

修士論文 2019 年度

バウンダリーデザイン
——3D プリンタを用いた多孔質ガラスによる
建築都市エレメント——

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科

徳重 早織

修士論文 2019 年度

バウンダリーデザイン——3D プリンタを用いた多孔質ガラスによる建築都市エレメント——

論文要旨

FDM 式 3D プリンタの使用とロストワックス製法を組み合わせた、多孔質ガラスの制作技法を提案する。また、これを建築都市エレメントとして応用することを前提とし空間設計を行うことで、AM（アディティブマニュファクチャリング）構法特有の空間のあり様について考察する。

近年、建築や都市のファブリケーションに注目が集まっているが、日本における事例は少なく依然発展途上である。困難である原因の一つは、対象の複雑性にある。そこで、空間を構成する諸要素（以下「エレメント」）に建築や都市を分解し、エレメントのファブリケーションおよびそれを用いた空間設計を行うことが手法として有効であると仮定する。

エレメントに使用される様々な素材の中でも、本稿では特にガラスに注目する。ガラスは建築の要として窓に使用されることで空間の属性を決定づけ、重要な役割を果たしてきた歴史を持つ。他方、近現代の建築においては無色透明の板ガラスに加工し「虚の平面」として使用されることがほとんどである。近代建築の三大マテリアルの他二種「鉄」「コンクリート」に比べ表現の幅が狭く、寵愛の対象になっていないと考えられる。

本研究にて焼成されたガラス群の一連の制作過程とその分析を通じ、デジタルファブリケーション時代にふさわしいガラスのマテリアリティと、それがもたらす新しい空間の可能性を提示する。

キーワード

1. 多孔質ガラス, 2. 建築都市エレメント, 3. デジタルファブリケーション, 4. 鋳造, 5. 内部構造デザイン

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科
徳重早織

Abstract of Master's Thesis Academic Year 2019

Boundary Design: Architectural and Urban Elements with Porous Glass Using 3D Printer

Summary

This paper proposes a technique for making porous glass by combining the use of the FDM 3D printer with the lost wax method. The porous glass produced by this method is applied as an architectural city element to design a space, and the space peculiar to the AM (additive manufacturing) construction method is considered.

In recent years, attention has been paid to architecture and digital fabrication in cities, but there are few cases in Japan and they are still developing. One of the difficulties is the complexity of the architectural space. Therefore, it is assumed that it is effective as a method of digital fabrication to disassemble the architecture and the urban into various elements constituting the space and to fabricate the elements and design a space using the elements.

Among the various materials used for elements, this paper focuses on glass. Glass has a history of playing an important role in determining the attributes of space by being used for windows as the cornerstone of architecture. On the other hand, in modern architecture, it is almost always processed into a colorless and transparent sheet glass and used as an "nothingness plane." The range of expression is narrower than the other three types of modern architecture, "iron" and "concrete".

Through a series of production processes and analysis of the glass group baked in this research, we present the materiality of glass suitable for the age of digital fabrication and the possibilities of new space brought about by it.

Keywords

1. Porous Glass, 2. Architectural and Urban Element, 3. Digital Fabrication, 4. Casting, 5. Internal Structure Design

Keio University

Graduate School of Media and Governance

Saori Tokushige

目次

要旨	2-3
日本文	2
英文	3
本稿の構成	5
第一章: 序論	6-10
異なる社会の周縁に所属し、それらに関わり合いを持ちつつも、社会同士の距離感を調停する“境界”のデザインはど のような形でなされ得るのか	7-8
切断を前提としない境界のあり方をマテリアルからデザインするとしたら、それはどのような形で可能か	8-9
建築に使用されるガラスのマテリアリティを復権し、「虚の平面」でない状態にしつつも、透明性を保つことは可能 か	9-10
第二章: 先行研究	11-21
光とガラス	12-14
環境呼応型建築	15-17
3D プリンタとガラス	18-21
第三章: 方法	22-39
基本の制作の手順	23-35
各制作の相違点について	36
実験の手順	37-39
第四章: 結果	40-70
第五章: 考察	71-3
作品に特徴的な項目とその対応	72-82
型取り	83-84
多孔質ガラスの要素	85
光の効果	86-87
先行研究の技法との比較	88
第六章: 結論	89-91
第七章: その他	92-117
付録	93-105
図表出典・引用文献・関連文献	106-116
謝辞	117

本稿の構成

本稿は、以下の順に議論を進める。

第一章: 序論

第二章: 先行研究

第三章: 方法

第四章: 結果

第五章: 考察

第六章: 結論

第七章: その他

第一章では、本稿のタイトルであるバウンダリーデザインとは何かを述べる。

第二章では、ガラス、建築、窓、デジタルファブ리케이션など様々な切り口から先行事例や文献を紹介し、研究テーマの詳細な設定や研究の必要性について述べる。

第三章では、一連の制作手順と、制作物の実験方法について記述する。

第四章では、第三章の手順によって得られた作品そのものと、実験結果について記述する。

第五章では、第四章で制作したものを分析・考察する。

第六章では、これまでの章で展開されてきた議論をまとめる。

最後に、第七章では参考文献や付録などを取り扱う。

一章：序論

この章では、本稿のタイトルである
「バウンダリーデザイン」とは何か、
またリサーチクエスチョンについて述べる。

さて、本稿のタイトル「バウンダリーデザイン」は筆者の造語である。本稿にて取り扱いたい問題を意味する適切な単語が見つからなかったため、このような運びとなった。

リサーチクエスションは以下の3つである。

a. 異なる社会の周縁に所属し、それらに関わり合いを持ちつつも、社会同士の距離感を調停する“境界”のデザインはどのような形でなされ得るのか

b. 切断を前提としない境界のあり方をマテリアルからデザインするとしたら、それはどのような形で可能か

c. 建築に使用されるガラスのマテリアリティを復権し、「虚の平面」でない状態にしつつも、透明性を保つことは可能か

a. 異なる社会の周縁に所属し、それらに関わり合いを持ちつつも、社会同士の距離感を調停する“境界”のデザインはどのような形でなされ得るのか

社会学者であるスーザン・L・スターとジェームズ・R・グリースマーの提唱した理論に「バウンダリー・オブジェクト」[1]がある。吉田航太の『インフラストラクチャー／バウンダリーオブジェクトにおける象徴的価値の問題』[2]がその用語の範囲について、日本文での確かかつ詳細に解説しているため、該当部分について少し長い引用したい。

