である。この四角形が好んで用いられる理由としては、三角形に比べ軽量の構造体が製作可能であること、「Torsion free nodes (交点における幾何学的捻れの存在しない状態)」であること、交点に集まる部材数が四つであること、これらにともなう小部材化、低コスト化が見込めることが挙げられる (Pottmann, 2007)。

他方、この手の研究において「Node (交点)」と「Joint (接点)」の設計が最も重要であり、そのディテールが全体の aesthetic (審美性) を左右する。どちらも直線による金属製の「梁」と、四もしくは六つの接点数をもった金属製の「ジョイントパーツ」を繋ぎ合わせることによって曲面が製作されている。

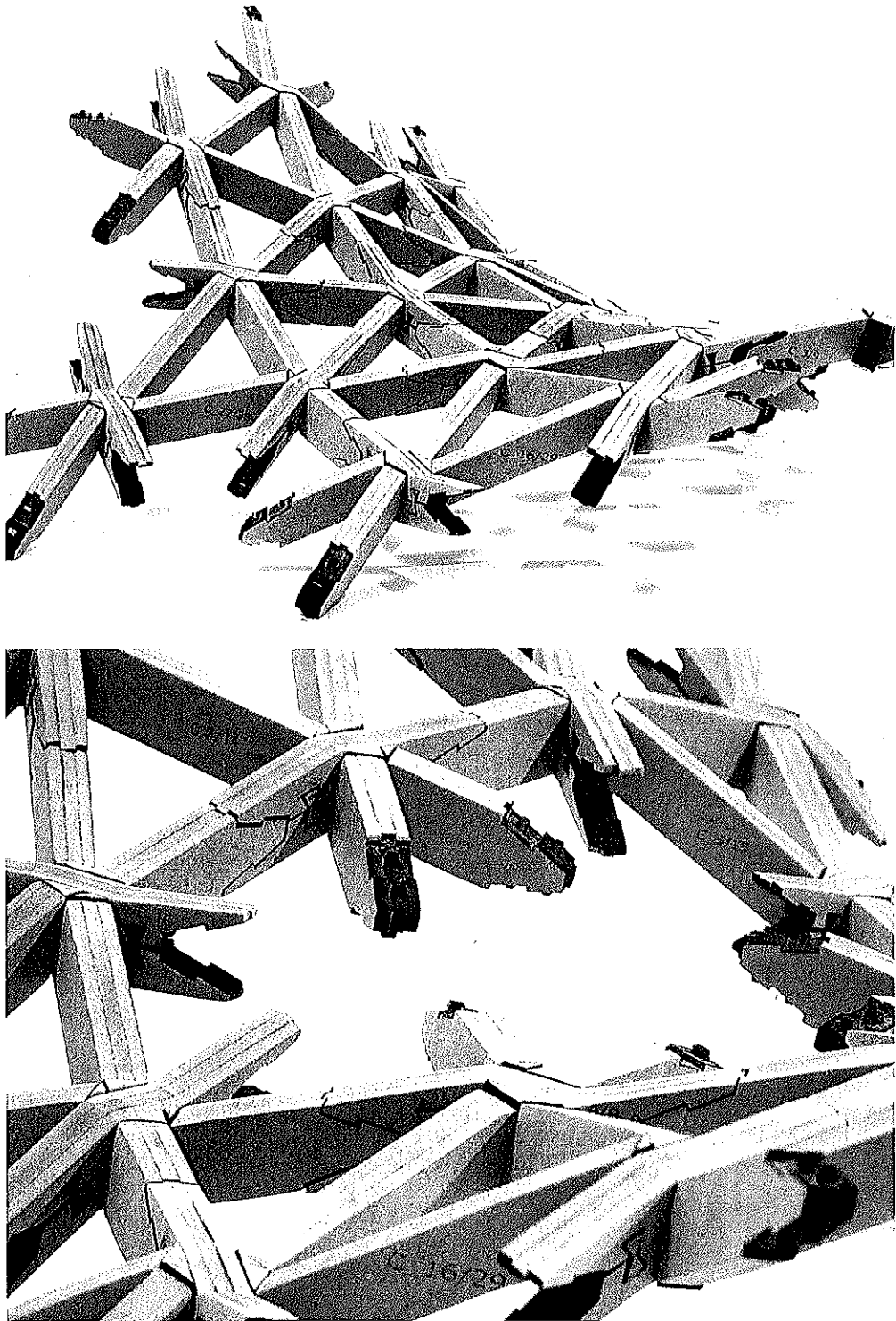


图6.1 Digital Frame

本研究では、三角形を幾何学単位として採用し、木質梁の組み合わせによって曲面が製作される手法を提示する(図6.1)。交点を「仕口」として捉えることで、金属のジョイントパーツを必要としない手法である。これは、一交点における「6本の梁+1つのジョイント」という捉え方から、「3つの梁+1つの仕口」という捉え方への大転換である。ここで重要なのが、3本の梁を1つの仕口に納めるための幾何学的処理である。例えば、Fullerの『Geodesic dome』では、円の中心から球の表面に向けて射影を行うことで、三角形の分割領域を導き出している。これを3つの梁と1つの仕口のモデルで捉えた場合、その変形自由度は「2」となる。したがって、自由度「1」の部材によって曲面を構成するためには、正三角形による平行投影が必要となる。以下に幾何学を離散化するためのプロセスを述べる。

- 1) ユーザーがインプットしたサーフェス (Import Surface) をもとに、境界領域 (Bounding Box) を作成する。その立方体の平面の内、サーフェスの法線方向に存在する平面を取り出し (Bounding Surface)、それを正三角形のグリッドに分割する (図6.2)。
- 2) このグリッドを元のサーフェスに投影 (Projection) し、その点群 (Projected Points) を結ぶことで (図6.3)、目的の幾何学が完成する (図6.4)。

以上の幾何学的処理により、すべての交点と同じベクトルを向き、この方向に対して柱を配置することが可能となる。すなわち、この形式は「和小屋に最適化した屋根形式」であるといえる。各交点のベクトルが異なる場合、Node間を結ぶ部材断面において「捻れ (Torsion)」が発生してしまうが、この処理により「Torsion free nodes」を実現した。最後に、三角形を用いる理由であるが、四角形に比べて解像度が高いこと。また、屋根だけでなく、壁として用いることを想定しているため、より強度のある形式であること。さらに、上述した手法において正方形のグリッドを用いる場合、4辺に切り取られる領域は平面 (Planar) ではないが、正三角形をグリッドとして用いる場合、3辺で切り取られる領域は平面となり、表面処理や内部充填処理が容易であることが挙げられる。

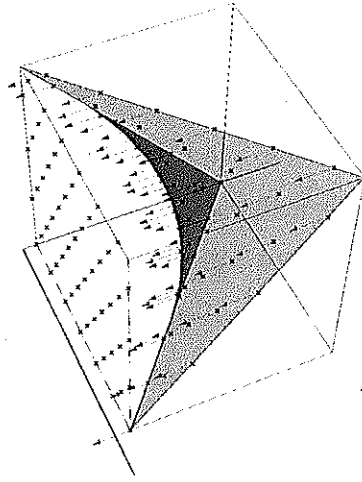


图6.2 射影 1

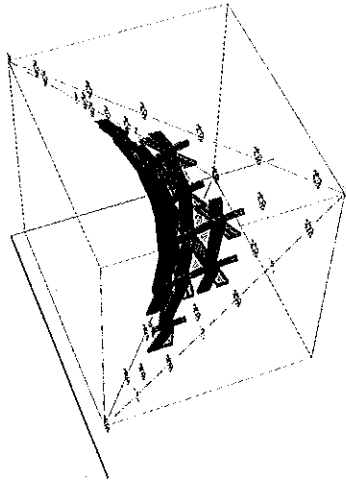


图6.3 射影 2

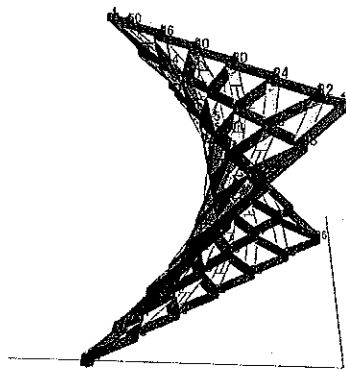


图6.4 射影 3

[6.2] エレメントの離散化

以上がジオメトリ全体の離散化手法であるが、これによって生成される幾何学形状を、さらに微小な単位要素に分割する。(図6.5)における緑色の領域がその単位要素である。単位要素内の三つの Node は、それぞれ二つの長い梁一つ一つの短い梁による仕口で結合されている。また、1要素内には12個の端点があり、内六つが雄型の継手、残る六つが雌型の継手である。雄型と雌型が嵌め合わさることで、隣接する要素と結合していくシステムとなっている。

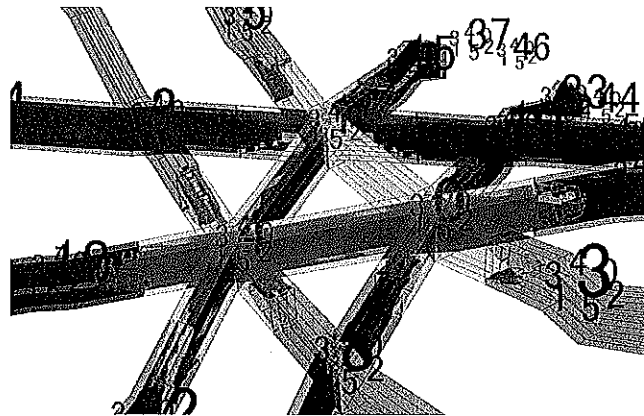


図6.5 エレメントの離散化

(図6.6)が雄型のジョイントの形であり、(図6.7)が雌型の形状である。雌型は(図6.8-図6.9)のように、Nodeにおける法線方向のベクトルに対して、上下に二つに分割できる形式となっており、これにより、各要素同士の容易な分解/再構築を可能としている。また、雄型と雌型を結合した後、5章2節で述べた「継手・仕口基本形」の内の一つである「契」を打ち込むことで上下を一体化する。ところで、この継手形状は四つの基本形の合成によって生成されている。まず、引張りに強くするために「鎌」をベースとして選択し、雌型と噛み合わせる際のせん断方向のズレを防止するために「柄」を付け、さらにせん断方向に垂直な方向におけるズレを防止するために「目違い」を付けた。最後に、「契」を打ち込むことで完成する形式になっている。

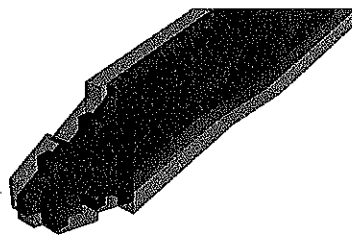


图6.6 継手 1_雄型

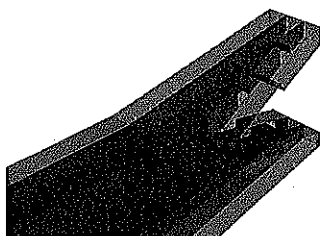


图6.7 継手 2_雌型

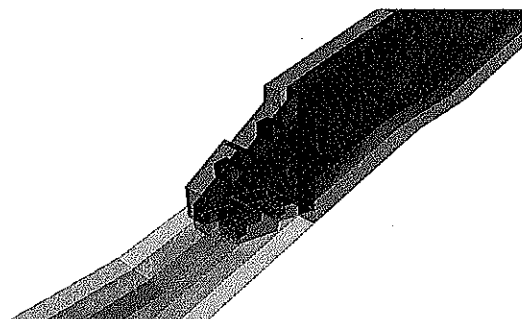


图6.8 継手 3

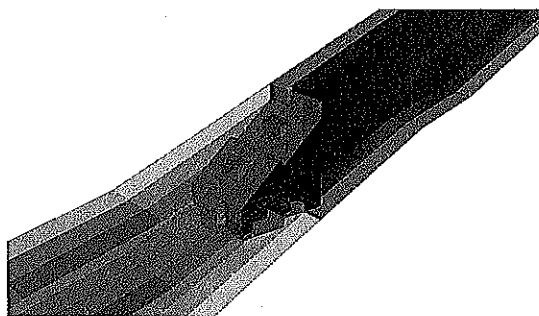


图6.9 継手 4

このような継手が要素端部につくことで、隣接する6個の単位と組み合わせる(図6.10-図6.12)。これによって完成した7個の要素の集合を「第二システム」とすると、さらに6個の第二システムと組み合わせれば、より大きな「第三システム」となる(図6.13-図6.14)。ユニットを単位として計画する場合は、矩形もしくは六角形のユニットとして一つの纏まりにすることも可能である(図6.15)。また、建設プロセスにおける作業員の領域分担は、これらの区分を用いて計画するのが良いだろう。

さて、実際の計画にあたって、ユーザーは最初の Import Surface の定義とともに、「単位要素の三角形の低辺=各 Node 間の距離」を入力する必要があるが、本手法では「尺寸=303mm」のモジュールを推奨する。なぜならば、尺寸で設計しておけば、畳や扉といった既存の「サブシステム」を利用することが可能だからである。例えば、X軸方向に一尺間隔のグリッドを引いた場合、Y軸方向の間隔は半尺に3の平方根を掛けた値になる(図6.16)。したがって、グリッドに納める場合はサブシステムの一辺をさらに加工しなければならないが、60度方向のグリッドに対して計画していく場合は303mmのピッチになるため、既存のサブシステムをそのまま用いる事が可能である。

一方、本論文ではフレームの提案のみを扱うが、実際に建築の計画を行う場合、(図6.17)のようにこの尺寸のグリッドに則って柱の計画を自由に行う事が可能である。当然、和小屋の束の配置もこのグリッドを使用すればよく、屋根形式も含めたシステムチックな架構形式となっている。