…複数の異質なアクターが協働して科学活動を行うことを可能にするモノとして、バウンダリーオブジェクトが存在することを指摘した [Star and Griesemer 1989]。複数のアクターが関心の翻訳によってネットワークが構成されることで科学的事実や技術的人工物が成立するというアクターネットワーク理論を引き継ぎながらも、科学者や技術者といった特権的なアクターが必須の通過点 (obligatory passage point) となって、他のアクターを巻き込んでいくというモデル [Callon 1986] を彼女らは否定する。そうではなく、標本・地図・博物館といった複数のオブジェクトが、設立者・パトロンの資産家・ハンターなどのそれぞれのアクターの観点にしたがって、進化論の証明・自然保護・金銭的利益などに解釈されることによって協働が可能になると主張した。こうした協働のために解釈の柔軟性を残したモノを、スターとグリーセマーはそれぞれのアクターの社会的世界 (social worlds) の境界にあるモノとしてバウンダリーオブジェクトと呼んだのである。

かいつまんで言えば、「異なる解釈・使用をされる可塑性を持ちつつも、同時にコミュニティを跨いでも崩壊しない程度の堅牢なアイデンティティをも所持し、複数の社会の境界でそれらの媒介となるヒト・モノ・コト」を指す。

現代建築における境界のあり方について、スターらの議論を踏襲しつつ考える。バウンダリー

一オブジェクト論がラトウールのアクターネットワーク理論[3]の系譜であることを踏まえ、(アクター同士のヒエラルキーがそうであるように) ヒトとモノとコトを等価に扱うバウンダリーデザインというものが存在すると仮定する。

建築は基本的には「人のための空間」であることを前提とする。しかしながら、ヒトとモノとコトを等価に扱うのであれば、人工物であるにも関わらず「植物のための空間」「ガラスのための空間」「光のための空間」……など、「人以外のための空間」が同時に存在することを検討しても良いだろう。さらに、当事者は自由に各々の空間を使っているが、その実、それぞれの空間を構成しているものは同じだという状況もありうるだろう。

それが本稿の目指すところである「建築都市エレメント」の一条件であり、その媒介となるエレメント及び同時に存在する在り方を設計するのが「バウンダリーデザイン」である。

空間に対するこのような考え方は、平田晃久の「からまりしろ」[4]との類似性が見られる。

「からまりしろ」は文字通りに解釈すれば絡まりのための代である。異なるレイヤーに存在する複数のモノやコトが、ある特定の一つの何かに対し関係を持つための余地を、生態系になぞらえて表した平田の造語である。

からまりしろと本稿との相違点は、複層性を担保しているモノが空間に与える支配力の強さである。「からまりしろ」は「のりしろ」の「しろ」と同じく、明らかに主役でない側を示す言葉である。しかし本稿では、後述のように長年空間の調停役として扱われてきたガラスのあり方に疑問を持ち、本来「従」ではなく「主」にもなりうるはずのガラスのマテリアリティのユニークさを奪還しようと試みている。

b.切断を前提としない境界のあり方をマテリアルからデザインするとしたら、それはどのような形で可能か

バラガンの「建築は内側から考えるべき - すなわち外面は内面を突き詰めた結果にすぎない」[5]という言葉に明確に表れているように、「内部と外部があり、まず内部を作る」という手順を前提にほとんどの建築はつくられてきた。

古くは、泥や石など自然物の積層や洞窟の掘進にも見られるように、まず外部という危険な場所から空間を切断し、安全な内部を作るのが定石である。

しかし文明が発達するにつれ、生命を脅かすという意味での外敵は周囲に存在しなくなった。加えて、とりわけ施工や構造や設備の技術が発展に伴い切断の度合いが向上し、“切断されすぎる”ことへの疑問や批判や懸念が出てきた。

そこで「切断してないかのように感じる切断」の需要が増加したのである。日本でも古くは縁側と庇に始まり、「切断してないかのように感じる切断」の表現はあるものの、特に現代では建築家が競ってそのバリエーションを発明している。中庭型(住吉の長屋)、分棟型(森山邸)、入れ子型(House N)、屋根型(屋根の家)など、類例には事欠かない。

いわゆる「中間領域」は手垢のついた言葉であるため、建築家が自身の作品を語るときには好んで用いられない。しかしながら、その実、日本の現代建築の評価はプランニングの新しきに向けたものが大きな割合を占めている。言い換えると「切断してないかのように感じる切断＝中間領域」の発明に対する評価であることが多い。新しいタイプの中間領域の発明ができるか否かが、スタンダードな”建築家”と呼ばれる分水嶺となりつつある。

このような時代の流れの中で、本稿ではあえて、切断しない境界のデザインがありうるのかを模索したい。

切断しないとは一体どういうことなのか、今一度ここで検討する。

現代では境界の物質を薄く堅牢に作り、かつその薄く堅牢なエレメントの組み合わせ方によって、「切断してないかのように感じる切断」を演出してきた。薄さと堅牢さを両立させたばかりのつまり初期モダニズムの建築には、自由な空間という思想や最新技術の実装という意義が存在した。しかし現在においては、正味のところ、薄くて堅牢な方が安価であるという経済性のみに基づきそのパーツが採用されている例が多く見られる。

その薄さと堅牢さ、内部と外部を切断するエレメントの鋭利さを削ぐことによって、切断しないことを達成できるのではないだろうか。

3DプリンタとAM技術の登場により、建築は単なる既存のパーツの組み合わせパズルゲームではないフェーズに入りつつある。各自が既成品ではない好みのパーツを自由に作ることが既に可能である。さらに、「パーツ」ですらなく「建築全体」を一体成型的に一度に建てることの可能な大型プリンタも近年開発されている。設計から施工までを貫いて考えるのが自然な状態になりつつあり、将来的には「パーツ」で空間を認識しなくなる時代が訪れる可能性がある。

3DプリンタとAM技術を駆使し、境界を構成する物体に厚みと弱さを与えるのが、本研究の重要な課題である。その材料を用い、内部から外部／外部から内部へとグラデーションに変化する状態を構築したとき、パーツの組み合わせ加減では達成し得ない境界のデザイン＝バウンダリーデザインが達成可能であると推測される。

c.建築に使用されるガラスのマテリアリティを復権し、「虚の平面」でない状態にしつつも、透明性を保つことは可能か

かつてガラスは高価であった。そのため、体積の大きい建築ガラスにおいてはとりわけ、いかに薄くて透明なガラスを安価に作るかが人類の長年の課題となった。電灯が普及する以前の世界では窓は明かりと同義であり、窓のない屋内は暗闇となるため、死活問題だったのである。