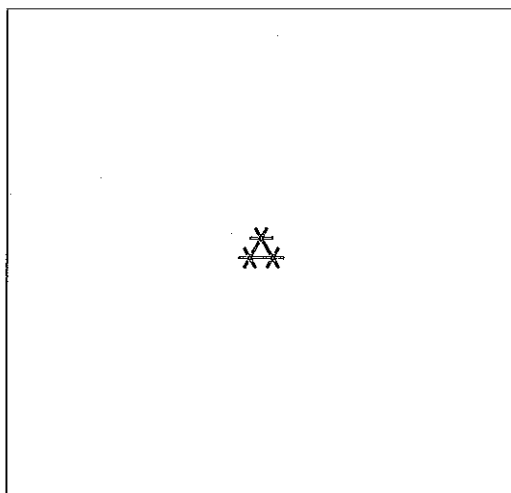


图6.10 1st system

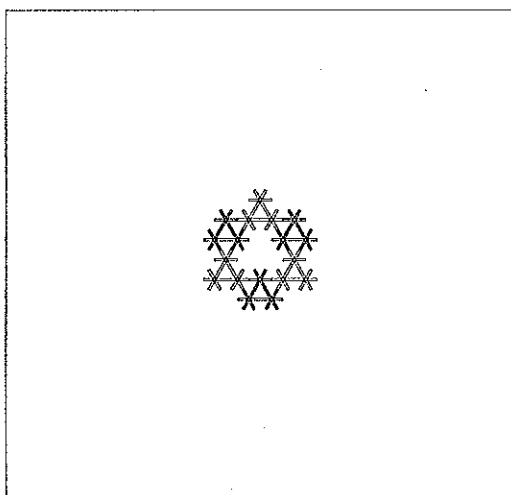


图6.11 1st*6

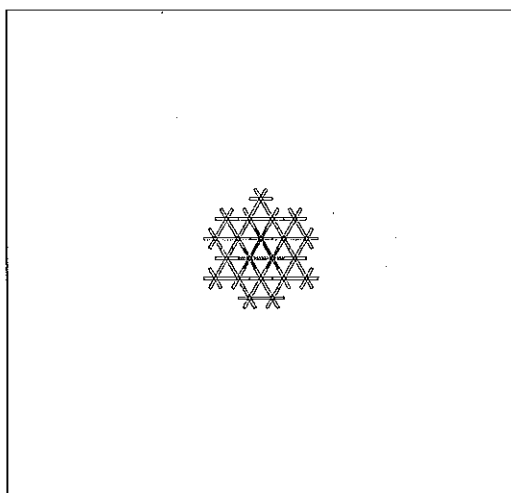


图6.12 2nd system

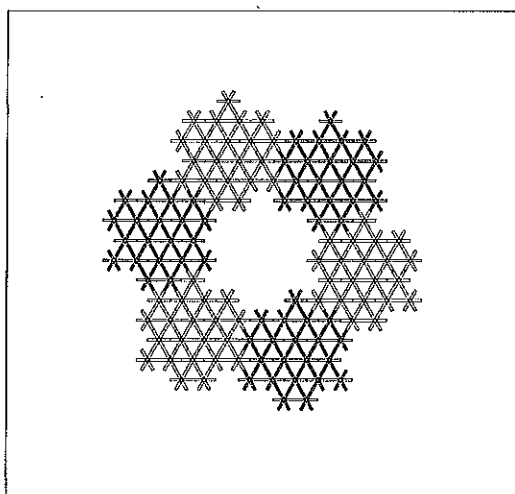


图6.13 2nd*6

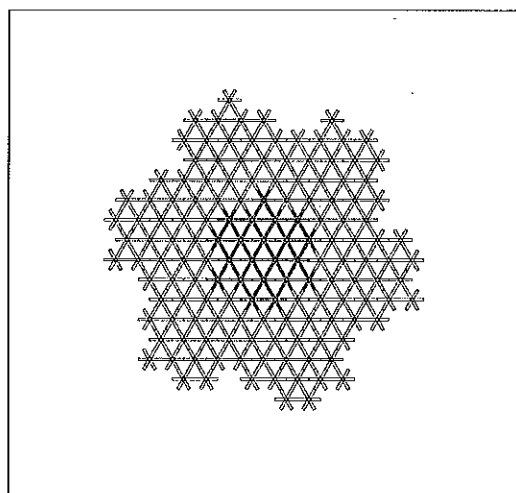


图6.14 3rd system

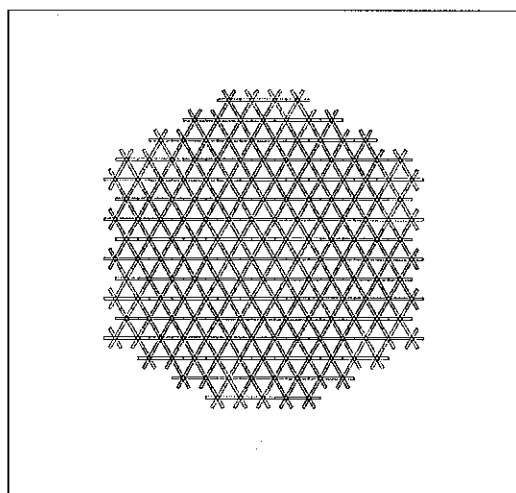


图6.15 Hexagonal unit

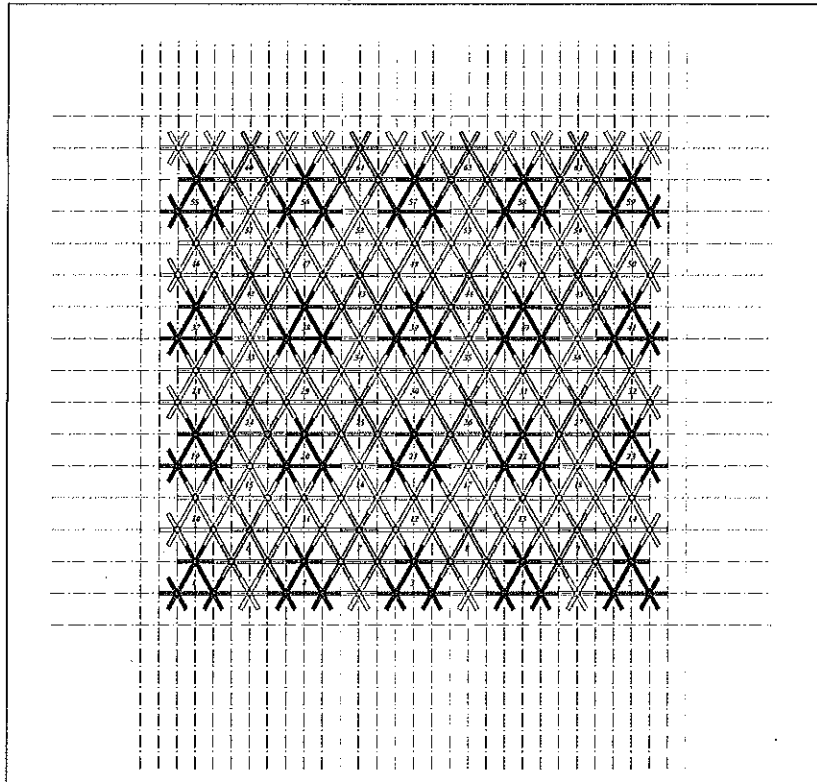


図6.16 尺寸モジュール

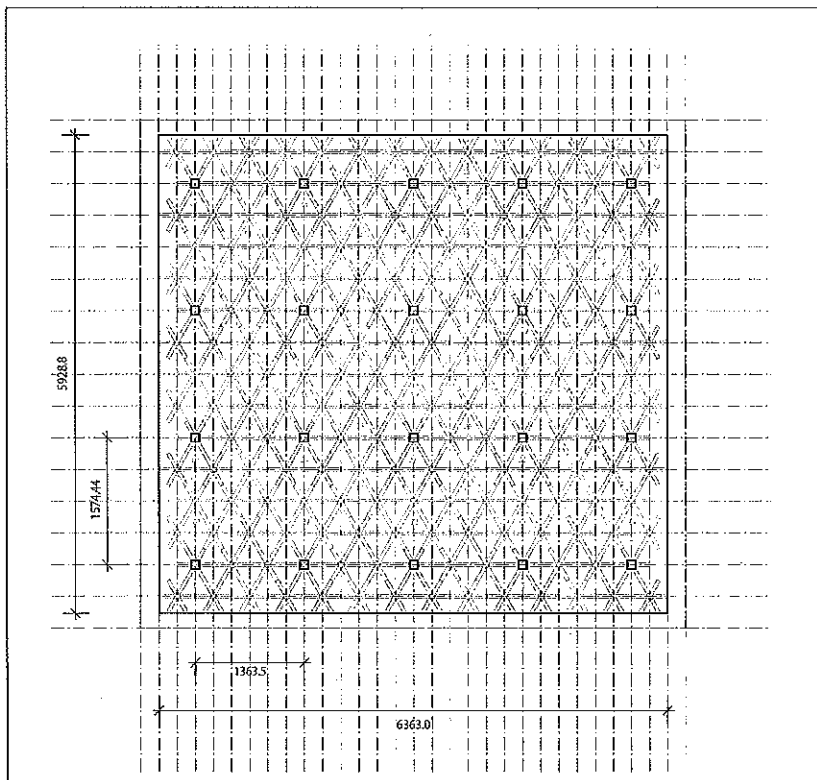


図6.17 柱の計画例

[6.3] マテリアルの離散化

続いて、本節では単位要素のファブリケーション方式について述べる。まず、先述した単位要素であるが、これは3本の長い部材と、3本の短い部材によって構成される(図6.1)。したがって、単位要素自体も分解組み立てが可能な単位によって構成されており、一つのシステム(1st system)を作り上げている。

また、長い部材の端点は雄型の継手形状をしており、短い部材の端点である雌型の継手と結合する(図6.19)。また、1単位は長い部材3本それぞれを互い違いに「編み込む」ことによって完成する。このような構造形式を「Reciprocal frame structure」というが、やじろべいの様に互いに伝わる力をバランスさせることによって、相互依存のネットワークを構成する合理的な形式である。

さらに、各々の部材も3枚の板材を圧着することによって構成されている(図6.20)。その際、木ダボをガイドとして利用する。そもそも、合板や集成材は薄板をラミネートすることによって製作されている。したがって、同様の三層の薄板をラミネートすることによって、3次元切削を回避している。当然、この継手のデザインも、三層のレイヤーの圧着によって成立可能な形状として選定している。

一方、Nodeにおける仕口のデザインであるが、これも2次元の部材で構成可能な部位と、2.5次元の切削で製作可能な部位に分けることによって、複雑な加工プロセスを回避している。すなわち、3次元の部材を削る(subtract)のではなく、3次元の部材を付け足す(add)方が合理的であるという考え方である(図6.21-図6.23)。

このように、単位要素を構成するマテリアルそのものも離散的に考えるという手法を用いることで、ファブリケーションを単純化しているのである。

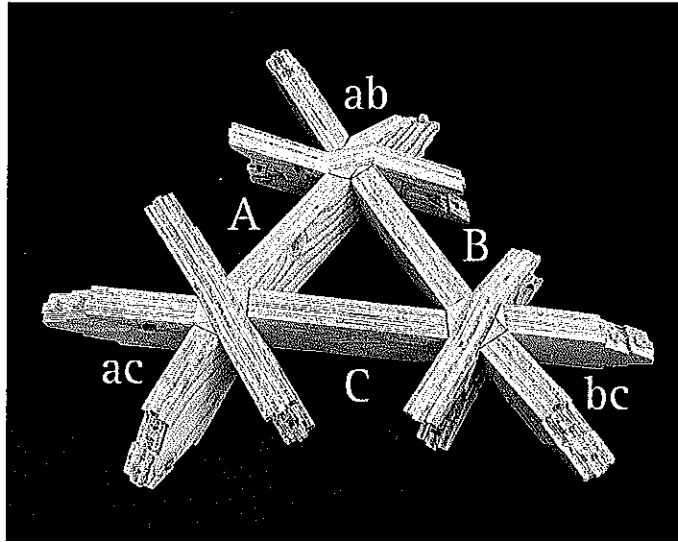


図6.18 構成単位1—A/B/C: 長材*3 / ab/bc/ac: 短材*3

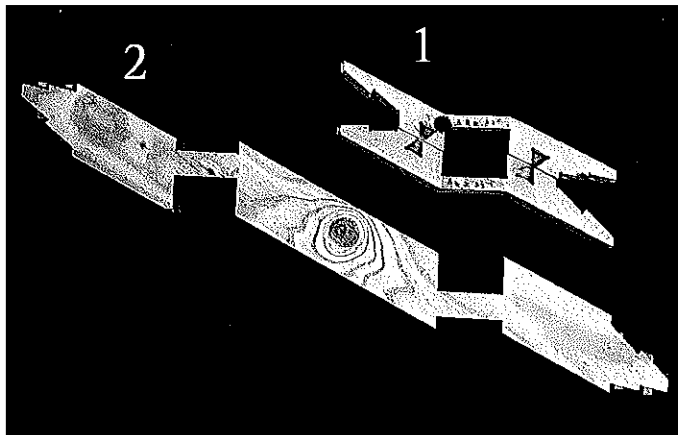


図6.19 構成単位2—1: 短材=雌型 / 2: 長材=雄型

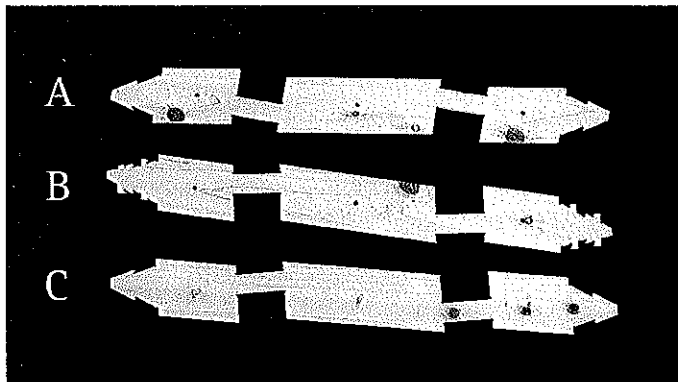


図6.20 構成単位3—A/B/Cを圧着して一つの部材に

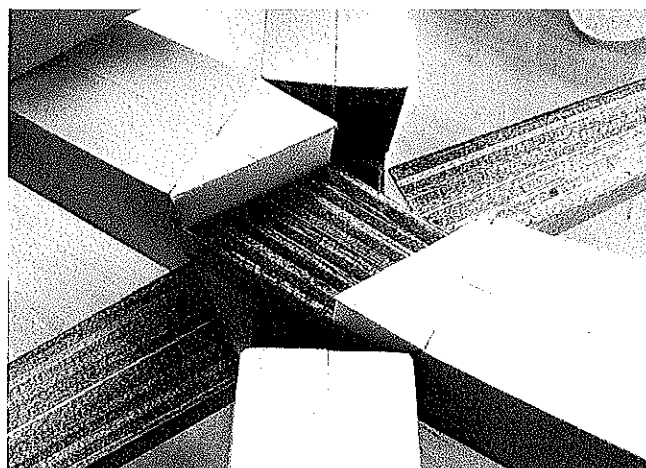


图6.21 仕口 1

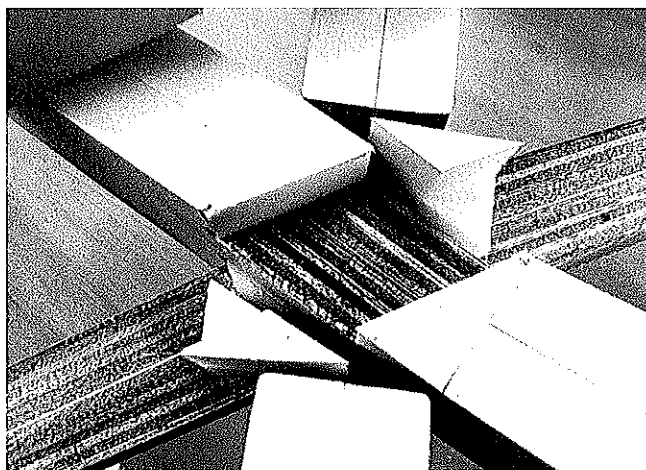


图6.22 仕口 2

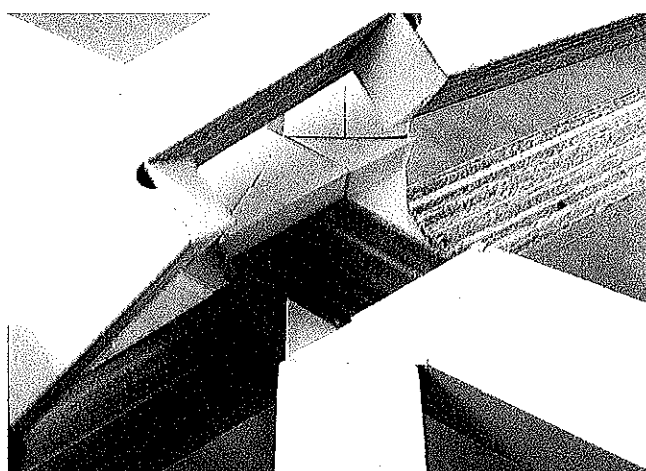


图6.23 仕口 3

[7] 設計

[7.1] CaseStudy01 – 原型モデル

本章では、前章で提示した手法を用いた、三つのケーススタディについて述べる。それぞれ、《オブジェクト》のパートである「実装」の節と、《プラクティス》のパートである「評価」の節、これら二つの結果に基づいた「考察」の節の三段階で展開される。(図7.1)に各ケーススタディの見取り図を描く。上部白地の四角が《CaseStudy01》の領域であり、そこから派生した《CaseStudy02》と《CaseStudy03》は下部黒地の四角に該当する。

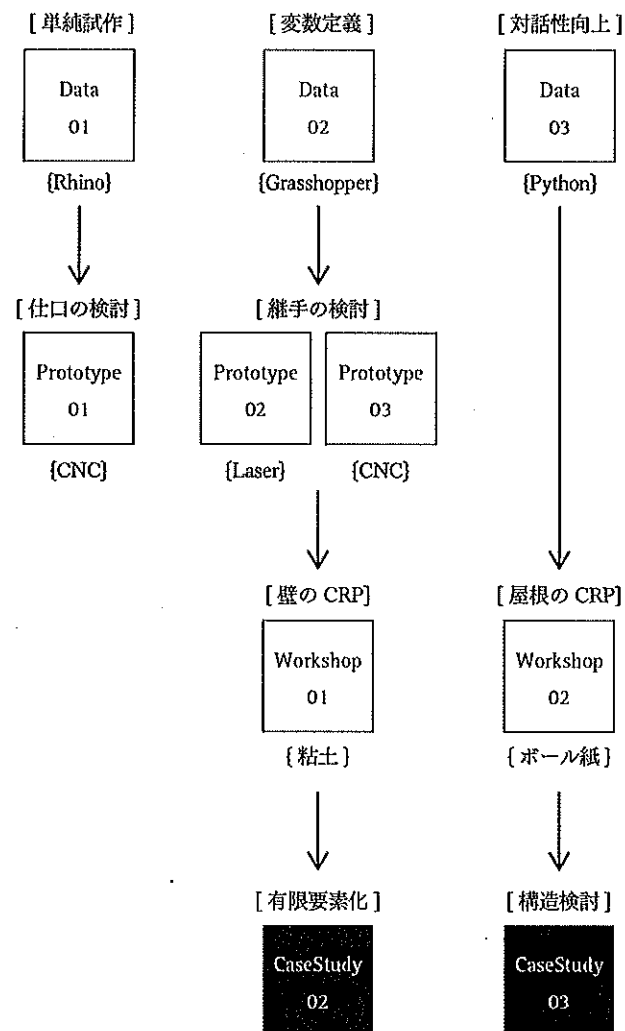


図7.1 設計のフロー

[7.1.1] 実装

まずはじめに、提案手法の、物理空間上における妥当性の検証を目的として「生成的なインターフェースの実装」と「ファブリケーションの実装」を行う。《CaseStudy01》では3つのプロトタイプを作成する。それぞれのプロトタイプの実装方法、使用機材、検討事項、規模、製作時期を（表7.1）に纏める。

表7.1 Prototype01/02/03

	Prototype01	Prototype02	Prototype03
ソフトウェア	Rhino	Grasshopper	Grasshopper
マシン	Shopbot	LaserCutter	Shopbot
検討事項	仕口	継手	継手
規模	単位要素	プロダクト	家具
製作時期	2013年11月	2014年2月	2014年3月

また、《Prototype01》では実際に製作することによって、第6章で示した離散的手法の物理空間上における妥当性を実証し、《Prototype02》では仮説で提示した「局所的に分解可能な性質＝局所分解性」を実証、さらに《Prototype03》では「局所的に構築可能な性質＝局所構築性」を実証することに成功した。

A) Prototype01－離散的手法の実証

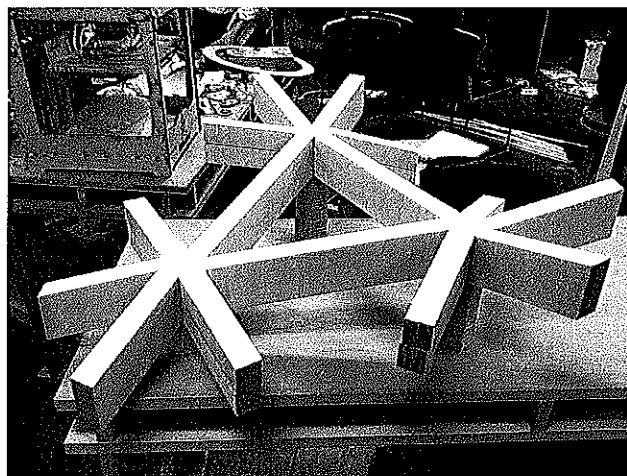
一つ目のプロトタイプ製作は2013年11月に行われた。手法の考案と製作は平行に進行し、思いついたアイデアを迅速に形にすることが第一の目的であった。使用したのは12mmのシナ合板であり、加工はShopbotで行われた。検討事項は「仕口形状の模索」と、それを実現するにあたっての「仕口部のオフセット／クリアランス数値の模索」、「仕口部マテリアルの模索」である。

結果として(図7.2)のようなプロトタイプが完成し、提案手法が物理空間上で成立するを実証した。クリアランスは12mmの合板一枚あたり、0.3mm必要であり、三枚分の計0.9mmオフセットすることで理想的な接合を実現した。

また、(図6.21-6.23)のような仕口部の離散化手法に用いる素材の選定に関しては、3Dプリント＝加算系による試作(図7.3)と、CNC＝減算系による試作(図7.4)を行った。

前者のメリットとしては、単位出力当りのコスト(時間／金額)が一定であること、異なるマシンを平行に稼働させることによる製作時間短縮が可能であること、素材の多様性を導入できる事の三点が挙げられる。一方、デメリットとしては、異素材を用いることによる構造全体の強度／耐久性の評価の難しさである。

他方、後者のメリットは、木材のみによって全体を製作する事が可能なことである。対して、デメリットとしては(図7.4)の様に、一つ一つの部材が小さいため「タブ」を付けて切削する必要があり、これを取り除く工程が増えることである。具体的には、「鑿(ノミ)」を用いて取り除くことで部材を取り出す。



7.2 Prototype01

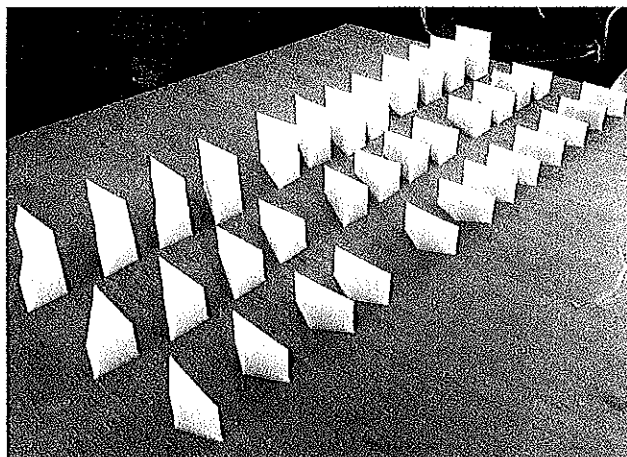


図7.3 3Dプリントによる仕口パーツ

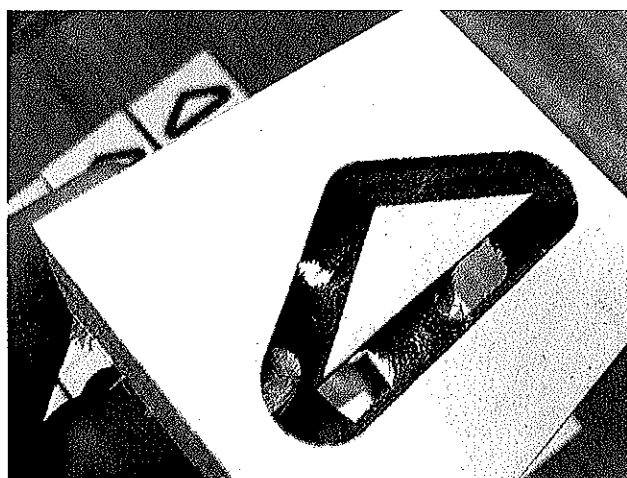


図7.4 CNCによる仕口パーツ

B) Prototype02－局所分解性の実証

二つ目のプロトタイプは、継手形状の検討を目的とした。製作は2014年2月に行われ、材料は4mmのMDF、加工はレーザーカッターを用いた。雌型／雄型の理想的な噛み合わせの状態を模索するために、オフセット値／柄の長さ／目違いの長さ等のパラメーターの検討を行った（図7.5）。