後述の通り、板ガラスを安定的に大量生産できる方法が確立してからは、建築の分野においてはガラスを無いものかのように「虚の平面」として扱う表現が主流である。無色透明の面

材が普及すると同時に窓はピクチャーウィンドウとしての役割を強め、景色を切り取る装置となった。フレーミングの装置、文字通り“枠”が重視されガラスそれ自体の存在は無視されている。現在、建築図面におけるガラスの記述は、斜めに3ストロークほど線を書くことによって成立するほど簡略化されている。

しかしながら、現代に暮らしているほとんどの人が忘れているであろうが、本来ガラスはマッスである。「虚の平面」として以外の使われ方をしてきた時代の方が圧倒的に長いにも関わらず、ガラスは「虚の平面」として振る舞うことを半ば強制されている。

よって本稿では、ガラスのマテリアリティをもう一度引き出し、ガラスを再び「見るもの」として扱うにはどのような存在の仕方がふさわしいのかを検討する。

しかしここで重要なのは、どれだけ空調・調光設備が発達しようと、透明性という要素は今後も窓（や、それに変わるエレメントにも）求められ続けるだろうということである。ステンドグラスの技術が完全にはロストテクノロジーになっていないにも関わらず、相も変わらず透明性を持つガラスが人気であることを踏まえると、時代へ先祖返りさせてもおそらく世の中に受け入れられないと推測される。

ガラスがそこにあることを思い出させながら、つまり「虚の平面」でなく「実の立体」としての存在感を発揮させながら、透明性を担保するにはどうすれば良いのかを理解する必要がある。

本稿では、多孔質なガラスがその解となると仮定した。詳しくは考察の章で述べるが、景色が細切れになった映像のピクセル達が、ガラスの向こうで宙を漂っている状態を作ること、透明性（つまり、ガラスの向こうにある状態をピックアップして見せるという従来の窓の機能に近いもの）を担保しつつも、全く何もないわけではないので当然見え方は異なっている。窓だけど窓でない状態、フレームだけどフレームでない状態、ガラスがあるけどない状態という二重性を、多孔質形状によって再現し、ガラスに期待されるバウンダリー性を保持したまま、その物体性を奪還する。

そういった新しい「境界物」の状態と「境界」の状態を設計する試みが、本稿の意味するところのバウンダリーデザインである。

二章：先行研究

この章では、本稿が何を対象とし、
また何を対象とせずに研究を進めるのか、
以下の3つの補助線を引き明らかにする。

1. ガラスと光
2. 環境呼応型建築
3. 3D プリンタとガラス

光とガラス

空間スケールのガラスを研究するにあたり、これまでに積み上げられてきた「光とガラスの関係性」の事例を抜きに語ることはできない。ほぼ全ての建築ガラスは何らかの光の効用を期待して開口部に起用されており、よって膨大な実例が存在する。やや乱暴ではあるが、その中の特に代表的なものを、近現代を中心にここでは紹介する。

建築とガラスの長い付き合いにおいて、ガラスは窓とほぼ同義である。最古の窓ガラスは1世紀に登場した[6]。時代が下り12世紀になるとゴシック建築を背景にステンドグラスが興隆し、建築へのガラスの本格的使用が開始された[6,7]。しかし意外にも、現代のような透明の大きな板ガラスは歴史が浅く、近年になるまで登場しなかったのである。

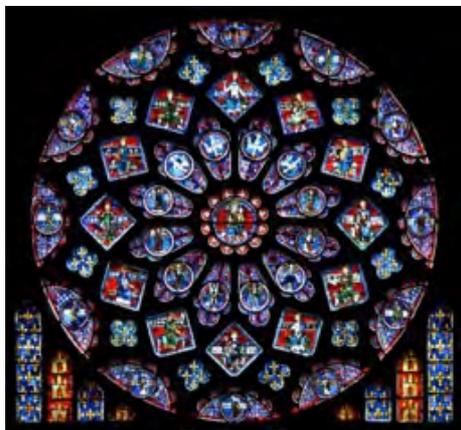


図1 シャルトル大聖堂のステンドグラス 出典：cathedrale-chartres.org

19世紀半ばのイギリスでは上流階級の食文化を支える装置として温室の研究が進み、1844年のキューガーデン・パームハウスに代表されるような透明なガラスの温室が建設された[8]。また、産業革命の影響を受け、同年スチールサッシの大量生産を可能とするロール成形が発明された[9]。このような時代の流れの中で、1851年パクストンによりクリスタル・パレスが設計された[10]。クリスタル・パレスは当時としては画期的であり、パクストン以降、ガラスはマテリアルとしての姿を消し抽象的なものを目指すバウンダリーとなった。

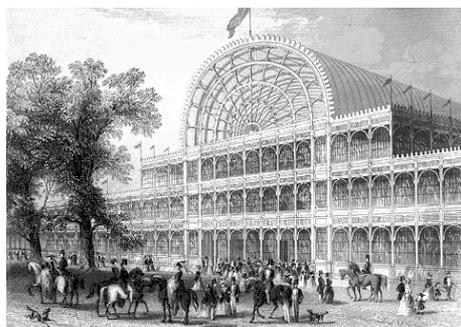


図2 クリスタル・パレス 出典：en.wikipedia.org (パブリックドメイン)

その後、第二次世界大戦が終わり、世界初の本格的なガラスのカーテンウォールが国連ビルのファサードとして設計された[8]。さらに、両面とも平滑な板ガラスを大量製造するための「フロート法」が1960年に発明され[6]、この閃きがガラスのファサードの流行を後押しした。



図 3 国連ビル 出典：aviewoncities.com

さらに時代が下りにビルの壁面に平滑な板ガラスを用いるのが当たり前になってからは、多少の意匠的工夫が見られるようになった。1997年にズントーの設計したブレゲンツ美術館は、曇りガラスを使用し館内に柔らかい光を取り入れている。



図 4 ブレゲンツ美術館 出典：kunsthau-bregenz.at

平滑な板ガラスでないガラスを建築に使おうとする試みは21世紀の日本の現代建築にも見られる。ピアノが2001年に設計した銀座メゾン・エルメスは、450角の大きなガラスブロックを連続的に用い、重さを感じさせない表現をした。