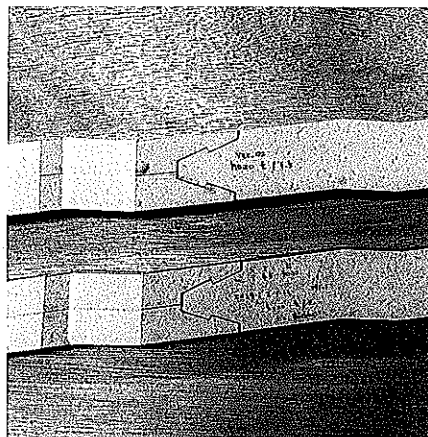


図7.5 LaserCutterによる継手

ところで、《Prototype01》も同様であるが、制作時に用いる材料／大きさ／機械それぞれによって、オフセット値などのパラメータが異なるため、通常のCADを用いて作図した場合、その都度書き換えなければならない。そのため、《Prototype02》と《Prototype03》では、Rhincerosのプラグインであるグラフィカル・アルゴリズム・エディター「Grasshopper」を使用してパラメトリックに形状の変更が施せるようなプログラムを作成した（図7.6）。

また、今回のプロトタイプでは「第二システム」である7個の単位要素によって構成されるモデルを作成／出力した（図7.7）。ImportSurfaceの形状は通常の製作プロセスとの差異を明快にしめすため「HP曲面」とした。

結果として、誤差なくスムーズにアセンブリを行うことができ、仮説で提示した「部分部分で置換可能な形式」であるということを実証した。このような、破損／エラーがおきた要素だけ部分的に分解／再構築可能な性質のことを「局所分解性」と定義する。

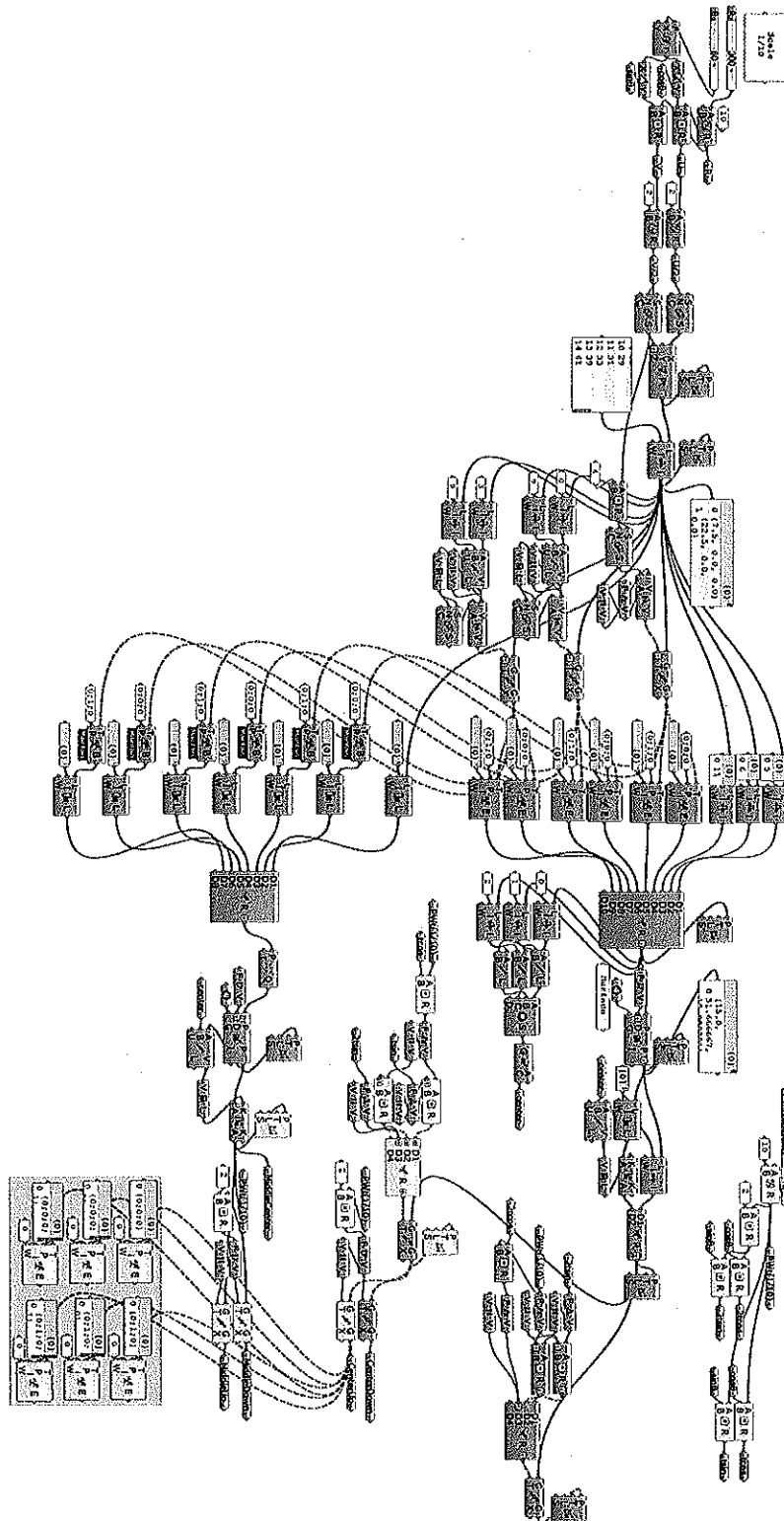


図7.6 使用したGrasshopperスクリプトの一部

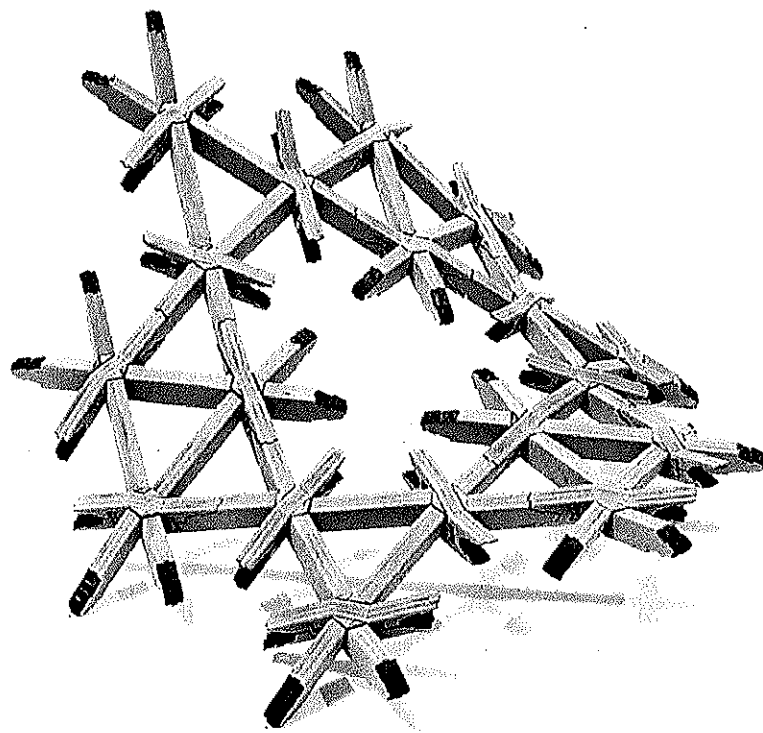
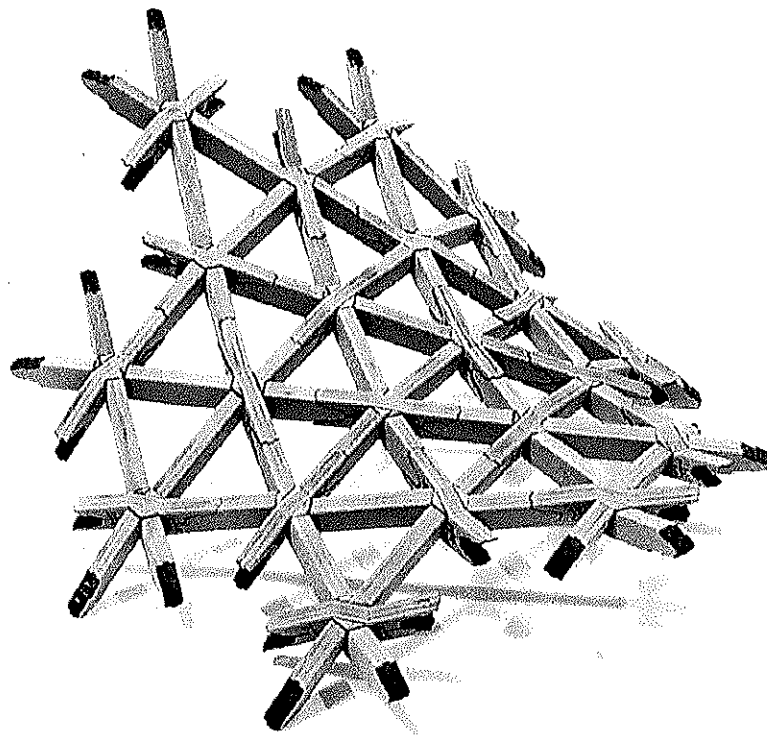


図7.7 Prototype02

C) Prototype03－局所構築性の実証

三つ目のプロトタイプでは、CNCによる継手形状の検討、提案手法を適応した家具スケールの『Digital Frame』の製作を目的とした。製作は2014年3月に行われ、梁の材料を選定する為の素材実験として、「杉の集成材 12mm」と「松の構造用合板 12mm」による梁部材をそれぞれ出力した（図7.8）。

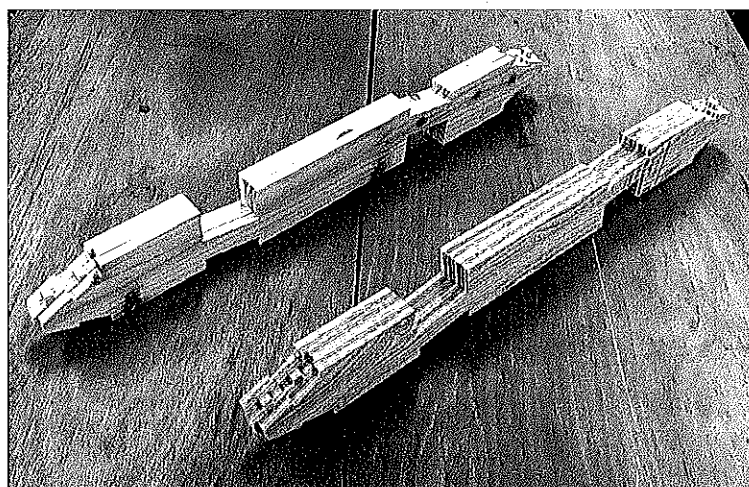


図7.8 梁の材料テスト

(左: 杉の集成材, 右: 松の構造用合板)

集成材の切削面はバリが少なく良好であったが、荷重を加えた際の柄の欠損が目立った。感覚値としては集成材の方が、構造用合板に比べ約半分程軽く感じた。コスト（金額）に関しては、集成材が構造用合板に比べ単位枚数あたり3倍程度高いため、今回は試作用材料として構造用合板を選択した。ただし、仕上げの際に「柿渋」等の防腐液／防虫液を添付する場合は、接着数の少ない集成材の方が優れている。また、「マテリアルを離散化」という手法のメリットは、石膏や銅板等の異なるマテリアルと配合可能なことである。これによって、耐火性能を向上させることが可能であるが、仕口部の素材と同じく、これらの性能／耐久性については別途検証が必要である。

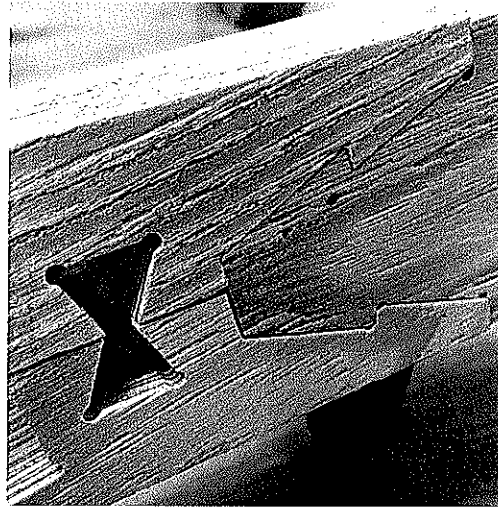


図7.9 構造用合板による継手

作成した基本データは、《Prototype02》で用いた Grasshopper 定義と同じだが、加工《プロセス》が異なるため、理想的な嵌り具合に到達するまでに細部のフィレット加工や、オフセット値の探索等、繊細な調整が必要であった（図7.9）。

ここで発明した加工のコツとしては、Grasshopper 上における合板の薄さ（変数: t ）の定義を、実空間における12mm（梁幅: 36mm）から仮想空間上における 12.3mm（梁幅: 36.9mm）とすることによって解決した。単位枚数あたりのオフセット値（0.3mm）を、ジオメトリ全体に施すといった考え方である。

結果として、人が上に乗ることができる程度の強度をもったプロトタイプが完成した。この試作は外部展示の為に製作されたが、要素単位で構築することのできる特色を活かし、電車にて搬入を行った（図7.10-7.11）。到着後、10分程度で組み上げることが出来たが、仕口部の付加材が取れ易く、部材の角度によっては契を打ち込むのが難しい箇所が存在した（図7.12-7.13）。

この試作／搬入によって、部分的に構築可能な性質を実証したが、これを「局所構築性」と定義する。



図7.10 Prototype03 (A)

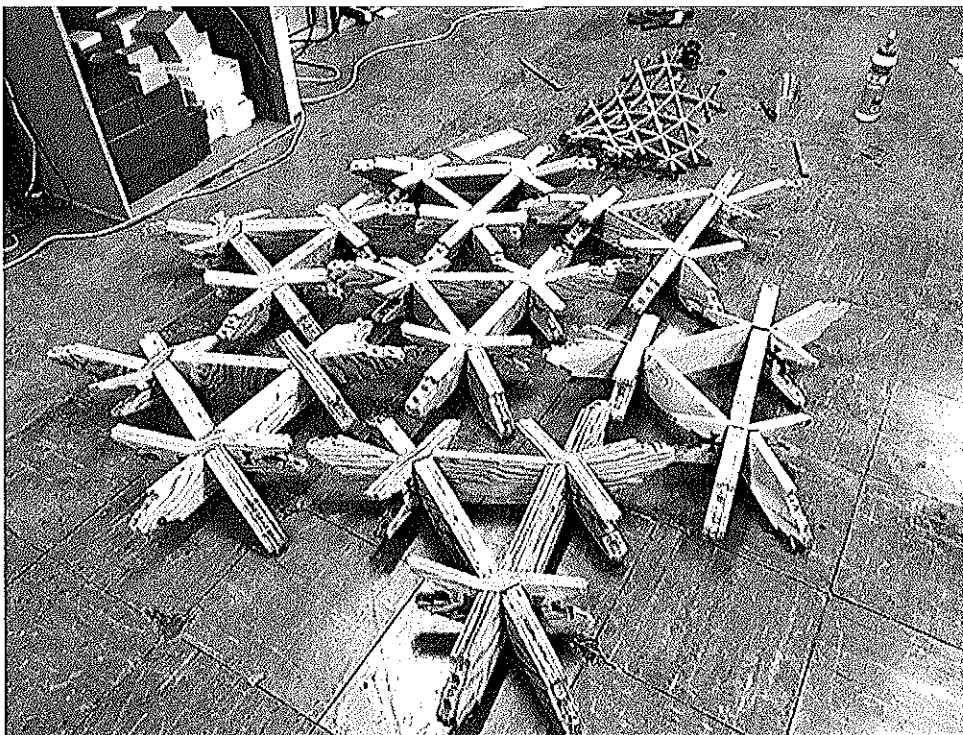


図7.11 Prototype03 (B)

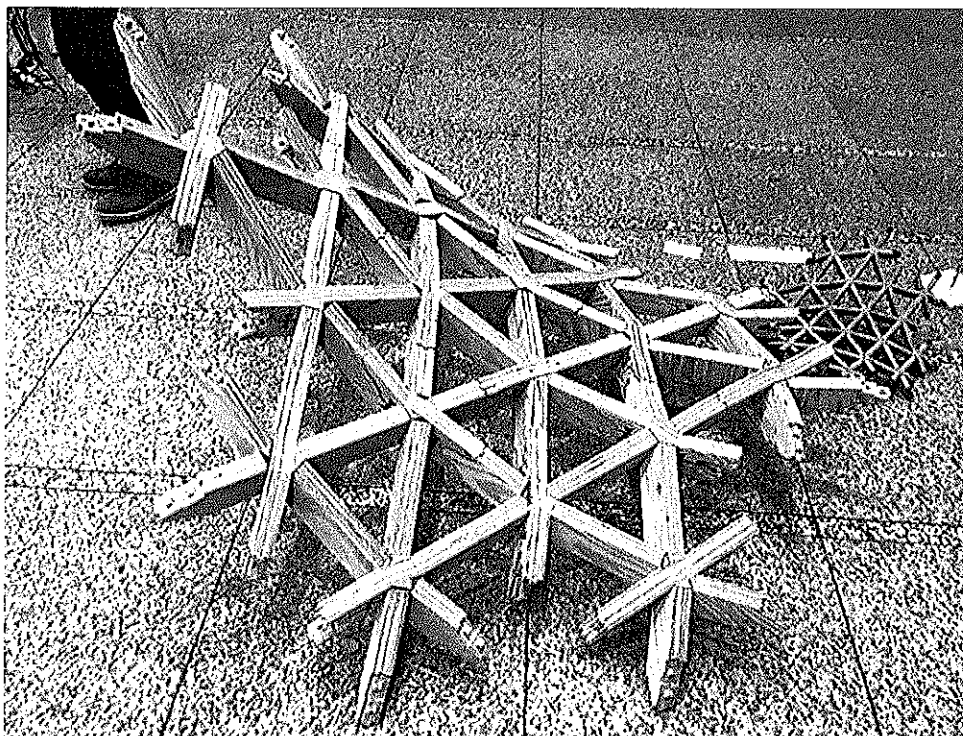


図7.12 Prototype03 (C)



図7.13 Prototype03 (D)

[7.1.2] 評価

以上が三つのプロトタイピングにおける検討事項とその結果である。本項では、実現可能性が実証された本手法＝《オブジェクト》の評価として、社会実装を前提として行ったワークショップの結果について記す。ユーザーと“一緒に”プロトタイピングを行う過程で、社会における本研究手法の位置づけを明確にすること、《オブジェクト》を用いた真にオープンなデザインプロセス＝《プラクティス》の「種」を提示することを目指した。

この社会実装の具体的な目的は、広島県安芸高田市における「FabLabの開設／建設」である。ここでは、建築を考える／作るプロセスを通じて、FabLabという新しいアソシエーションを組織化する事が意図された。ワークショップは2度に渡って開催され、提案《オブジェクト》を壁として利用し内部空間を提案するパターン、屋根として利用して外部空間を提案するパターンの2通りが検討された(表7.2)。