図5 メゾン・エルメス 出典：hermes.com

また、2003年にはH&deMがプラダブティック青山を設計した。凹凸のついた特注ガラスを480枚用いて建築全体を覆い、レンズのような効果を外壁に持たせた。



図6 プラダブティック青山 出典：prada.com

このように、古くからガラスは建築に用いられており、今でもほとんどの建築に光の効用を期待し使用されている。古代から近代においてその効用は、屋内を明るく暖かくし、加えて特に宗教建築では権威を象徴するものでもあった[11]。空調と照明設備の整った現代においては、そのほとんど全てが屋内外の隔たりを極力ないものとして演出する装置として用いられていると言っても過言ではないだろう。ブティックや美術館などである程度予算に余裕のあると思われる建築では、柔らかな光の拡散、無重力性、映り込みなど、視覚的要素に重点をおいて設計された事例が見られるものの、その数は少ない。

本稿ではこれまでのガラスと光の関係性の事例をある程度踏襲しつつも、新たな関係性をマテリアル研究によって築くことができるのかを探求する。

環境呼応型建築

これまでの部分で建築用ガラスと光との関係性を振り返ったが、環境の要素はもちろん光だけではない。近年、環境に呼応する建築デザインの事例が増加している。様々な材料／構造／設計のテクノロジーを複合的に用い、また同時に生物から学び、環境から建築を設計した事例が存在する。ここでは内部空間よりも外部環境との呼応性に着目し設計された、いくつかの事例を紹介する。

シュトゥットガルト大学の ICD は「パフォーマティブデザイン」の観点から設計された「HygroSkin」という作品を発表した[12-14]。パフォーマティブデザインとは、素材の持つ特徴から逆算的に形を決定する方法である。（従来のほとんどのデザインはこれとは逆のプロセスを辿る。まず形を決め、物理的・性能的にそれを満たす素材を形に当てはめるのが一般的である。）HygroSkin はバイオミクリーのアイデアを採用した。松ぼっくりが吸湿して開閉するように、木材のしなり具合を 3D プリントした ABS 樹脂でコントロールし、開口部をデザインした。

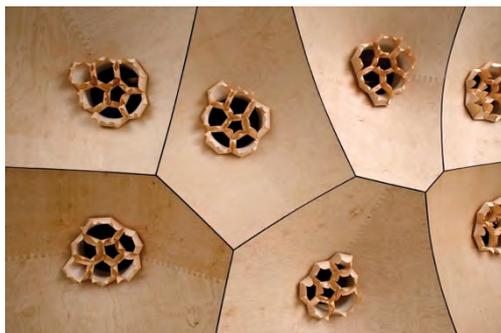


図 7 HygroSkin 出典：achimmenges.net

2015 年に AL_A によって設計された「MPavilion」は、花のような形状のパビリオンである。航海工学を元に設計された上部の花弁とそれを支える細く長い莖は、そよ風でも揺れ、強風でも折れない絶妙なしなやかさを持つ。



図 8 MPavilion 出典：mpavilion.org

まだ実現はしておらず構想段階だが、3D プリント製のファサードの事例もある。ミュンヘン工科大学は建築設計事務所 DMA とともに、ドイツ博物館の壁面をデザインした。ポリカーボネート製のパネルには波打った形状が採用されている。この凹凸は場所により微妙に異なり、音響、断熱、通風、遮光など博物館に必要な機能を最適化配置している。電気系統やその制御システムを使用せずに、適切な環境を内部に提供する試みである。



図 9 ドイツ博物館予想図 出典：deutsches-museum.de

日本人建築家の豊田啓介は、台湾の南投県に存在する「工業技術研究院」の環境呼応ファサードをデザインした。複合施設であるこの建物のファサードには、4000 枚もの可動パネルが用いられている。時間や季節の移ろいに伴う光や熱の変化、内部空間の利用目的から生じる開放性／閉鎖性に応じ、設置された無数の襞の角度が変化する。



図 10 工業技術研究院 出典：noizarchitects.com

2019年に東京の展覧会でも展示されたエコ・ロジック・スタジオの「H.O.R.T.U.S. XL アスタキサンチン g」は、空間性のある彫刻バイオアートである。珊瑚の形状から発想を得た3Dプリント製のパーツに、ユーグレナ（藻の一種）が埋め込まれている。ユーグレナの成長効率を計算し設計されたブロックからは酸素が発生し、ブロック内でコロニーが形成される。



図 11 H.O.R.T.U.S. XL アスタキサンチン g 出典：ecologicstudio.com

このように、テクノロジーを用いた環境対応型建築の例は数多くあるが、ガラスの類例は存在しない。

これまでに述べたように、ガラスは「虚の平面」であるという思い込みが人々の意識の中にあること、かつ次の項で述べるように、複雑なガラス造形が難しいことがその主たる要因であるように思われる。

本研究では、次章以降にて複雑なガラスを用いた環境対応エレメントの可能性を探る。

3D プリンタとガラス

上述のようなユニークな機能をガラスに持たせるための工夫の一つとして、複雑な形状デザインを施すことが考えられる。しかしその実例は見られない。三次曲面や多孔質など自由な形状を造形可能なことで広く知られるようになった AM 技術の例を見ても、建築スケールでの複雑形状ガラスを出力できた例は存在しない。

それはガラスという素材の取り扱いの困難さにある。一般的なガラスを造形するのに適切な柔らかさにするには 800 度前後に熱する必要がある。その高温に耐えるパーツでプリンタ本体を設計し制御しなくてはならない。また 800 度前後に熱したガラスは水飴のようにかなりの粘度があり、形状コントロールが困難である。さらに、常温のガラスは硬い反面脆く、強度を確保するのが困難である。複合的な要因が技術の確立を阻んでいる。

ここでは、現在公表されているガラスの 3D プリンタの最新技術を紹介し、それらを比較しつつ、各技法の長所と短所について述べる。

2020 年 1 月現在、「3D プリンタとガラス」と聞いて最も多くの人々が思い浮かべるのは以下の研究であろう。Neri Oxman 率いる MIT の Mediated Matter Lab は、ガラス用 3D プリンタ「G3DP」「G3DP2」を立て続けに開発した[15]。最新のプリンタには 3 種の熱制御システムと 4 軸のコントロールシステムが用いられている。Mediated Matter Lab は 3 メートルの高さに積み上げたガラスの柱をミラノデザインウィーク 2017 に出展し、注目を浴びた。他の手法と比較し大きな出力物を作ることが可能な一方、高温の炉を備えなくてはならない点、また（発表されているものから推測しておそらく）花瓶形状のものしか出力できない点がネックである。

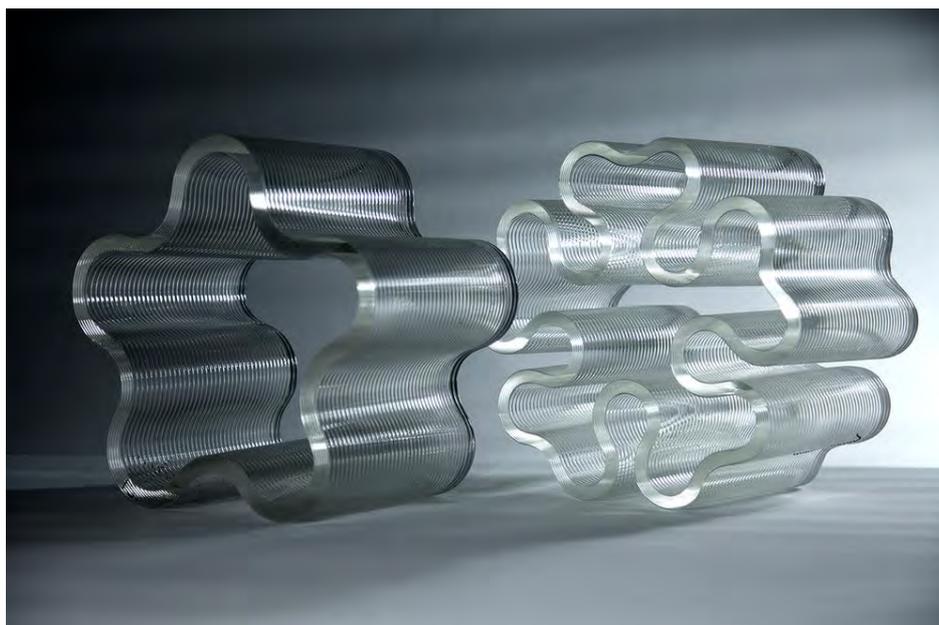


図 12 MIT の研究 出典：mediatedmattergroup.com

最新の主だった発表は、ETH によるものだ。写真は、紫外線で硬化するレジンを用いて作られた（つまり光造形法のプリンタによる）多孔質なガラスである[16]。硬化させる際の光の強弱により穴の大きさをコントロールしている。2020年1月現在は指でつまめる程度の大きさしか造形できないようだが、既存の研究の中では最も細かで複雑な形状のガラスを得ることができる。

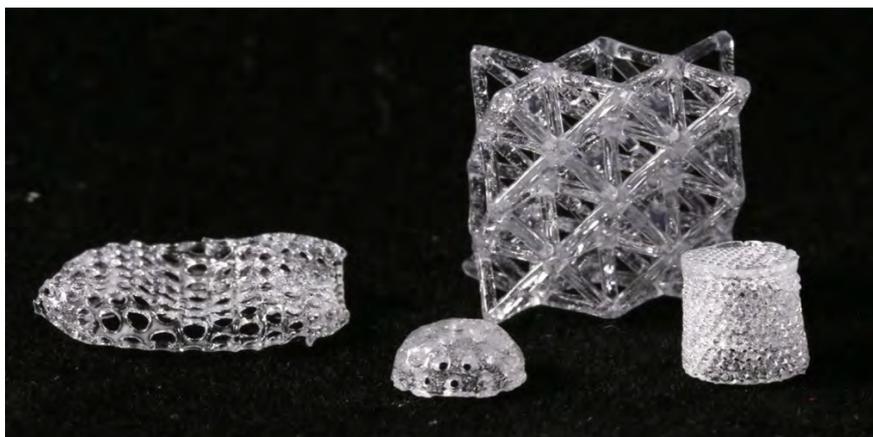


図 13 ETH の研究 出典：ethz.ch

ETH の研究に類似したもので、KIT の NeptunLab が行なっている研究がある。こちらも光造形のプリントである [17] [18]。ETH と同様、出力後に熱を加えて硬化させる。ガラスの粉末と液体のポリマーを混合し出力している。他の手法よりも機材が一般的であることが強みだが、こちらも上記の手法同様に、最大出力サイズと硬化後の熱による歪みを課題とする。



図 14 KIT の研究 出典：kit.edu

他にも、アメリカ合衆国エネルギー省（DOE）の Lawrence Livermore National Laboratory が開発した手法がある[19]。こちらは、シリカの粒を含むフィラメントを用いたダイレクトインクライティング(DIW)式のプリントである。光造形とは異なり材料を直接プリントできること、また、ガラスを溶融するプロセスを踏まないため残留応力やクラックの問題がない点が強みである。



図 15 LLNL の研究 出典：llnl.gov

少し変わり種のガラスプリンティングに、カナダのラヴァル大学内、COPL が開発したカルコゲナイドガラスの FDM プリンタが存在する[20]。カルコゲナイドガラスとは赤外線の高い率で透過するガラスで、半導体や光ファイバーなどがその代表的な使用用途である。カルコゲナイドガラスは広く一般的に思い浮かべられるガラスとは異なり、200 度後半～300 度前半で軟化する特殊な性質を持つため、FDM でのプリントを可能とした。