表7.2 workshop01/02 (1)

	workshop01	workshop02
用途	壁	屋根
敷地	内部空間	外部空間
メディアム	粘土	ボール紙
参加人数	9名	9名
開催日	2014年4月13日	2014年6月21日

ところで、近年建築設計において、ワークショップによる社会包括型の建築設計プロセスが主流になりつつある。代表的な優れた事例に、藤村龍至らによる『鶴ヶ島プロジェクト』がある。しかし、ここで用いられている手法は既存の「クライアント／アーキテクト」モデルの延長であり、デザイナーとユーザーとの距離が“縮まった”に過ぎない。ユーザーは提案に「投票する」こと、フィードバックを「述べる」ことによってプロセスに介入する。したがって、デザインプロセスは依然クローズド＝「ブラックボックス」なのである。これは、アーキテクトのアーキテクトたる所以＝「デザインの支配権」を逆説的に強固にするための「ガバナンス」としての設計手法に過ぎないのではないだろうか。

一方、オープンデザインの文脈において、ユーザーは積極的なデザインの担い手となり、「能動的な生活者／メタアーキテクト」モデルへと変貌を遂げる。このような文脈において、どのような設計プロセスが可能だろうか。また、オープンデザインの設計プロセスは如何にして成立するのだろうか。

本ワークショップでは、建築家の主な職能である「敷地の解釈」、そこから得た「洞察／類推のプロセス」、さらには「プロトタイピングによって設計に落としこむプロセス」、これら全てを“ユーザーと同時に経験する”ことによって、「合意形成」を“その都度”、“その場”で行うことに挑戦した。

また、第1章4節2項で『Co-Repeat Prototyping = CRP』という《プラクティス》の手法を提示したが、アイデアを設計に落とし込む手法として再度利用する。LEGO による『CRP』の実践を通じて判明したことは、試作と設計を同期することによって、「考えない」「振り返らない」「（最終形を）想像しない」という『超線形設計プロセス』（藤村龍至, 2011）を無意識的に体現できていたことである。「口より先に手が動くこと」「フィジカルなモノに変更を施していること」「そもそも漸進的にしか構築が不可能なこと」、これらのラピッドプロトタイピングの特性／優位性はその要因なのではなかろうか。ここで、『CRP』を『超線形設計プロセス』の派生的な実践手法であると捉えると、「設計履歴を保存」しプロセスを明示するという優れた側面も“継承”すべきである。そこで、グループ毎に「意思決定／切断の履歴」、すなわち「どのような意図で、どのような操作を施したのか」という履歴を保存し、それを全体に共有することによって「合意形成」を計ることにした。

A) Workshop01－CRPによる壁の設計

1回目のワークショップは2014年4月12日-13日の二日間にわたって行われた。対象敷地は、広島県安芸高田市渡辺邸のガレージであり、ここに壁を制作することで内部空間を作り出し、工房として利用することが意図された（図7.14）。また、壁を作る／境界を作るとは、社会との接点を定義することである。この新しいアソシエーションが既存のコミュニティと如何にして“ゆるやかに”融和することができるか。このような繊細な関係性をデザインすることが最終的なゴールとして設定された。



図7.14 敷地01

ワークショップの参加者は9名で、内3名が安芸高田市在住、男性7名女性2名、年齢層は20代から60代までと幅広い。ワークショップの募集はインターネット上で募り、市内の方へは新聞に記事を掲載することで募集を行った。ほとんどの参加者同士は初対面であり、興味の対象やデジタルファブリケーションの前提知識などは人それぞれであった。

まず、最初にワークショップの目的と前提知識を共有し、自己紹介を経て、本研究手法の詳細を模型を用いてプレゼンテーションを行った。

昼食を挟んだところで、参加者全員で土地柄を掴むために、町歩きのフィールドワークを行った。目的は、「安芸高田における風土性／共同体の現れとしての表現」を捉え、それを継承し、設計に活かすことである。



図7.15 安芸高田寺社MAP

フィールドワークでは、徒歩県内に存在する約10個の寺社建築を基点として、その途中で見られる景色、住居の顔、あらゆる表層を採集することを課した（図7.15）。理由は、寺社建築を「歴史の不動点」と考えたからだ。不動点に蓄積されているであろう「歴史の痕跡」を肌で感じとることを目的とした。そこで、それぞれが気に入った景色、面白いと思った景色を採取し、最後に発表してもらった。

幸運なことに、参加者の一人である石飛さんは歴史に造詣が深く、それぞれの文化財、それぞれの魅力的な風景に対して、一つ一つ丁寧に解説して頂いた。安芸高田市は「三本の弓」で有名な毛利元就（1497～1571）の生誕の地であり、多くの有能な宮大工を抱える土地柄であったという。そのため、文化財に指定された寺社建築も多い。街並には統一感があり、「石州瓦」の褐色の瓦屋根が多く見受けられ、ほとんどの住宅の屋根形状が「切妻屋根」であった。一方、寺社建築の屋根は「流れ造り」のものが多く。

とりわけ、我々の心を強く打ったのは、『清神社』である（図7.16）。日本書紀によると、須佐之男命が八岐大蛇を退治した舞台とされている。境内にそびえ立つ杉の巨木は圧倒的な存在感を放っており、歴史の蓄積を体現していた。清神社は1964年に建立され、この地方特有の「芸備造り」の代表的なものである。また、大規模な改修は施されておらず、当初の姿をほぼ完全に残しているともいわれている。

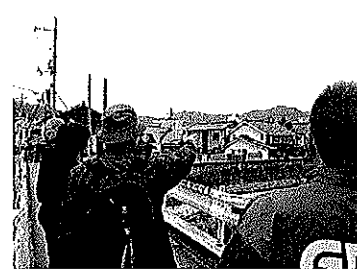
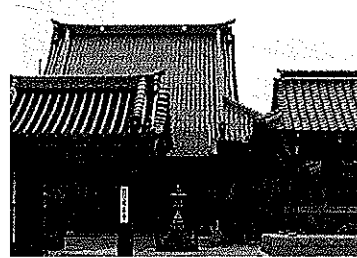


図7.16 町歩きフィールドワーク
(最上段: 清神社)

フィールドワークを終えプレゼンテーションを行うと、やはり多くの参加者が『清神社』の流麗な屋根形状と、その納まり（銅板葺き）に着目していたことがわかった。さらに、すぐれた工匠の作成した繊細なディテールを採集したのも多く見受けられた（図7.17）。

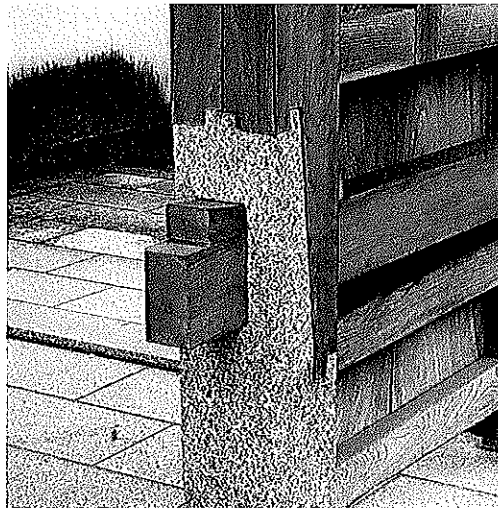


図7.17 工匠による優れたディテール

ところで、石飛さんの話によると、このような繊細なディテールの作り手である優れた宮大工達は、現在ではほとんど存在していないそうである。これは、技術継承の問題と、現代社会における需要の低さ／建築不可能性によるものだろうか。

このように、町歩きを通して「古い建物の持つ魅力」、そしてその建築が内包している「伝統技術の優れた点」、さらにそれを産み出すことの出来る「職人が絶滅寸前であること」を参加者と共有し、本研究の意義に共感してもらえたことが一番の収穫であった。

さて、ここからは、これまでにインプットした「情報」をもとに、実際に形におとしていく段階に入る。

『CRP』の手法を用いて設計を行うが、今回メEDIUMとして用いたのは粘土である。図工の時間で重宝されているように、ラピッドプロトタイピングのツールとして、これほど優秀なツールはないからである（図7.18）。

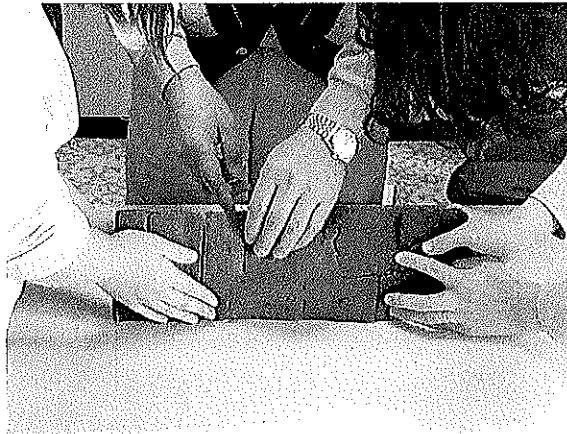


図7.18 Co-RepeatPrototyping

グルーピングに関しては、9名の参加者を3名×3チームに分けることにした。それぞれ年齢層や男女比が分散するように別け、チーム毎にリーダーを決めることで、主体的に発言／進行を進める「監督者」を設定した。

それぞれ、「一枚の壁」によって壁面を覆う班、「二枚の壁」によって壁面を覆う班、「三枚壁」によって壁面を覆う班という“制約”を課した。すはわち、壁の枚数はサーフェス＝『Digital Frame』の数であるが、枚数が上がるにつれて設定パラメーターは増す。実験的に、枚数によって各チームのアウトプットの差異化を計ることにした（図7.19）。

プロトタイピングにおいて意識を促したのが、添景等をおくことによって、空間に必要とされている「機能とその配置」も「壁の形態」とパラレルに考える事である。具体的には、排気はどこでするのか、入り口はどこにするのか、レーザーカッターは何処に配置するのか、作業場はどこにするのか等である。



図7.19 ワークショップ01

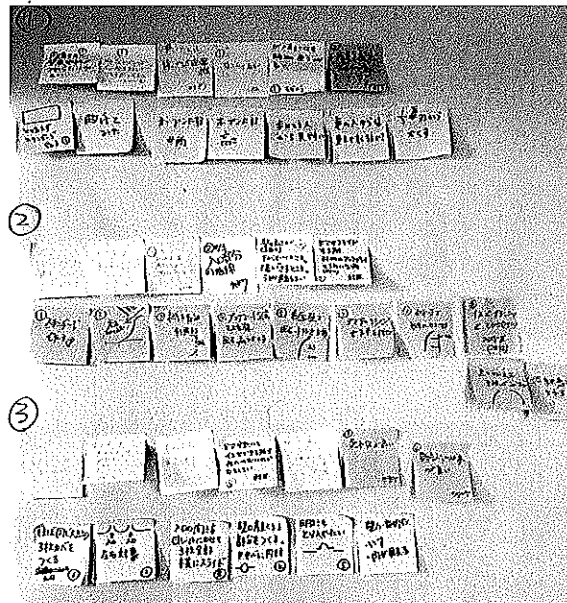


図7.20 意思決定のログ01

(上段: 最終成果“物”の評価, 下段: 設計履歴)

一方で、先述したように、形態操作を施す毎に「履歴」を残すことも課した(図7.20)。一つ一つの意思決定の段階において、この手法は有効に働き、時間内にそれぞれの「案」を完成するに至った。さらに、最後の発表では互いの「最終アウトプット」に対して、共感した点を記述するといった方法により「評価」を行った。

1回目のワークショップにおける反省点は、「それぞれの案における明確な関係性を描ききれなかつたこと＝合意形成に至らなかつたこと」、「メディアムの自由度の高さから、制約条件を明示できなかつたこと」、「プロトタイピングのアウトプットから、実際にその形態を本手法に適応させた最終完成形物を想像し難かつたこと」、「メタアーキテクト＝筆者の立ち位置が不明瞭であること」の四点である。

すはわち、「アイデアが収束するための仕組みを考えること」、「実構法とリンクしたメディアムを用いること」、「リアルタイムにコンピューター上で描画し表示できるようにアルゴリズムを強化すること」、「このワークショップにおけるメタアーキテクトのスタンスを明確にすること」の四点が今後の課題として浮き彫りになった。

B) Workshop02-CRPによる屋根の設計

このような反省を踏まえて、2014年6月21日に2回目のワークショップを行った。対象敷地は、渡辺邸横の細長い敷地である（図7.21）。間口は狭いが、南北に伸びる形状と、南面が開放的であることから、プランBとして浮上した。一つ目のガレージの敷地は、日差しが当たらないため暗く寒々しかったが、こちらは明るさの面では問題ない。暖かさと開放性が同居したような空間が目指された。当然、今回は敷地に対して新築（増築）する形になるため、『Digital Frame』を「屋根」として利用した場合の提案を作成することを目的とした。



図7.21 敷地02

ワークショップの参加者は前回同様9名であり、内男性が7名、女性が2名であった。年齢層は20代から30代と若く、前回からの継続的な参加は4名であった。また、安芸高田市内からの参加者は1名のみであった。今回も町歩きから始めたが、前回参加者が新しく加わった参加者に対してコンテキストを説明するという「継承」の方式をとった。設計プロセスに関しては、前回浮き彫りになった課題である「リアルタイムにコンピューター上で描画し表示できるようにアルゴリズムを強化すること」を踏まえ、新しいプログラムを用意した。以前迄のデータは Grasshopper による定義で、サーフェスをインポートする度に15分から20分程度処理に時間がかかった。一方、新しくプログラミングした Python スクリプトによる定義は、約1分程度で結果が返ってくる（図7.22）。

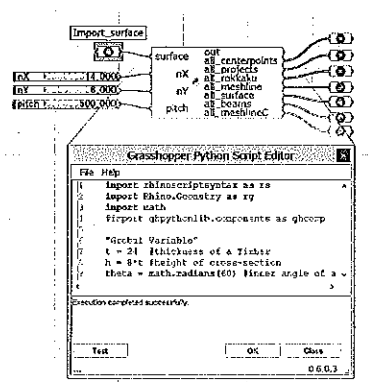


図7.22 作成したGHPythonのGUI

このようなアルゴリズムの向上により、『CRP』を行っている裏で、その形状を実際の手法に適應させた描画を、リアルタイムにユーザーにプレゼントできるようになった(図7.23)。したがって、プロトタイピング中のジオメトリの「幾何学的整合性」を“即座に”返す事が可能となった。ファブリケーション可能か否かといった結果を、その都度返すことで、「ぐにゃぐにゃな形状」等の無秩序さに対し、ある一定の秩序を与えることに成功した。また、今回はプロトタイピングのメディアムとして「ボール紙」等の、よりサーフェスを表現し易いマテリアルを用いた。このことも、無秩序さを抑制することができた要因の一つと考えて良いだろう。



図7.23 Rapid Feedback Loop

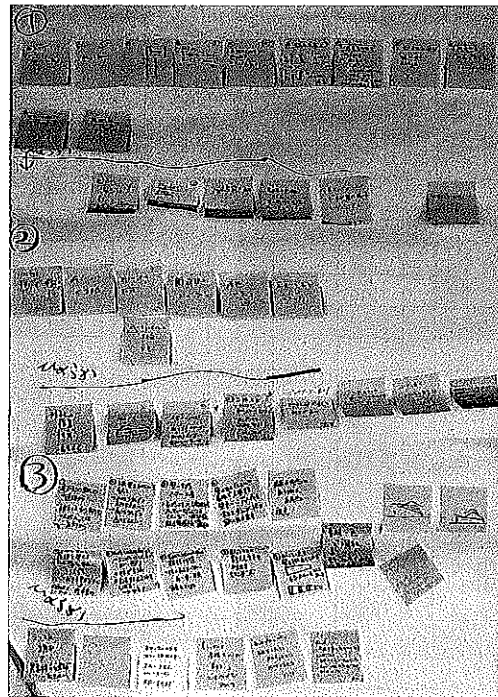


図7.24 意思決定のログ02

(上段: 設計履歴, 下段: プロセスの評価)

グルーピングに関しては、参加経験者が分散するように別け、前回同様「監督者」を設定した。物理的制約は今回は課さず、各々の具体的な空間のイメージをコンセプトとして提示することを課した。

一方で、設計プロセスに関しては、評価の対象をその形態ではなく「プロセス」とした(図7.24)。その上で、今回は中間発表を挟みむことで、互いのプロセス評価し、未だ与件として評価できていない点など、プロセスの交差/交配を企画した。その結果、壁として防ぐ方向、日差しを取り入れる位置、通りからみた屋根の見せ方等の「ひとつのアイデア」に収束し、3班ともに似通ったアウトプットが産まれた(図7.25)。この成果をもとに、デザインの最終決定権を持つ存在=「調停者」として、筆者がこれらの検討事項とその解決案を預かり、最終的な形態を修正して提示した(図7.26-7.27)。ところで、この2回目のワークショップで露呈した最大の問題点はこの《オブジェクト》の「安全性」である。確かに、安全性が検討されていない構造物を提供し、大雪や台風などでケガ人がでてしまっは危険である。このように、屋根としての使用を目的とする場合、構造力学的な観点から検討する必要性が浮上した。

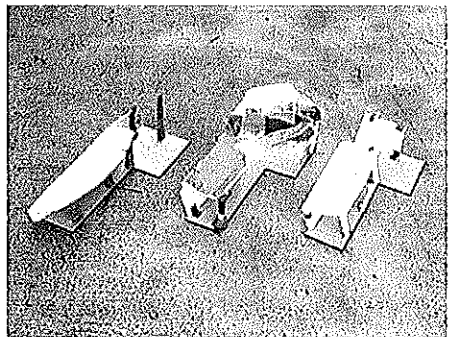
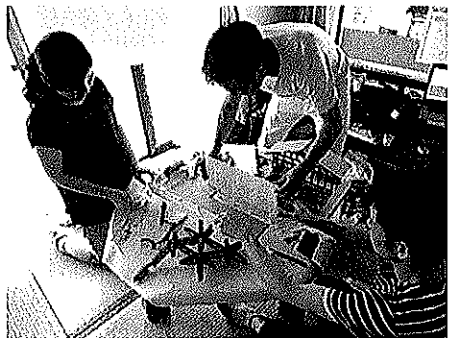
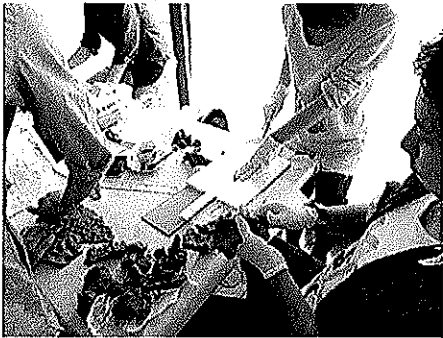
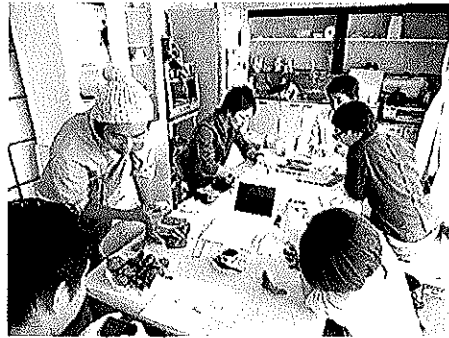


図7.25 ワークショップ02

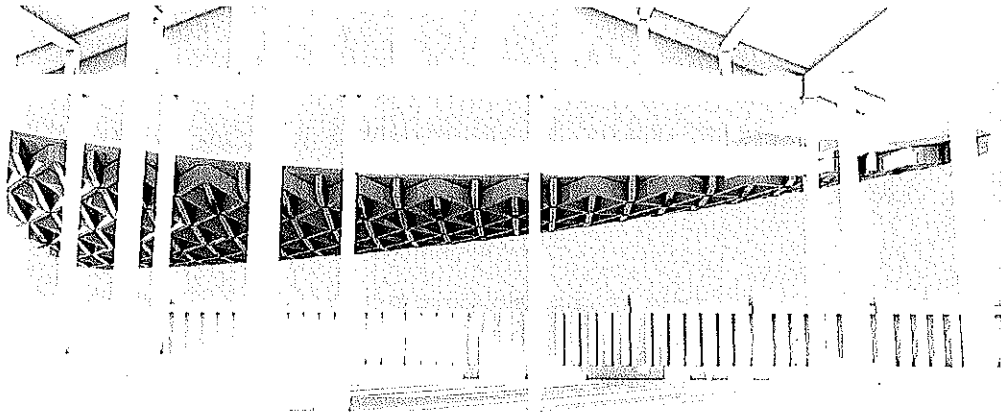


図7.26 ワークショップのアウトプット

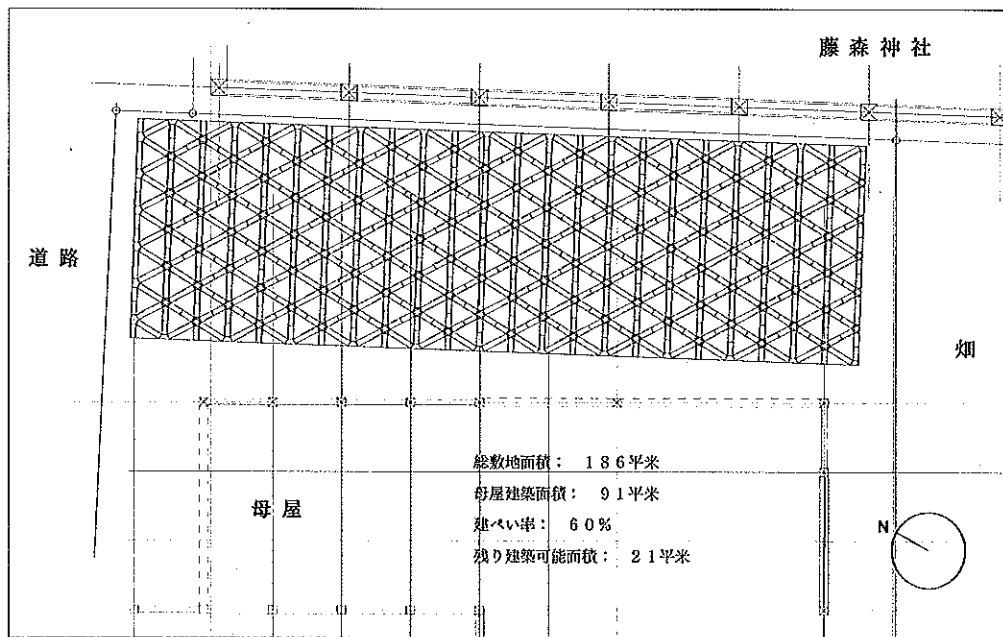


図7.27 敷地図

[7.1.3] 考察

以上のように二つのワークショップの結果を示したが、これらの差異を再度（表7.3）に整理する。

表7.3 workshop01/02 (2)

	workshop01	workshop02
メタアーキテクト	触媒	演算・調停
評価対象	モノ	プロセス
グルーピング	物理制約	情報内容
問題	相互性不足	構造安全性

《workshop01》における筆者のメタアーキテクトとしての立ち位置は、場のファシリテーターとなることで「触媒」としての役割を担ったが、デザインに直接踏み込むことはなかった。一方、《workshop02》では、メディウムと実構法とのギャップを埋めるために実装したソフトウェアを用い、提案手法を適用した場合の結果をリアルタイムに返す「演算者」としての役割を務めた。さらに、

『CRP』による設計プロセスの成果として整理された「与件」をもとに、最終的なデザインを決定する「調停者」としての役割を担った。前者の介入の仕方では一つの案に収束させることは難しかったが、後者の関わり方では一定の「合意（コンセンサス）」をとることに成功した。要因としては、前者の試作“物”を評価しそれを共有するといった方針ではなく、後者ではその“プロセス”を評価／共有することによって、設計における「与件」とそれに対する「方法」の合意をとるといった方針をとったからである。

したがって、このことから明らかになったのは、最終的なデザインの決定はデザインの代理人たるメタ・アーキテクト、もしくはローカル・アーキテクトが下す必要性である。『CRP』によって「ユーザーとともに“プロセスを”建築」す

ることによってオープンになった場において“はじめて”、真に専門家としてのデザイナーの能力が問われることになるのだ。

一方で、二つのワークショップから明らかになったのは「メディアウムがワークショップの質を左右する」ということである。メディアウムの自由度と、表現形状の自由度がリンクしている必要がある。粘土とボール紙によって実験を行ったが、前者は自由度が高すぎ、後者は逆に自由度が低すぎた。より適切なメディアウムの考案が必要であり、究極的には『Digital Frame』の縮小版をそのままメディアウムとして利用できるよう手法の改良を計る必要がある。

他方で、プロトタイピングによって「共同体の無意識」を拾いきれていないといった問題も挙げられる。フィールドワークによって入力／採集した風景／情報も、設計におけるルールに縛られるあまり、あまり考慮されなかった。さらに、本来そこに無意識を投影すべき「コミュニティ内部の人間の少なさ」の問題もある。共同体内部の人間、つまり近隣住民やローカルアーキテクトと共に『CRP』を行う事が理想形である。また、(図7.28)のように、共同体の無意識を表徴している「細部意匠」も、プロトタイピングの射程として考慮する必要があり、今後の研究課題は多く残されている。

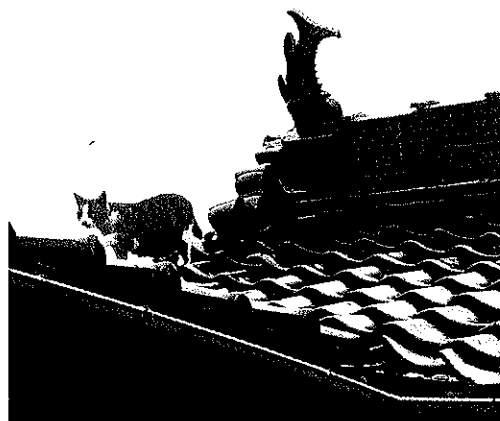


図7.28 「鯨」-武家の誇り／防火の祈り-

A) 貢献

本研究の学術的貢献は大きく分けて二つある。まず、《オブジェクト》レベルの貢献、すなわちファブリケーションの研究領域や、ジオメトリの研究領域に対する貢献であるが、「社会との接点」を模索し形にしたことが挙げられる。ここでいう社会とは、ユーザーや社会性といった側面だけでなく、時間軸の「歴史」をも含む。ファブリケーションメソッド／構法を、オープンデザインのデザイン支援環境を成立させる為の手法として位置づけ、さらに伝統構法との接続に成功したことが、他に例を見ぬ本研究独自のオリジナリティである。

一方、《プラクティス》レベルの貢献として、ユーザーをも“巻き込んで”プロトタイピング／デザインを行う「住民参加の方法論」を提示したことが挙げられる。単に動員し“傍観者”として迎え入れるのではなく、同じ土俵に立ち、ともに手を動かすことによって合意形成を計った。この手法のオリジナリティによって、既存の社会包括型設計手法をよりオープンに、より民主的に前進させたと言える。

B) 意義

続いて、本研究の社会的意義を述べる。2回のワークショップにおける、ユーザーとの交流／評価実験を通して、多くの知見を得た。中でも、参加者である相原さんのアイデアに基づく社会的意義を紹介する。それは、既存の「住宅ローンに基づく住宅供給システム」に対する「オルタナティブな住宅供給システム」の実現可能性についてである。本提案構法の「局所構築性」という特質が可能にするのは、漸進的な建築生産プロセスである。従来の住宅の生産プロセスとしては、銀行から融資を受けることで、建設費全体を一度に支払い、一度に建設を行う方針がある。一方で、漸進的な建設が可能にするのは、「身の丈にあった生産方針」である。したがって、仮に300万円の初期予算の場合、300万円で実現可能な規模を建設し、資金調達の毎に増築していく事が可能である。

実は、住宅融資政策は「普通の人＝中間層」に対して設計されている。そのため、このフレームに該当しない人々は、融資すら受けることができない。こういった、「既存のシステムで掬いきれていないユーザーの需要」に応えることができるのも社会的貢献の一つであろう。

また、既存の住宅供給システムの最大の問題は、ローンの返済負担と最終的な資産価値が時間と共に反比例することである。しかし、本研究の提案する構法を用いれば、段階的に資産価値を向上させることが可能である。さらに、「局所分解性」という性質によって、容易な減築も可能である。このような構造躯体の「フレキシビリティ」は、現在深刻化している「空き家問題」に対しても貢献することだろう。

一方、本研究の提案するオープンデザインの生態系によって、どのように社会が変わるだろう。デジタルファブリケーションという安価で高速な生産プロセスと、提案手法による安易で多様なアセンブリシステムを用いることで、自己建設 (Self-Build)、社会全体での建設 (Social-Build) へのアクセスがよりオープンになる。つまり、住宅や建築を「消費の対象」から「日常の営みの一部」へと

回帰させ、人々が積極的に「生活する＝生きる／活かす」社会への回路が開かれるのである。

人々の「建築する身体性」が向上し、本手法を自由に使いこなすことができる時代になったならば、どのように暮らしが変わるだろうか。まず、「土地」に対する概念が変わるだろう。本手法の離散的特性によって、場所を選ばない建設・生活が可能になる。これによって、坂口恭平による「モバイルハウス」の実践のような、オフグリッドの生活システムの普及に拍車を掛けることになるだろう。なぜならば、日本全国に分散する FabLab がその生産＝「あたらしい工業化」のためにインフラストラクチャーとして機能するためである。

さて、土地から解き放たれた人間は、どのような営みを描き出すのだろうか。[近代] が歴史の表舞台から消し去った概念の一つとして、「風土」という概念がある。ここでいう風土とは、人間の特性／環境の特性のことではなく、「風の人」／「土の人」という区別のことである。網野善彦（1928～2004）によると、所謂百姓とは農民として認識されがちであるが、大工等の職人もこの分類に含まれる。したがって、百姓は「風の人＝職人」と「土の人＝農民」によって構成されていたのである。

現在の土地に縛られるシステムでは、ほとんどが土の人として生活を行っているが、二分化していた時代においては、各「土」と「土」の交流が「風」を介して行われていた。このことが、伝統技術等の「技術交流」や「継承」、「発展」を可能としていたのである。



図7.29 環日本海諸国図

(網野善彦, 『「忘れられた」日本人を読む』, 2003)

ところで、日本列島は孤立した島国という印象があるが、実は、アジアの大陸を渡す「橋」のような形状をしている（図7.29）。

北方から「北方ツングース＝弥生人の祖先」が、南方から「南方モンゴロイド＝縄文人の祖先」が渡来することによって、日本文化は形成した（網野善彦, 2003）。したがって、大規模な移動とその交流が文化を構築してきたのである。

このことから類推するに、再び土地にから開放されることは、このような自由な交流と継承／改変を再び可能とし、新しい文化の「生成場」を発生させるだろう。つまり、オープンデザインは「オープンカルチャー」を誘発するのだ。

C) 発展

最後に、本手法の発展可能性について述べる。2回のワークショップのプロセスを客観的に振り返ると、必ずしもすべてのプロセスがオープンであると言えないことが解る。なぜならば、筆者がメタアーキテクトとして提示している《オブジェクト》は、筆者の独断によって入力された情報だからである。理想的なデザインプロセスは、その入力=ファイルの定義のプロセスさえもオープンにすることである。したがって、このプロセスの探求/実践が研究課題として残されている。

さて、本研究をとりまくアクターネットワークを整理しよう(図7.30)。オープンデザインをとりまく環境には、様々なアクターが存在するが、それぞれの二項対立を調停=バランスすることがメタアーキテクトのメディウムとしての使命である。実際の建築生産を通して、この関係性の検討を行い、またそれを進化させることも今後の研究課題として残されている。

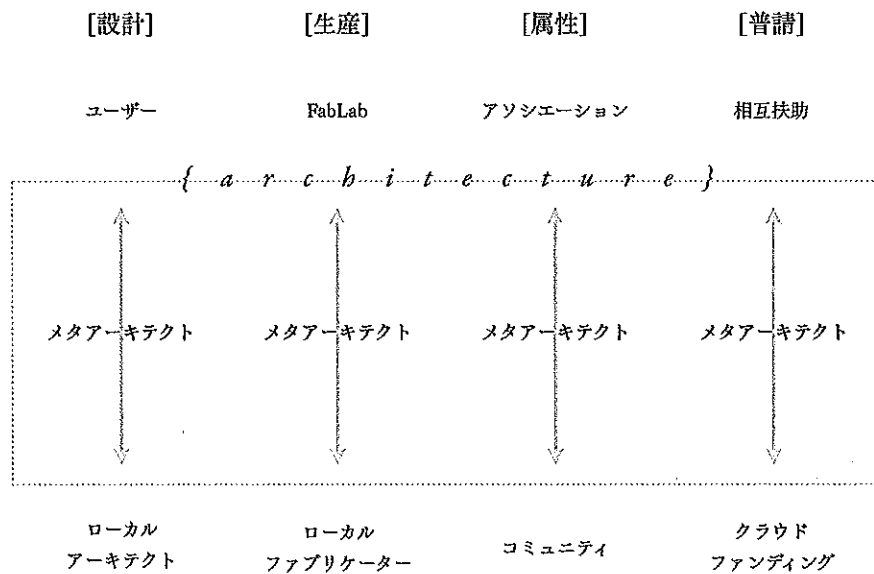


図7.30 アクターネットワーク

[7.2] CaseStudy02－有限要素モデル

本節では、《CaseStudy01》における第2回ワークショップで浮き彫りになった「相互性不足」の問題に対する回答として、コンピューターを介することなく「実空間上で」探索する事が可能な手法を提案する（図7.31）。すなわち、メディアムが《オブジェクト》であるパターンである。

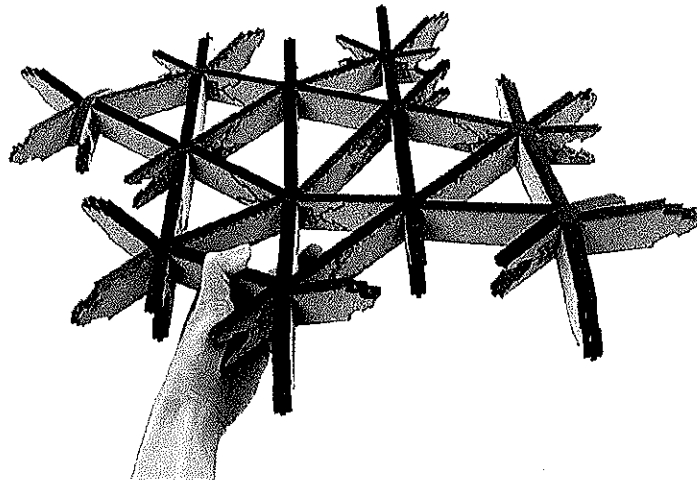


図7.31 実空間上で探索するモデル

第6章で提案した手法は、最終的な目的形状を離散化するという方法をとるため、デザイン手法は「トップダウン方式」である。一方、本節で提案する手法は、要素と要素を組み合わせることによって、全体形状の探索／描画を行う「ボトムアップ方式」である。

また、有限個で構成される方式のメリットとしては、要素同士が可換である事である。《CaseStudy01》の場合、全ての部材形状は異なるため、局所分解した部材は同じ場所でのみ再利用可能である。一方、《CaseStudy02》で提示する手法は、分解すればまた別の場所で利用可能であり、同じ部材で異なる全体形状を描画することも可能である。

[7.2.1] 実装

実装の結果としては18種類の部材(長材)によって成立するモデルを構築することに成功した。(図7.33)がその18パターンの形状である。一つの部材には三つの節/変形点が存在するが、それぞれの変形角度を一定にすることによって実現した。各接点において「-30度の変形」「0度の変形」「+30度の変形」の三つの変形パターンが考えられる。したがって、 $3 \times 3 \times 3 = 27$ 通りの形状がカウントされるが、鏡面反転等による同形状を纏めた結果、18通りに絞られた。短材も同様のプロセスで $3 \times 2 \times 2 = 12$ 通りから4種類に絞られた。

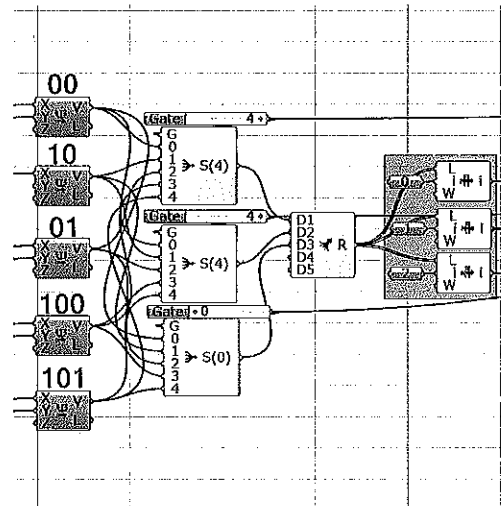


図7.32 CaseStudy02のGH定義

実装のために作成した Grasshopper の定義ファイルも、同様のプロセスで作成した。三つのストリームスイッチを操作することによって、27通りの変形を表現できるように定義した(図7.32)。