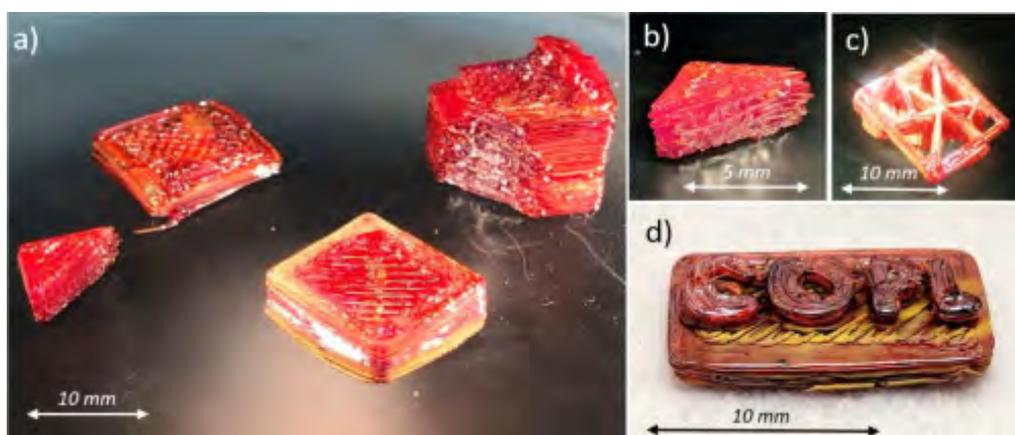


図 16 COPL の研究 出典：osapublishing.org

イスラエルに拠点を置くベンチャー企業「MICRON3DP」は FDM 方式のプリンタを開発している。造形物の最大サイズが 200mm 角と比較的大きい一方、透明度は低い。また、ガラス造形に成功したという最初のニュースは 2015 年、プリンタ自体販売を予定するニュースは 2016 年に公表された。しかし、2020 年現在 Web サイト更新が停止しており使用者の存在も確認できない。何らかの理由で（ここで議論しているような技術的理由ではない可能性も多分にあるが）開発が順調に進んでいないと考えられる。



図 17 MICRON3DP による出力サンプル 出典：idarts.co.jp

ここまで 3D プリント製のガラス研究について紹介してきた。素材の物性に由来する取り扱いの難しさから、ガラスを出力する方法の研究数は世界でもまだ多くはない。

FDM 式のプリンタで直接出力する方法は大きい出力物を得られるが、確認できる限りではベースモードのみの造形可能なようである。ノズルから押し出すことの可能なレベルまでガラスを熱しつつ複雑な造形を試みると、ガラスが垂れてしまうからだと考えられる。ガラスを直接出力可能であるという点は大きく評価されるべきだが、他方、ベースモード形状は既存のガラス造形方法でも得られる形状であり、3D プリンタ独自の形であるとは言えない。また、樹脂に粉を混ぜて出力後に焼結する方法や、上記以外の方法は、数ミリ～数十ミリ程度の小さいもののみ造形可能なようである。特に光造形と焼結を組み合わせた方法は、原理的に微細な気泡がガラス内に大量に発生するため自重の重い大型ガラス造形にはその脆さから不向きであること、造形物の容積よりも多くの材料を必要とする光造形プリンタと大型造形との相性が良くないことなどが欠点として想定される。

よって、空間エレメントスケールで 3D プリンタ特有の造形を持つガラスを得るには、現時点では既存のガラス造形方法を組み合わせた方法が妥当であると考えられる。例えば、複雑形状の型を使用したキャストイングなどがそれに該当する。しかし、3D プリンタを用いた複雑形状のキャストイングガラスに関する研究は類例がない。

加えて、出力されたガラス表現やその機能に関する議論は、出力方法の研究に輪をかけて進んでおらず、先行事例が全く見つからない。

本稿では、第三章にて「空間エレメントスケールで」「3D プリンタ特有の造形を持つ」「ガラス」という条件を全て満たす出力物を得るための方法を模索し、第四章にてそれを制作し、第五章にて表現や機能に関して分析を行う。

三章：方法

この章では、一連の制作手順と、制作物の実験方法について記述する。

基本の制作の手順

(ア) 日数の計算と確保

この制作方法は制作者が手を動かす時間こそ短いですが、小型のものでも 3 日、大型のものは半月ほどの待ち時間を要する。待ち時間とは、工作機械や窯や材料が、制作者の代わりに仕事をしている時間のことを意味する。よって、まずは以下の手順を眺めた上、余裕を持ったスケジューリングを行うことが必須である。

(イ) 外形の 3d モデリング

最終的な作品の外形を設計した。設計にあたり Rhinoceros や Fusion360 など一般的なモデリングソフトウェアを用いた。

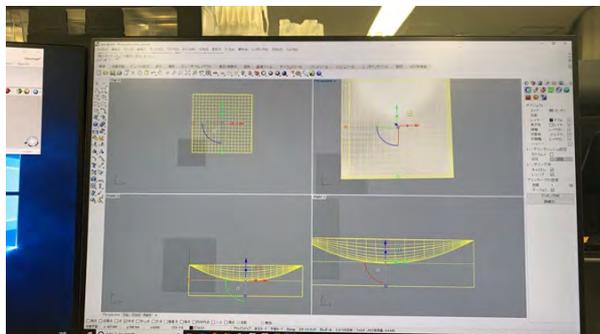


図 18 外形モデリングの様子

(ウ) 内部構造のモデリング

内部のモデリングを行なった。この時、Rhinoceros に代表されるメッシュやポリゴンを用いてモデリングするソフトウェアによりブーリアン編集をしても構わないが、データ容量が膨大になり、処理能力の高いコンピュータでないと実質的に計算不可能な場合が見られる。そういったケースでは、Voxel モデリングが可能、かつ、内部構造が編集できるソフトウェアを用いると良い。本稿では Monolith と Metasequoia を利用した。

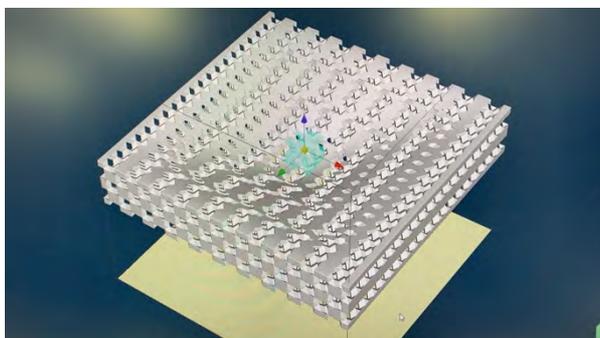


図 19 内部構造モデリングの様子

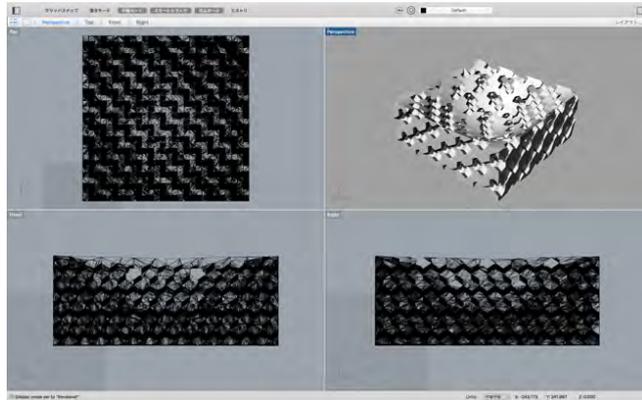


図 20 内部構造モデリングの様子

内部構造は Gyroid に代表される標準的なパターンを用いても構わないが、自分で設計することも可能である。



図 21 3D プリンタで出力した内部構造の 1 単位

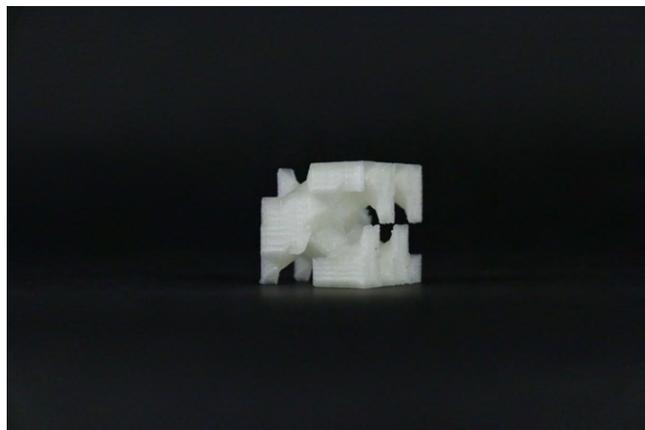


図 22 3D プリンタで出力した内部構造の 1 単位

内部構造の繰り返しパターンの様子を見るため小さいスケールでプレ出力を行なった。

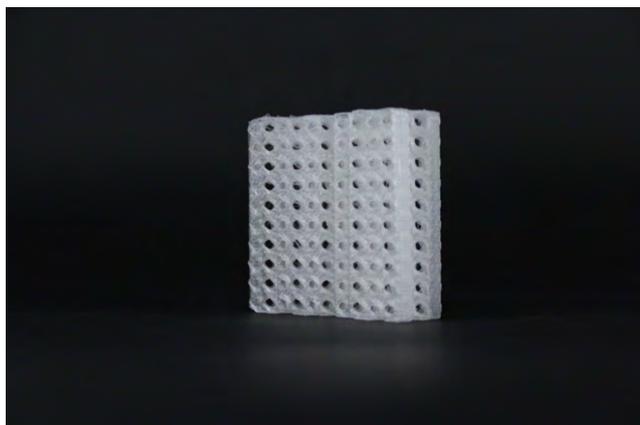


図 23 3D プリンタで出力した内部構造の検討モデル

(エ) STL データに変換

前述の Voxel モデリングを行なった場合もそうでない場合も，スライス（後述）のために必ず拡張子.stl のデータとしてエクスポートした。

(オ) データをスライス

3D プリンタに読み込ませるための Gcode を作るため，スライシングソフトを用い，STL データをスライスした。一般的なスライス用ソフトウェアであれば何でも差し支えないと思われる。本稿では Simplify3D を用いた。Gcode に問題がある場合はテキスト編集ソフトを用いて直接編集した。

(カ) 3d プリント

Gcode を 3D プリンタに接続したコンピュータで読み込み，印刷した。素材は PLA，もしくは Polymaker 製の PolyCast を使用した。



図 24 出力中の様子



図 25 出力された原型

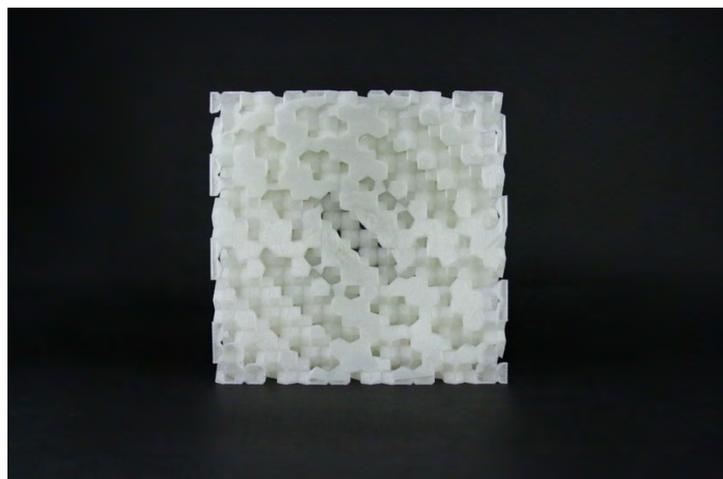


図 26 出力された原型

3D プリントできる素材は世の中に数多くあるが、主だったものを比較し、以下の選出基準によってこれらが採用された。

- 1.燃焼した際に発生する人体に有害なガスの量が少ないこと。特に、大型の制作を行う際には多量の燃焼ガスが発生するため、注意が必要である。
- 2.燃焼後の残滓が少ないこと。後述の型を洗う作業が容易になり、ガラスに不純物が混入するのを予め防止することができる。
- 3.850 度（温度については燃焼の手順にて後述）よりも低温で溶け気化すること。
- 4.燃焼した際の臭いがきつくないこと。（本稿では都会のオフィスビル内にて制作を行なったため、この点は重要であった）

なお、荒い積層ピッチで出力可能プリンタがある場合は、それを予め原寸モックアップ出力に用いると、短時間で大体の大きさを把握することが可能である。

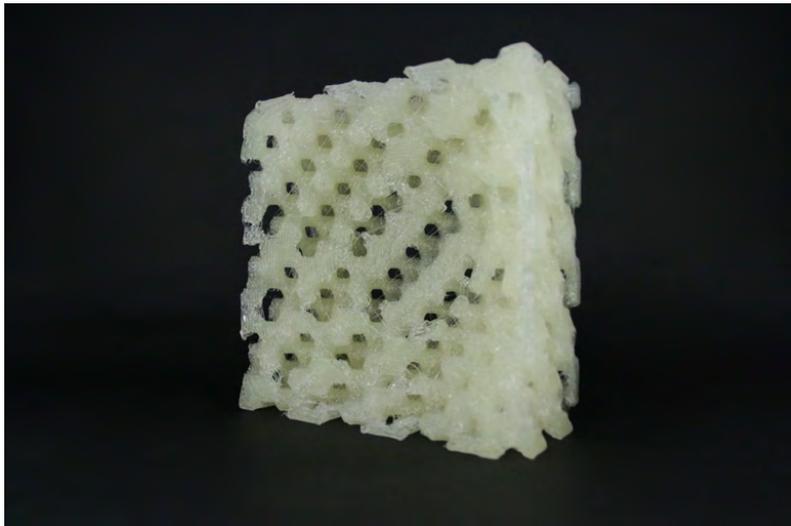


図 27 荒い積層ピッチで出力された確認用モデル



図 28 荒い積層ピッチで出力された確認用モデル

(キ) プリントのバリをとる

印刷終了後、出力ミスにより unnecessary 部分がある場合は、ニッパーで除去した。

(ク) 穴を埋める

印刷終了後、出力ミスにより小さな穴が空いてしまった場合は、プラスチック用のパテで穴を埋めた。この際、パテは上記の条件を満たす樹脂製のものが望ましい。

(ケ) 表面処理

平滑な表面を得たい場合は表面処理を行なった。特に PolyCast の場合は、IPA に浸し、よく風の通る場所にて乾かすことで、容易にスムーズな面を作ることが可能である。