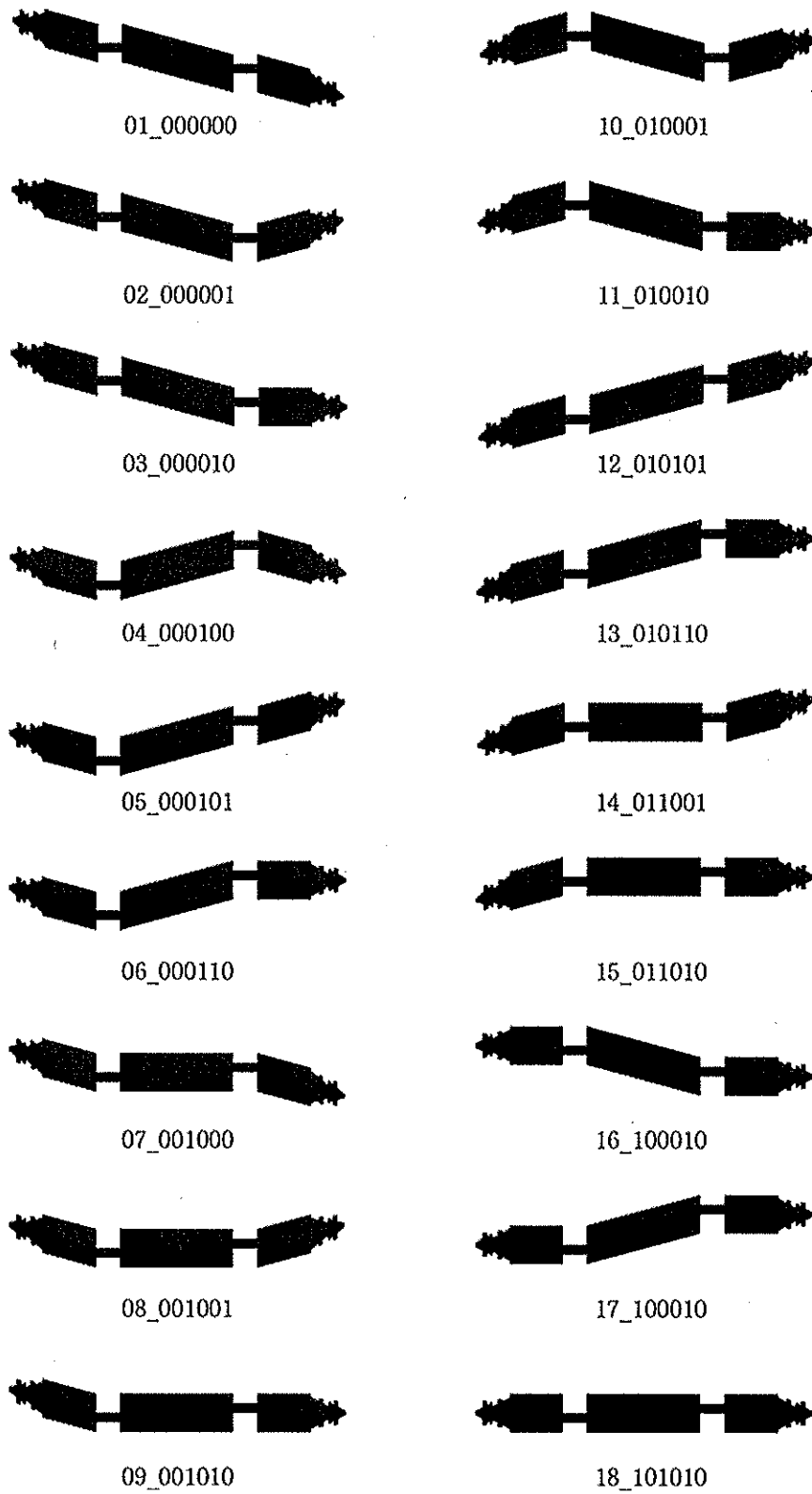


図7.33 長材の18パターン

[7.2.2] 評価

評価実験として、この長材18パターン+短材4パターンによる「開発キット」を用いて、実際にどのような自由度の形状が表現可能か、《CaseStudy01》のアウトプットと比較を行うために、設計ワークショップを行った。

実験者は研究室の後輩である大庭広明が務め、前提知識として構成ルールと組み立ての仕組みを理解してもらった。また、部材を選択して第一システムを製作する時間 (Pick)、そのシステムと隣接する要素との選定/接続にかかった時間 (Place) を計ってもらい、接続に失敗し再選定した場合の数も同時に記録してもらった。8個の接続をテストしてもらったが、実際にかかった時間は (表 7.4) の通りである。

表7.4 Place[組み立てる時間] & Pick[選定する時間]

(*の数は後戻りした回数を示す)

	Place	Pick
1個目	7 [min]	
		6 [min]
2個目	12 [min]	
		28 [min]
3個目	18* [min]	
		16 [min]
4個目	7 [min]	
		14 [min]
5個目	22** [min]	
		5 [min]
6個目	18** [min]	
		7 [min]
7個目	24** [min]	
		8 [min]
8個目	43*** [min]	

実験データをみると、組み立てにかかった時間が計151分、選定にかかった時間が84分であった。《Place》のプロセスの内、後戻りせずに組み立てを行った回数が三回、かかった時間がそれぞれ7分、12分、7分である。したがって、一つを組み上げる平均値は9分である事が解る。

また、組み立て個数が増えるにつれて、後戻りする回数と時間が増える。これは、接続数が増えるにしたがって、一つのミスが隣接する幾つもの要素とリンクし、その要素自体も一度解体しなければならないからである。

最終的に出来上がった形状は(図7.34)である。本人は「全体として、大きくふくらむ風船のような形をイメージして制作を進めた。」そうであるが、出力された形状は全体的に平坦であり、中央部の起伏の幅も少ない。

このことから、思い描いた形状を操作するのは難しく、意図に先行して、隣接関係の整合性を考慮しながら製作が進められたことが解る。

基本18種類の部材で構成可能とはいえ、27種類のパターンが存在する。その中から3種類を選んで構成する組み合わせは5850通りである。さらにその中から隣接可能なユニットを探索する必要があるのだから、いかに困難であるかが解る。

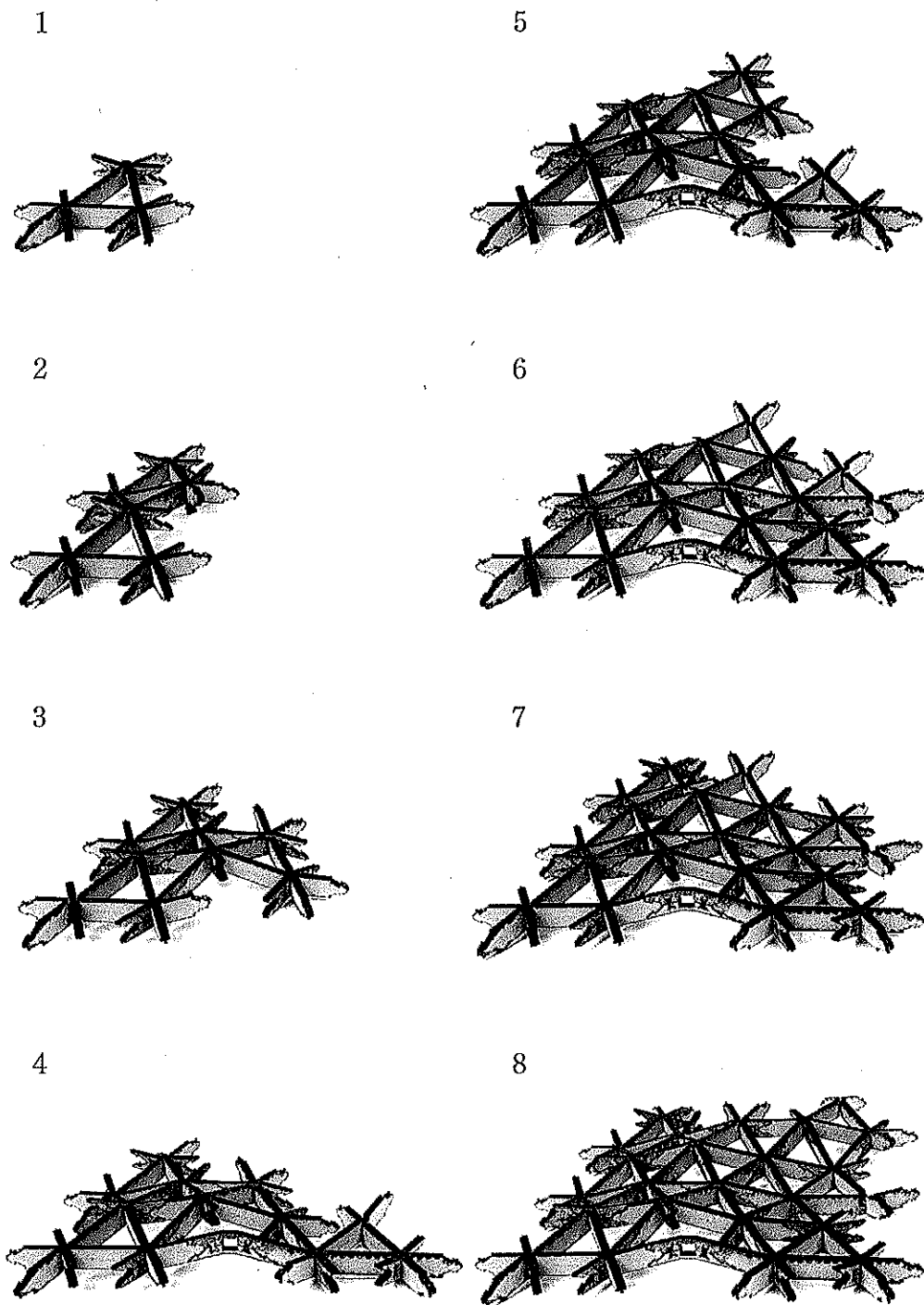


図7.34 ユーザー実験

[7.2.3] 考察

この手法はアセンブリがそのままデザインになるモデル、すなわち生産と設計が一体化したモデルである。したがって、その時々ของผู้ーザーの気分や意図によって最終形状をその都度変化させることが可能である。

また、ボトムアップ型との併用も可能であり、最初はトップダウンモデルで設計し、建設中に得た知見を反映させてながら、形状をその場で変更していくといったことも可能である。同様の手続きで、増改築も容易であり、減築解体後の部材も再利用可能である。

以上がメリットであるが、最大のデメリットは計算量が圧倒的に多いことである。人間の脳で処理するにはあまりにも「解」が多く複雑である。ファブリケーションを円滑に進めるためには、人間の計算能力を飛躍的に増大させる必要がある。

この障壁を乗り越えるアイデアとしては、背後で高速に計算を行うデバイスを併用して用いるモデルが考えられる。アセンブリ＝プログラムの度に、制作者の意図に基づいて、次の候補をアシストしてくれるようなインターフェースである。またその計算結果はHMD（ヘッドマウントディスプレイ）やプロジェクション・マッピング等の方法によって、制作者に伝えられる。

このような拡張された製作（Augmented Fabrication）の為の情報環境が整った場合、どのようなことが可能だろうか。例えば、目的や意図といった価値判断によって製作を進行させるのではなく、コンピューターがセンシングした「人間の感覚では捉えきれないようなデータ（例えば風の流れ）」にもとづいて製作が行われた場合、蟻の巣の建設過程と同様の現象が起こりえる。さらに、そのデバイスが共同建設を行っている他者とコミュニケーションし、その各々の情報を交換し合いながら、“創発”することで「建築生産における自己組織化」の夢が叶う可能性がある。

このように、構成要素を有限種類に絞ることによって、上述したような生命的な展開も可能となる。

[7.3] CaseStudy03－構造体モデル

本節では、《CaseStudy01》における第2回ワークショップで浮き彫りになった「構造安定性」の問題に対する回答として、新しい継手・仕口形状を提案することによって解決を計る。

まず、構造安定性を検証するにあたって、マイクロ (MATERIAL) /メゾ (ELEMENT) /マクロ (STRUCTURE) という視点を導入する。それぞれ、《マイクロ》は繊維方向等の素材の物性の評価、《メゾ》はジョイントの剛性等の元素単位での評価、《マクロ》は FEM (Finite Element Method) による構造解析等の構造全体の評価である。これらの三つのスケールを横断し、相互に関連付けることによって、系全体の構造安定性/安全性を担保することを目指す (図7.35)。

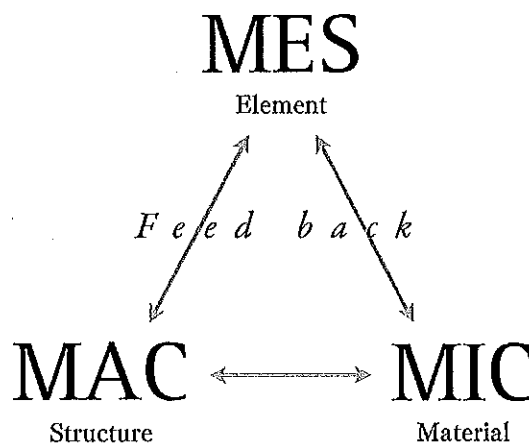


図7.35 Macro/Meso/Micro

ただし、本研究では厳密な解析/評価を目的とせず、あくまで設計のクライテリアとして工学的観点を導入する。

まずはじめに、《ミクロ》の検証を行う。本研究では、国産の木材である「松」や「杉」などの針葉樹の木質材料の使用を前提とする。針葉樹材の特徴として、その95%が仮道管であること、シンプルな構造であること、細胞が整然としていることが挙げられる（図7.36）。

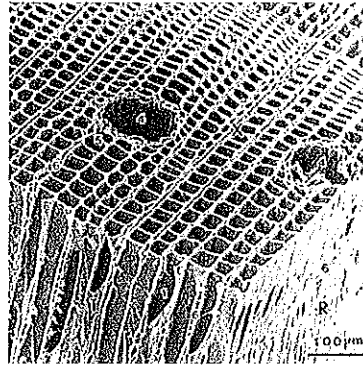


図7.36 針葉樹材の細胞構成

(古野 毅, 『木材科学講座2: 組織と材質』, 1994)

また、仮道管はミクロフィブリルの薄壁（ラメラ）によってできている（図7.37）。ミクロフィブリルとは、セルロース分子が集合した繊維状の繊維状の筋繊維状構造物のことであるが、細胞の軸方向に平行に伸びている。また、(図7.37) 中の二次壁中層が細胞壁全体の70%を占め、これが右上がり螺旋を描いている（Z-helix）事が、木材の「異方性」という最大の特徴を生み出している。

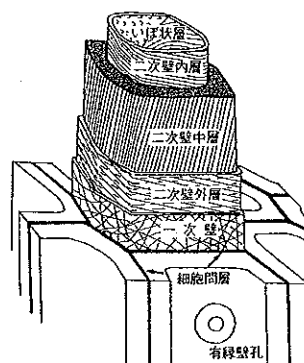


図7.37 仮道管細胞壁

(古野 毅, 『木材科学講座2: 組織と材質』, 1994)

すなわち、繊維方向に平行な方向と、繊維方向に垂直な方向の強度がそれぞれ異なるという性質である。研究では、単板積層材（LVL）もしくは集成材を利用することで部材の繊維方向に配慮する。具体的には、切削対象に平均的な軸をとることで、その軸と繊維方向が平行になるように部材を配置する。したがって、「近似的な繊維性」によってこれを考慮する。

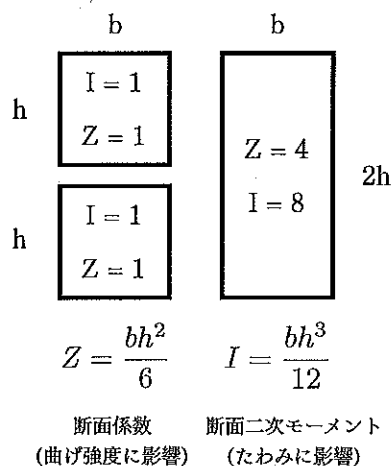


図7.38 重ね梁

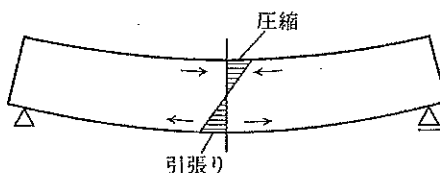


図7.39 曲げ応力

(坂本 功, 『木造建築を見直す』, 2000)

一方で、部材全体に関してであるが、本提案手法のように部材を上下に二等分すると、分割前の状態に対して強度が $1/4$ に、たわみが8倍に変化する（図7.28）。「契」等によって分離を防ぐための精緻な加工を施すことと、この“弱点”を考慮した冗長な部材設計を行うことで解決を計る。他方で、部材の曲げ応力に関してであるが、スパンの上端が最大圧縮応力に、下端が最大引張応力になる（図7.39）。そのため、現在の仕口相欠部の欠損量に関して注意が必要である。

これらの前提要件を踏まえた上で、新しい継手・仕口の実装を行う。

[7.3.1] 実装

続いて、《メゾ》の検討として、本手法で提案した継手・仕口形状の改良を行う。はじめに、継手に関してであるが、現在用いている形状は「台持継」と言われている形状の発展形である。これは、「小屋組」に用いられる継手であり、下に梁が上に束が立つことによって、継手を抑える形式である（図7.40）。従って、本提案手法が想定する「軸部」に用られるような、曲げに強い形式ではない。したがって、再度基本形の選定を行う必要がある。

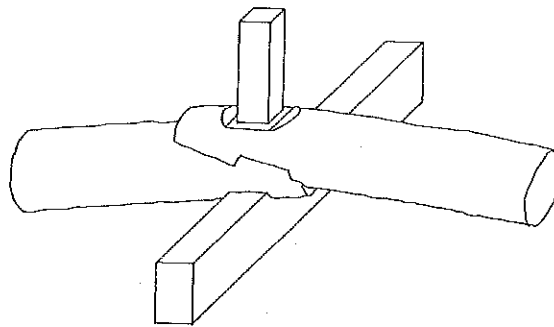


図7.40 台持継

(内田 祥哉, 『在来構法の研究: 木造の継手仕口について』, 1993)

一方で、軸部に用いられる代表的な基本形として「鎌」「略鎌」「蟻」があるが、内田祥哉らによる在来構法の研究において、これらの継手の強度剛性試験が行われた（表7.5）。

この結果から、「金輪継」や「迫掛継」、「腰掛鎌継」などが有力な候補として浮上した。この中から、提案手法の上下にスライドするアセンブリ方式に応用可能な基本形として「迫掛継」、とりわけ「殺ぎ」の基本形が加わった「斜迫掛継」を基本形として再選定する（図7.41）。

表7.5 曲げ試験結果

(内田 祥哉, 『在来構法の研究(2): 木造継手の強度剛性試験』, 1982)

継手種類	比例限度			剛性		最大荷重			
	荷重 (kg)	曲げモーメント ($10^3 \text{ kg}\cdot\text{cm}$)	応力 (kg/cm^2)	曲げ剛性 ($10^3 \text{ kg}\cdot\text{cm}$)	ヤング係数 ($10^3 \text{ kg}/\text{cm}^2$)	荷重 (kg)	曲げモーメント ($10^3 \text{ kg}\cdot\text{cm}$)	応力 (kg/cm^2)	最大荷重時 たわみ (mm)
0 無継手	5518	828	429	99.8	98.5	8283	1243	644	-
1. 金輪	1033	155	80	428	423	1878	282	146	13.1
2. 古金輪	841	126	65	434	428	1518	228	118	15.0
3. 古金輪(草知)	566	85	44	409	403	1012	152	79	10.5
4. 追掛	935	140	75	410	405	1443	217	116	7.8
5. 斜追掛	1058	159	82	445	439	1798	270	140	9.9
6. 金輪(日吉大社)	1125	169	87	253	249	1510	226	117	13.3
7. 中世鎌	547	82	50	44.1	43.6	844	126	66	3.8
9. 腰掛鎌	583	88	45	44.8	44.2	831	125	65	6.0
10. 日造大鎌	567	85	44	48.2	47.6	955	143	74	5.6
11. 腰掛竿車知	413	62	32	31.1	30.7	836	125	65	8.1
12. 腰掛鎌	133	2.0	10	4.2	4.1	220	33	17	14.0
13. 具の口	478	72	37	23.8	23.5	682	102	53	11.4
1. 金輪(横前ガ)	423	64	33	27.2	26.8	848	127	65	10.1
9. 腰掛鎌(逆前ガ)	203	3.0	16	14.0	13.9	365	55	28	5.6
14. 機械加工鎌継S	467	70	36	24.5	24.1	765	115	59	6.9
15. 機械加工鎌継K	283	4.2	22	14.7	14.5	605	91	47	25.2
0 無継手	5055	758	393	87.4	86.3	6791	1019	528	-
1. 金輪	1317	198	102	37.4	37.0	1834	275	143	12.5
10. 日造大鎌	815	122	63	43.4	42.8	1052	158	82	5.1