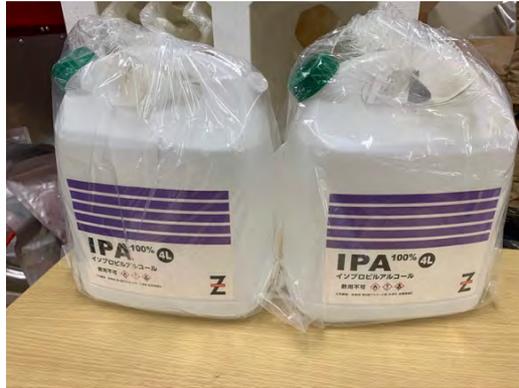


図 29 IPA. ネット通販などで容易に入手可能

(コ) 粘土で湯口を作成

ガラス屑（以下カレット）は見かけ上の体積が大きい。よって、出力物のみで石膏型を取った場合、溶融前にカレットを石膏型へ全て収めるのは困難である。そこで、石膏型上部にカレットを一時的に入れておくスペースが必要となる。これを「湯口」という。湯口の形状は最終成果物に大きな影響を及ぼさないので、油粘土などで簡単に作っても良い。湯口の高さは最終成果物の形状にもよるが、二分の一程度が望ましい。



図 30 粘土を敷き詰める



図 31 粘土を敷き詰める

(サ) 型枠の大きさを決定

出力物と粘土より一回り大きな型を用意し、石膏で型を取ることを考えた。具体的には、出力物よりも幅と奥行きが4cm程度、高さが2cmほど大きいと成功することが多かった。薄すぎる型は焼成中に割れ、厚すぎる型は乾燥に時間がかかった。

(シ) 型枠をカットする

レーザーカッターや Shopbot などのマシンを使うことも可能であるし、型枠が単純形状であればノコギリなど手で使う道具を用いてもよい。側面の素材は、木板もしくはアクリル板などが良いが、手で曲げるとギリギリしなる厚みのものが望ましい。離型の際に容易に外すことができるためである。なお、木板の長所は安価かつ加工が容易である点であり、アクリル板のそれは離型剤が不要である点である。また、底板は平滑な木版、アクリル板、粘土板などが望ましく、側面の素材よりも薄くて構わない。本稿では側面に9mmのベニヤ板もしくは5mmのアクリル版（作品による）、底板に3mm以上の適当なベニヤ板を用いた。底面が長方形でない型は後述の補助ベルトを効果的に使うことができないので、型を止める治具もカットしておく。



図 32 治具を用いた木枠の例

(ス) 型枠を組み立てる

ガムテープと補助ベルトを用いて、型を固定した。また、次のステップで万が一型枠が決壊したときのために、キッチンペーパーと余分な油粘土を用意した。



図 33 補助ベルト

側板を長めにカットしておくとも再利用が可能である。

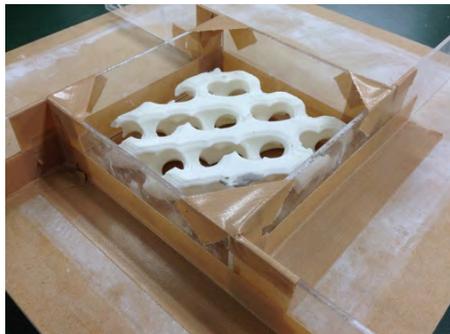


図 34 アクリルとガムテープで作った枠

一つの板で複数の型を制作しても良い。



図 35 一度に型を取るための枠

(セ) 型に離型剤を塗る

木版など平滑でない素材を型枠に用いた場合は、型枠に離型剤を塗ることで脱型が容易になる。離型剤はカリ石鹼もしくはワセリンを用いると良い。

石膏と水の重さを測る

石膏と水の重さを計算し、計りで計量した。

(ソ) 石膏で型をとる

石膏と水を混ぜ、型に流し込んだ。



図 36 原型を型に入れる



図 37 石膏を流したあと

小型のものを制作する場合は製菓用のゴムベラで混ぜると良い。石膏を 10kg 以上使用する大型制作の場合は攪拌機を使うと良い。



図 38 攪拌機は大きめのホームセンターで入手可能（店内にて許可を貰い撮影）

(タ) 石膏が乾くまで待つ

60 分程度放置し、水和反応による発熱が完全に収まるまで待った。

(チ) 脱型

石膏を傷つけないよう十分に注意し型枠を外した。湯口の粘土も、割り箸などを用いて石膏から掘り出し取り除いた。

(ツ) 石膏の余分な部分を削る

石膏は角をぶついたり角から落下したりすると、ヒビが入ることがある。予め荒い紙やすりで角の部分を丸く削り、意図しないクラックを防止した。

(テ) 石膏を乾燥する

石膏を十分に乾かした。この時、室温でも特に問題はないが、摂氏 55 度程度を保つことが可能な場合は、温度を上げた環境の方が早く乾燥するので望ましい。ただし、60 度を超えると石膏にヒビが入るので気をつける必要がある。本稿では、自動温度調整機能のついた電気炉で乾燥した。

(ト) 樹脂を燃やす

換気に十分注意し、850 度で樹脂の燃焼を行なった。耐火石膏の耐えられる温度が 850 度付近であること、850 度以上の燃焼でダイオキシンの発生を抑制できることから、この温度が望ましい。なお、850 度まで急速加熱すると石膏にヒビが入る可能性があるため、窯の自動温度調節機能を用いて徐々に温度を上げた。温度設定は原型に使用した