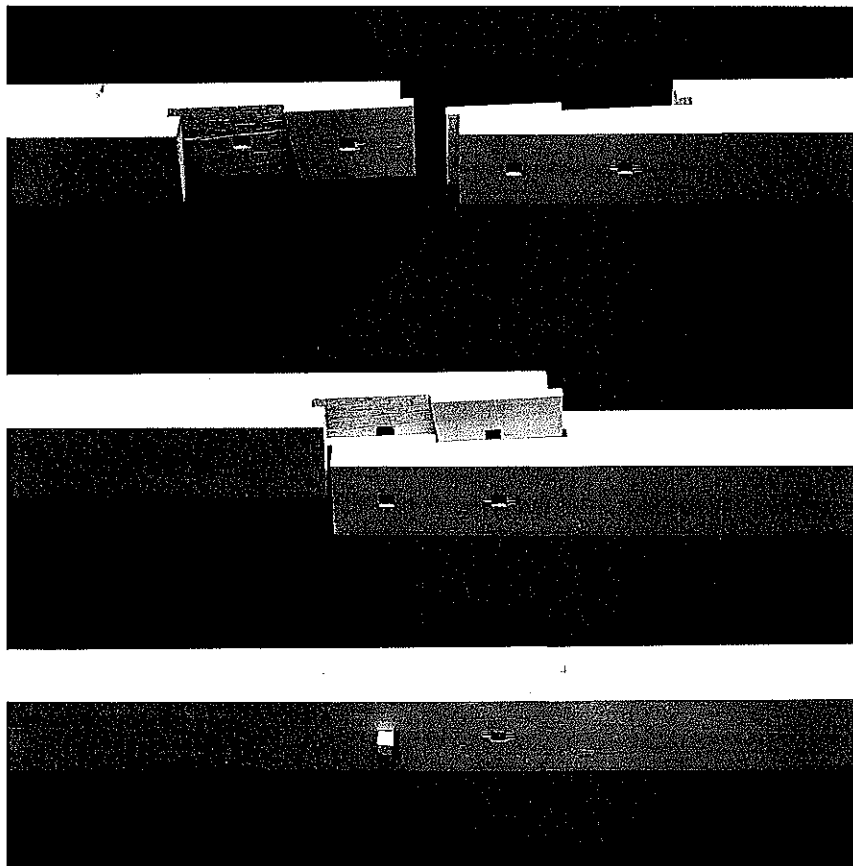


図7.41 追掛大杓継

(内田 祥哉, 『在来構法の研究: 木造の継手仕口について』, 1993)

この基本形をさらに、本手法に応用可能な形状として（図7.42-7.43）の形状を設計した。端材が上下に分離する特徴から、「追掛継」を上下左右それぞれに鏡面反転した継手形状を作成した。形状に「殺ぎ」（図の台形の形）が入っていることで部材同士は固定されるが、アセンブルの後、「込栓」が4本打ち込まれることによって、さらに強固となる。

続いて、仕口形状の選定であるが、まず、三つの部材（正確には四つ）が一点で交わることから、各々の断面欠損は基本断面の $2/3$ となる。構成部材の形状をみると、いかにもか細く弱くみえる。加工精度を限界まで追求すれば、完全に無垢の木と同等の状態を演出できるのかもしれないが、まずは単体での強度向上を目指す。

そこで、提案するのが（図7.44-7.45）の形状である。仕口部の断面断面が $1/3$ になってしまうのであれば、その断面を基準に「梁せい」を設定し、仕口部の断面を3倍にして押し出すことを考えた。さらに、力学的に余分な箇所はアーチによって削りとり、どの断面をとっても同一面積となるよう設計した。

以上が、継手・仕口の改良提案である。これら新しい継手・仕口を実際に製作したのが（図7.46-7.48）である。この改良提案によって、『Digital Frame』に表と裏という区分が出現するが、裏面の曲線と角柱が接続することによって、内部空間に力学的躍動性／連続性が生まれるのではないだろうか。

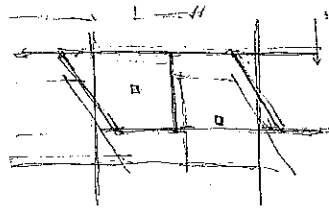


図7.42 継手検討 (1)

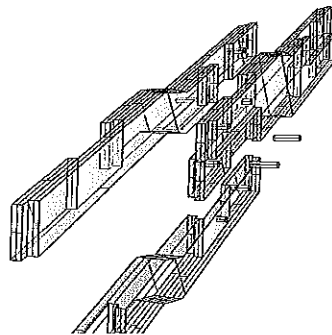


図7.43 継手検討 (2)

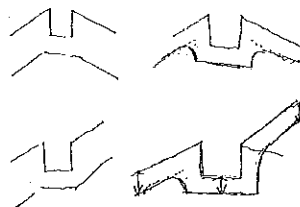


図7.44 仕口検討 (1)

(左: 既存の仕口形状, 右: 新しい仕口形状案)

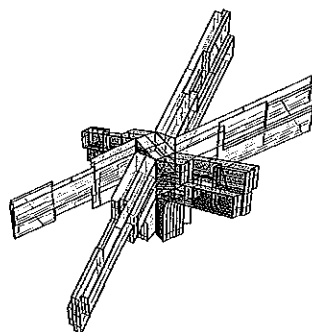


図7.45 仕口検討 (2)

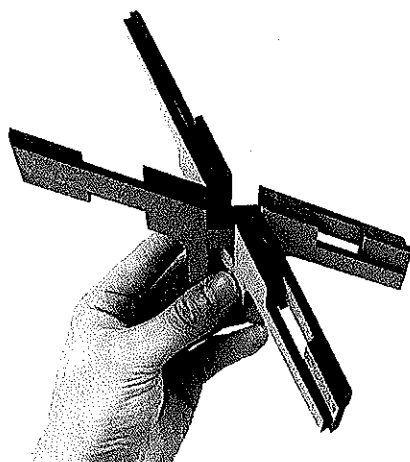


図7.46 強化版継手・仕口 (1)

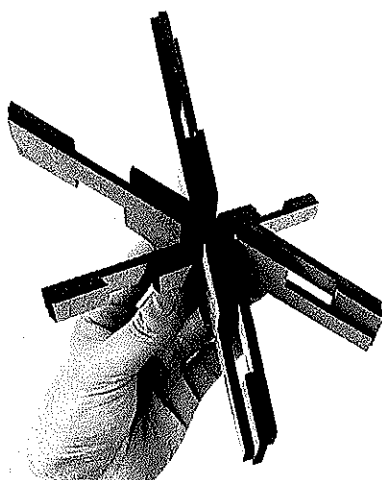


図7.47 強化版継手・仕口 (2)

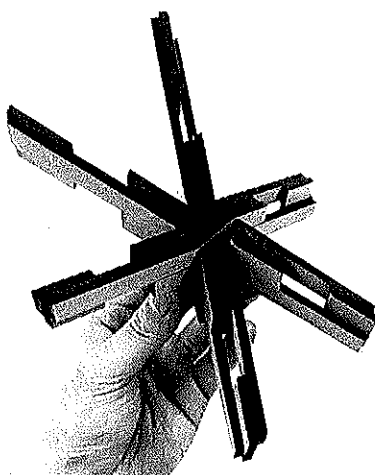


図7.48 強化版継手・仕口 (3)

[7.2.2] 評価

最後に、《マクロ》の検討として、有限要素解析 (Finite Element Analysis) を用いて全体の構造を解析する。使用したプログラムは、Grasshopper のプラグインである『Karamba』という有限要素法 (Finite Element Method) である。本研究が提案する構法の単位部材は、単純な形状の梁であるため、「梁要素」のモードを用いて解析を行った。解析結果が (図7.49) であり、そのスクリプトが (図7.50) である。

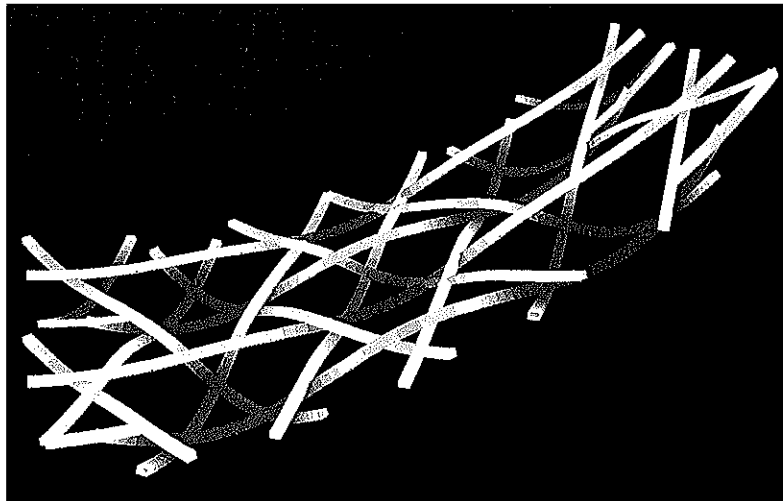


図7.49 梁要素による解析

解析結果をみると、要素単位ごとに応力の分布が明快に別れている。この結果を正しいとするならば、構成要素に追随する形で、柱をシステムチックに配置していけば良いことが解った。

また、各要素における「モーメント」「せん断」「軸力」の応力の値も求めることにも成功し、《CaseStudy01》で作成した Python スクリプトと連携させ「任意のサーフェス」「任意のスパン値」「任意の断面形状」をインプットする事で、即座に計算結果を返すことが可能なプログラムを作成した。

したがって、CAM (Computer Aided Manufacturing) に基づいた CAD (Computer Aided Design) と、CAE (Computer Aided Engineering)、CAAS (Computer Aided Assembly) を複合したツールを作成する事に成功した。

[7.2.3] 考察

この解析では、各構成要素を「一体の無垢の木」として評価しており、継手を考慮していない。したがって、便宜上すべての接点を「剛接合」とであると定義した。おそらく、よりリジットな解析/評価を行うとすれば、提案した継手・仕口の剛性を定義する必要がある。木質ラーメン構造の解析手法を参照すると、接合部は「半剛接合」として、回転バネというモデルで定義されていることが解った(図7.51)。

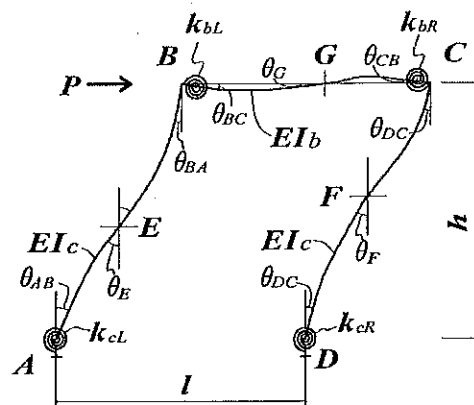


図7.51 回転バネ

(稲山正弘,「木質構造接合部設計マニュアル」,2010)

『Karamba』でも、剛性定数 C_t [kN/m] と C_r [kNm/rad] を入力する事でジョイント部の剛性を定義することが可能であるが、既存の継手・仕口形状と形状が異なるため、剛性の仮定を行うことができない。したがって、個々に実験によって求める必要がある。このように、実験によって提案形状の剛性を評価し、それをもとに厳密な解析/評価を行うことを今後の研究課題として提示する。

ところで、現在のようなコンピューターによる解析ツールが普及していない時代において、どのように構造安全性の検証を行われてきただろう。Eduardo Torroja (1899~1961) は、自身が提案する斬新な構造に対して、実物大のモックアップを作成し、想定荷重分の砂袋による載荷実験を実施することで安全性を証明した(図7.52)。Robert Maillart (1872~1940) や、Félix Candela (1910~1997) も同様の方法によって、検証を行っていた(図7.53)。

コンピューターによる解析結果を評価するには、専門的なりテラシーが要求されるが、このような直感的な証明は「だれにでも解り易い解析結果」である。現代のデジタルファブリケーション技術を利用すれば、このような実物大のモックアップも安価で高速に製作可能である。フィジカルな時代における「直感的な」検証手法を構築することが、今後の研究課題として挙げられるだろう。

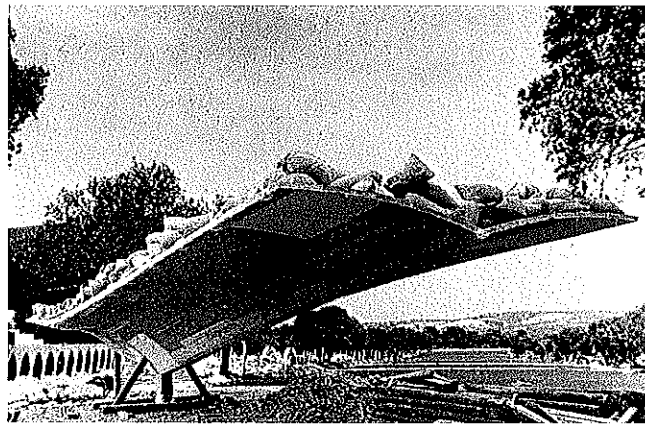


図7.52 Eduardo Torroja の実験

(Eduardo Torroja, The Structures Of Eduardo Torroja, 1958)

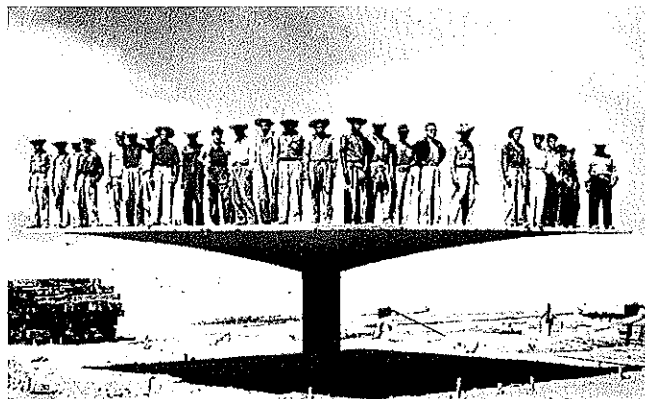


図7.53 Félix Candela の実験

(Maria E. Moreyra Garlock and David P. Billington, Félix Candela, 2008)

[8] 結論

以上、建築生産におけるオープンデザインを実現するための手法として、『Digital Frame』（局所的に分解・構成可能な三次元曲面）という構法の提案とそれを用いた『CRP』（共創型設計手法）という社会実装手法の提案を展開してきた。ここで、各章の内容を要約することで研究の到達点を明らかにしたい。

[導入]

第1章ではオープンデザインを構成する《インフラストラクチャ》《プロセス》《オブジェクト》《プラクティス》の四層構造を導入することで、オープンデザインの見取り図を提示した。とりわけ、筆者が重要視したのは《プラクティス=実践》のレイヤーであり、LEGO や粘土などの「メディウム」を用いた『Co-Repeat Prototyping = CRP』という共創型社会実装手法を提案した。また、この手法を用いてデザイン活動を行うための《オブジェクト=構法》を提示する事が本研究の目的であるとした。

[背景]

第2章では、《オブジェクト》を提案するにあたって、既往研究の文脈を整理した。まず、『WikiHouse』に代表される建築のオープンソース化の危険性について述べた。次に、建築生産におけるオープンなデザイン環境を提供する「メタアーキテクト」の先駆者として、Alexander と Habraken を紹介し、本研究の提案手法は Habraken の系譜であることを述べた。最後に、{近代}以前に存在したオープンデザイン環境の成立過程を考察し、その要因を「有能な大工のネットワーク」「伝統構法/在来構法といった確立した構法」「畳割モジュールという共通言語」の三つに求めた。さらに、伝統構法の屋根形式の変遷を読み解くことで、これらの進化の延長線としての《オブジェクト》を提案することを述べた。

[問題]

第3章では、[オブジェクト]の提案にあたって、既存の構法における問題点を整理した。具体的には、「表現可能形状の物理的制約」の問題と、この解決を計った既往研究構法の「ファブリケーションの複雑さ」の問題、「非冗長性/非拡張性」の問題である。

[仮説]

第4章では、これらの問題を解決するための仮説である「構法学的転換」という視点と、「超矛盾系」というコンセプトを提示した。前者は、素材やファ

アプリケーション等の生産過程における「絶対的な制約」に立脚し、構法やデザインを考えるといった、既存のプロセスを逆行する提案である。後者は、脆く短命な木質材料という物理制約を解決するために、要素同士が部分的に交換可能であるような、微細な単位要素に基づく構成手法のアイデアである。

[関連研究]

第5章では、この構成手法実現の手がかりとして、離散的な最小構成要素に基づく『Digital Material』の研究を紹介した。さらに、これらの要素単位を接続するジョイント形式として、日本の伝統技術である『継手・仕口』の研究を紹介した。最後に、これらを応用した手法として『Lo-Fi』（低解像度）の《サーフェスモデル》を構築する手法を提案することを述べた。

[手法]

第6章では、関連研究の手法の応用として、局所的に分解・構成可能な木質三次元曲面製作技法を提示した。具体的な実装方法として、「幾何学」「構成要素」「素材」の三つの離散化手法を提示した。

[設計]

第7章では、この手法に関する三つのケーススタディを展開した。まず《CaseStudy01》では提案手法の実現可能性について、製作を行うことによって実証した。また、この手法を用いた社会実装として広島県安芸高田市にて、計2回のワークショップを実施した。ここで得た知見としては、「メディウムがワークショップの質を左右すること」「プロセスを評価し合うことで与件に対する合意を得たこと」「最終的なデザインの決定はローカルアーキテクト、若しくはメタアーキテクトが行うこと」「オルタナティブな住宅供給システムを実現する可能性があること」「新しいオープンな文化を発生する可能性があること」「構法の定義段階からユーザーと共に行う必要があること」等である。

続く、《CaseStudy02》では《CaseStudy01》におけるワークショップで判明した「インタラクティブ性不足」の問題を検討した。具体的には、『Digital Frame』が有限個の要素によって成立するモデルの提案を行った。結果としては、実空間上で空間探索が可能である反面、接続要素を決定する際の計算量が膨大であり、人間の能力では処理しきれないことが判明した。そのため、人間のアプリケーション能力を拡張するようなツールの開発が研究課題として提示された。

最後の《CaseStudy03》では、《CaseStudy01》におけるワークショップで判明した「構造安定性」の問題を検討した。具体的には、《ミクロ（素材物性の加味）》《メゾ（接合部の剛性評価）》《マクロ（構造体全体の解析）》の三つの視点から改善案を模索した。まず、《ミクロ》の検証では、「近似的な繊維方向」を導き、単版積層材を利用することによって解決を計った。《メゾ》の検証では、継手の基本形を再考することで新しい形状を設計し、仕口においては断面欠損を考慮した改善案を提案した。最後に、《マクロ》の解析では、デザインの判断基準となるようなラフな解析を行う事に成功した。厳密な解析のためには、実験による剛性評価が必要があるが、デジタルファブ리케이션の特性を活かした「直感的な」解析手法を構築することが今後の研究課題として浮き彫りになった。

以上が、7章を通した研究成果である。ここで、第7章で行った三つのケーススタディを通して判明した、建築生産におけるオープンデザインの実現の為の「要件」を整理する。《CaseStudy01》で追求したのは「他者性をいかにして包括するか」であり、《CaseStudy02》で追求したのは「個人の趣向をいかにして探索するか」である。したがって、これら二つは“人間の意思”に基づいたオープンデザインの実装手法の模索である。一方、《CaseStudy03》で検証したのは、構造安全性という“自然の摂理”に基づいたオープンデザインの実装手法の模索である。したがって、「人間の側の論理」と「自然の側の論理」といった二つのベクトルから検証を行ってきたのである。

建築を生産するにあたり、オープンなプロセスによってデザインを行う場合、その社会性をいかにして反映するか、いかにして安全なものをつくるかといった問題は当然発生するだろう。したがって、これらはオープンデザインを成立させる為の「必須要件」なのであり、第7章ではその実装手法を模索した。

「個人の欲求と社会性」を自由に表現でき、その自由さを裏付ける「自然の秩序」をも自由にコントロールすることのできるツールを獲得し、さらにそのツールを自由に使いこなすことのできる身体性が獲得されてはじめて「建築生産におけるオープンデザイン」が実現するのではないだろうか。本研究は、その実現のための一つの「プロトタイプ（試み）」である。

参考文献

[建築生産／建築構法]

内田 祥哉 (1977),

『建築生産のオープンシステム』, 彰国社.

内田 祥哉, 吉田 倬郎, 深尾 精一, 瀬川 康秀, 大野 隆司, (1981),

『建築構法』, 市ヶ谷出版社.

内田 祥哉 (1993),

『建築の生産とシステム』, 住まいの図書館出版局.

内田 祥哉 (2002),

『対話 現代建築の造られ方』, 市ヶ谷出版社.

[オープンデザイン]

Bas, Van, Abel. Lucas, Evers. Roel, Klaassen. and Peter, Troxler. (2011),

Open Design Now: Why Design Cannot Remain Exclusive. = 田中 浩也 監訳, 川本 大功
訳, 巾嶋 良幸 訳, 古賀 稔章 訳, 水野 祐 訳, 岩倉 悠子 訳, 菊池 開司 訳, (2013), 『オ
ープンデザイン: 参加と共創から生まれる「つくりかたの未来」』, オライリージャパン.

ドミニク・チェン (2012),

『フリーカルチャーをつくるためのガイドブック: クリエイティブ・コモンズによる創造の
循環』, フィルムアート社.

[切削加工]

番匠谷薫, 奥村正悟, 服部順昭, 村瀬安英, (1992),

『木造科学講座6 切削加工』, 海青社.

松岡 甫篁, 安斎 正博, (2013),

『切削加工の基礎: 工具の選び方から高速ミーリングまで』, 森北出版.

[FAB]

Vicente, Guallart. (2014),

The Self-Sufficient City: Internet has changed our lives but it hasn't changed our cities,
yet., Actar.

上田 完次, (1994),

『生物思考型生産システム: 自然・生命からの発想』, 工業調査会.

- 田中 浩也, (2012),
『FabLife: デジタルファブ리케이션から生まれる「つくりかたの未来」』, オライリー
ジャパン.
- 田中浩也, 久保田晃弘, 水野大二郎, 松井茂, 他, (2013),
『ファブに何が可能か: 「つくりながら生きる」21世紀の野生の思考』, フィルムアート
社.
- 田中 浩也, (2014),
『SFを実現する: 3Dプリンタの想像力』, 講談社現代新書.

[Prefab]

- Bruno, Reichlin., Catherine, Dumont, d'Ayot. (2004),
Jean Priuve: The poetics of technical objects, Vitra Design Stiftung. = 山名 善之 日本語訳
監修, (2004), 『ジャン・プルーヴェ』, TOTO出版.
- 広瀬 鎌二, (1963),
『プレファブ建築生産について』 『建築雑誌 1963年12月号』, 日本建築学会.
- 広瀬 鎌二, (1975),
『プレファブと地域文化』 『建築雑誌 1975年10月号』, 日本建築学会.
- 石山 修武, (1995),
『笑う住宅』, ちくま文庫.
- 松村秀一, (1999),
『「住宅」という考え方: 20世紀的住宅の系譜』, 東京大学出版会.

[メガアセンブリ]

- Daniel, Cardoso, Llach. (2007),
"A Generative Grammar for 2D Manufacturing of 3D objects", Masters of Science Thesis,
MIT.
- Sass, Lawrence. Michaud, Dennis. and Cardoso, Daniel. (2007),
"Materializing a Design with Plywood", 25th eCAADe Conference Proceedings, Frankfurt
am Main, Germany, pp. 629-636.
- Daniel, J, Smithwick. (2009),
"Architectural Design 2.0: An Online Platform for the Mass Customization of Architectural
Structures", Masters of Science Thesis, MIT.
- Bluce, Bell. and Sarah Simpkin. (2013),
"Domesticating Parametric Design", Computation Works: The Building of Algorithmic
Thought, Architectural Design, Academy Press.

Alastair, Parvin. (2014),

「オープンソース・アーバニズム エッセイ：データこそが答えだ。でも、そもそも何の？」『a+u 2004年11月号』, 新建築社.

[ソーシャルビルド]

Amos, Rapoport. (1969),

House Form and Culture, Prentice Hall. = 大岳 幸彦 訳, 佐々木 史郎 訳, 山本 正三 訳, (1987), 『住まいと文化』, 大明堂.

N, John, Habraken. (1972),

「特集: 支え構造と分離ユニット」, 『都市住宅1972年9月号』, 鹿島研究所出版会.

E, F, Schumacher. (1973),

Small Is Beautiful: Economics as if People Mattered, Harper Perennial. = 小島 慶三 訳, 酒井 懋 訳, (1986), 『スモール イズ ビューティフル』, 講談社.

Christopher, Alexander. (1985),

The Production of Houses, Oxford University Press. = 中埜 博 訳, (2013), 『パタン・ランゲージによる住宅の生産』, 鹿島出版会.

Lucien, Kroll. (1987),

The Architecture of Complexity, MIT Press. = 重村 力 訳, (1990), 『参加と複合: 建築の未来とその構成要素』, 住まいの図書館出版局.

Cynthia, E, Smith. (2007),

Design For The Other 90%, Editions Assouline. = 植屋 詩野 監修, 北村 陽子 訳, (2009), 『世界を変えるデザイン: ものづくりには夢がある』, 英治出版.

原 広司, (1987),

『集落への旅』, 岩波新書, 岩波書店

安藤 邦広, 乾 尚彦, 山下 浩一, (1995),

『住まいの伝統技術』, 建築資料研究社.

キャメロン・シンクレア, 原田真宏, (2010),

「往復書簡: 建築の社会性」, 『新建築2010年9月号』, 新建築社.

山崎 亮, (2012),

『ソーシャルデザイン・アトラス: 社会が輝くプロジェクトとヒント』, 鹿島出版会.

[職能論]

内田 祥哉, (1987),

「建築の工業化と建築家の役割」 『新建築学大系1-建築概論-』, 彰国社.

隈 研吾, (2004),
『負ける建築』, 岩波書店.

磯崎 新, (2005),
『建築家探し』, 岩波書店.

[日本建築]

伊藤 ていじ, (1966),
『日本デザイン論』, 鹿島出版会.

伊藤 ていじ, (1967),
『日本の工匠』, 鹿島出版会.

伊藤 延男, (1967),
『古建築のみかた: かたちと魅力』, 第一法規出版.

村田健一, (2006),
『伝統木造建築を読み解く』, 学芸出版社.

[伝統構法 / 在来構法]

広瀬 鎌二, (1975),
『伝統のディテール: 日本建築の詳細と技術の変遷』, 彰国社.

内田 祥哉, (1983),
『木造在来構法(プレハブ住宅の対比として見た日本の伝統的木造住宅)』, 財団法人新住宅普及会 住宅建築研究所報.

広瀬 鎌二, (1983),
『現代における伝統技術のあり方を求めて』 『新建築 1983年10月号』, 新建築社.

広瀬 鎌二, (1984),
『在来構法を考える: 三次元であることを忘れた建物-』 『建築とまちづくり 1984年4月』, 新建築家技術者集団.

広瀬 鎌二, (1996),
『対談: 日本の伝統と私の実践』 『住宅建築 1996年9月号』, 新建築社.

増田 一真, (1998),
『建築構法の変革』, 建築資料研究社.

内田 祥哉, (2009),
『日本の伝統建築の構法』, 市ヶ谷出版.

源 愛日児, (2009),
『木造軸組構法の近代化』, 中央公論美術出版社.

太田 邦夫, (2010),

『エスノ・アーキテクチャ』, 鹿島出版社.

増田 一真, (2011),

『伝統の知恵を汲む現代木構造の確立こそ急務』 『建築雑誌 2011年9月号』, 日本建築学会.

[日本論 / 景観論]

和辻 哲郎, (1979),

『風土: 人間学的考察』, 岩波書店.

保田 与重郎, (1990),

『日本の橋』, 講談社.

樋口 忠彦, (1993),

『日本の景観: ふるさとの原型』, 筑摩書房.

磯崎 新, (2003),

『建築における「日本的なもの」』, 新潮社.

網野 善彦, (2005),

『日本の歴史をよみなおす』, 筑摩書房.

松岡 正剛, (2005),

『フラジャイル: 弱さからの出発』, 筑摩書房.

中沢 新一, (2011),

『日本の大転換』, 集英社.

[デジタルマテリアル]

Neil, Gershenfeld. (2005),

Fab: The Coming Revolution on Your Desktop--from Personal Computers to Personal

Fabrication, Basic Books. = 田中 浩也 監修, 糸川 洋 訳, (2012), 『Fab: パーソナルコンピ

ューターからパーソナルファブ리케이션へ』, オライリージャパン.

George, A, Popescu. (2007),

"Digital Materials for Digital Fabrication", Masters of Science Thesis, MIT Press.

Skylar, J, E, Tibbits. (2010),

"Logic Matter: Digital logic as heuristics for physical self-guided-assembly", Masters of Science Thesis, MIT Press.

Kenneth, C, Cheung. (2012),

"Digital Cellular Solids: reconfigurable composite materials", PhD Thesis, Media Arts & Sciences, MIT Press.

[継手・仕口]

清家 清, (1970),

『日本の造形 木組』, 淡交社.

内田 祥哉, (1981),

『在来構法の研究(1): 木造等の継手仕口について』, 財団法人新住宅普及会 住宅建築研究所報.

内田 祥哉, (1982),

『在来構法の研究(2): 木造継手の強度剛性試験』, 財団法人新住宅普及会 住宅建築研究所報.

濱島 正士, 田中 文男, 伊藤 延男, 安藤 直人, 大河直躬, 太田 邦夫, 他, (1984),

『継手・仕口: 日本建築の隠された知恵』, INAX出版.

鳥海 義之助, (1987),

『図解 木工の継手と仕口 増補版』, 理工学社.

松井 源吾, (1989),

『木造の継手と仕口』, 鹿島出版会.

源 愛日見, (1989),

「ジョイント」『現代建築の発想: アール・ヌーヴォーからCADまで』, 丸善株式会社.

内田 祥哉, (1993),

『在来構法の研究: 木造の継手仕口について』, 住宅総合研究財団.

源 愛日見, (2003),

『継手、仕口の生成と展開』『漢字と建築』, INAX出版.

木内 修, (2007),

『現代棟梁の設計術: 五意達者への道』, 新建築社.

富樫 新三, (2010),

『木造建築の継手と仕口』, オーム社.

源 愛日見, (2011),

『歴史の中の継手仕口』『木組み・継手と組手の技法』, 誠文堂新光社.

[屋根]

伊藤 ていじ, (1982)

『日本の屋根』, 叢文社.

原田 多加司, (2004),

『屋根の日本史: 職人が案内する古建築の魅力』, 中央公論新社.

武者 英二, 吉田 尚英, (2009),

『第二版 屋根のデザイン百科: 歴史・かたち・素材・構法・納まり・実例』, 彰国社.

[ジオメトリ]

- R, Buckminster, Fuller. and Robert, W, Marks. (1973),
The Dymaxion World of Buckminster Fuller, Doubleday Anchor Books. = 木島 安史 訳, 梅澤 忠雄 訳, (2008), 『バックミンスター・フルーのダイマキシオンの世界』, 鹿島出版会.
- J, Baldwin. (1997),
BuckyWorks: Buckminster Fuller's Ideas for Today, Wiley. = 梶川 泰司 訳, (2001), 『バックミンスター・フルーの世界—21世紀エコロジー・デザインへの先駆』, 美術出版社.
- Helmut, Pottmann. Andreas, Asperl. Michael, Hofer. and Axel, Kilian. (2007),
Architectural Geometry, Bentley Institute Press.
- Philip, Ball. (2008),
Shapes: Nature's Patterns: A Tapestry in Three Parts, Oxford University Press. = 林 大 訳, (2011), 『かたち: 自然が創り出す美しいパターン』, 早川書房.
- Fabian, Scheurer. (2010),
"Materializing Complexity", The New Structuralism: Design, Engineering and Architectural Technologies, Architectural Design, Academy Press.
- Achim, Menges. (2012),
Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design, Architectural Design, Academy Press.
- Ruairi, Glynn. and Bob, Sheil. (2013),
Fabricate: Making Digital Architecture, Riverside Architectural Press.
- Fabio, Gramazio. and Matthias, Kohler. (2014),
Fabricate: Negotiating Design and Making, gta publishers
- 内山 協一, 瀬尾 文彰, 松本 信二, 田中 浩也, 北川 啓介, 他, (2005),
『ハイパーサーフェスのデザインと技術: やわらかな時代の建築に向けて』, 彰国社.
- 鳴川 肇, (2013),
「球のキカガクと地球のガカク バックミンスター・フルーが意識した技術の懐妊期間から」 『新建築 2013年8月号』, 新建築社.

[情報論]

- Humberto, R, Maturana. and Francisco, Varela. (1992),
"Tree of Knowledge", Shambhala. = 菅 啓次郎 訳, (1997), 『知恵の樹: 生きている世界はどのようにして生まれるのか』, 筑摩書房.
- Charles, Petzold. (2000),
Code, Microsoft Press. = 永山 操 訳, (2003), 『CODE: コードから見たコンピュータのからくり』, 日経BPソフトプレス.

Kostas, Terzidis. (2006),

Algorithmic Architecture, Routledge. = コスタス・テルジディス, 田中 浩也 監訳, 荒岡 紀子 訳, 重村 珠穂 訳, 松川 昌平 訳, (2010), 『アルゴリズムック・アーキテクチャ』, 彰国社.

James, Gleick. (2012),

The Information: A History, A Theory, A Flood, Vintage. = 楡井 浩一 訳, (2013), 『インフォメーション: 情報技術の人類史』, 新潮社.

江渡 浩一郎, (2009),

『パターン、Wiki、XP: 時を超えた創造の原則』, 技術評論社.

[設計論]

Christopher, Alexander. (1964),

Notes on the Synthesis of Form, Harvard University Press.

= 稲葉 武司 訳, 押野見 邦英 訳, (2013), 『形の合成に関するノート/都市はツリーではない』, 鹿島出版会.

吉阪 隆正, (1984),

『吉阪隆正集11: 不連続統一体を』, 勁草書房.

岡崎 乾二郎, (2007),

『芸術の設計: 見る/作ることのアプリケーション』, フィルムアート社.

石山 修武, (2010),

『生きのびるための建築』, NTT出版.

柄沢 祐輔, 田中 浩也, 藤村 龍至, ドミニク・チェン, 松川 昌平, (2011),

『設計の設計』, INAX出版.

隈 研吾, (2013),

『小さな建築』, 岩波書店.

内藤 廣, (2013),

『形態デザイン講義』, 王国社.

藤村 龍至, (2014),

『批判的工学主義の建築: ソーシャル・アーキテクチャをめざして』, NTT出版.

[構造デザイン]

Eduardo, Torroja. (1958),

The Structures of Eduardo Torroja: An Autobiography of Engineering Accomplishment, F. W. Dodge Corporation. = 川口 衛 監修, IASS 2001組織委員会 訳, (2002), 『エドゥアード・トロハの構造デザイン』, 相模書房.

- Frei, Otto. Rainer, Barthel. and Berthold, Burkhardt. (1985),
Natürliche Konstruktionen, Dva, = 岩村 和夫 訳, (1986), 『自然な構造体: 自然と技術にお
ける形と構造、そしてその発生プロセス』, 鹿島出版会.
- Cecil, Balmond. (2006),
『a+u臨時増刊 2006年11月号』, 新建築社.
- Olga, Popovic, Larsen. (2007),
Reciprocal Frame Architecture, Routledge.
- 渡辺 邦夫, (2002),
『飛躍する構造デザイン』, 学芸出版社.
- 佐々木 陸朗, (2005),
『フラックス・ストラクチャー』, TOTO出版.
- 内藤 廣, (2008),
『構造デザイン講義』, 王国社.
- 小澤 雄樹, (2014),
『20世紀を築いた構造家たち』, オーム社.

[木造 / 木質構造]

- Thomas, Herzog. Julius, Natterer. Roland, Schweitzer. Michael, Volz. and Wolfgang, Winter. (2004),
Timber Construction Manual, Birkhäuser Architecture.
- Menges, Achim. (2011),
"Integrative Design Computation: Integrating material behaviour and robotic manufacturing
processes in computational design for per- formative wood constructions", Proceedings of
the 31st Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture
(ACADIA), Banff (Al- berta), pp. 72-81.
- 内田 祥哉, (1986),
『小径材を格子状に積層した住宅のための木造梁に関する開発研究(1)』, 財団法人新住宅
普及会 住宅建築研究所報.
- 内田 祥哉, (1987),
『小径材を格子状に積層した住宅のための木造梁に関する開発研究(1)』, 財団法人新住宅
普及会 住宅建築研究所報.
- 松井 源吾, (1988),
『木造の構造設計』, 鹿島出版会.
- 古野 毅, (1994),
『木材科学講座2: 組織と材質』, 海青社.

- 今川 憲英, (1997),
『木による空間構造へのアプローチ: 木で可能な15の基本加構の構造デザイン』, 建築技術.
坂本 功, (2000),
『木造建築を見直す』, 岩波書店.
坂本 功, (2001),
『日本の木造住宅100年』, 日本木造住宅産業協会.
杉山 英男, (2008),
『木質構造 第4版』, 共立出版.
西沢大良, (2011),
『西沢大良 木造作品集 2004-2010』, INAX出版.
木質構造研究会, (2012),
『新・木質構造建築読本: ティンバーエンジニアリングの実践と展開』, 井上書院.
腰原 幹雄, 小杉 栄次郎, 山田 敏博, team Timberize, (2012),
『都市木造のヴィジョンと技術』, オーム社.

この論文は、私が共感したすべての人達／私に共感してくれたすべての人達との共著であることをここに記す。

研究に必要な「ほぼすべての」ことを私に与えて下さった主査の田中浩也先生へ。常に熱心に／批判的に向きあってく下さった副査の松川昌平様へ。新しいデザイン／職能の視座を提供してく下さった副査の水野大二郎様へ。

本研究の核であるメタボリズムに関する興味と、今の進路に進むきっかけを与えて下さった藤村龍至様へ。構造について助言を下下さった渡辺邦夫様、小澤雄樹様、田島隆志様、鳴川肇様へ。建築生産／構法という学問領域を開拓してく下さった内田祥哉様へ。私の師であり良き理解者である原田真宏先生へ。

渡辺洋一郎様をはじめとするワークショップにご協力頂いた皆様へ。万全の研究環境を提供してく下さった大野一生様、庵原悠様、株式会社岡村製作所の皆様へ。共に切磋琢磨した、大嶋泰介、金崎健治、廣瀬悠一、富中裕介、三井正義、関島慶太、安井智宏ら田中浩也研究室修士のメンバーへ。共に戦ってくれた大庭広明、深井千尋、守矢拓海へ。歴史のすばらしさ、常に私に欠けている視点を教えてくれた新村美沙紀へ。私を支えてくれた家族と友人達へ。その他名前を上げられなかった全ての人／物達へ。

心よりの尊敬と、感謝を込めて。

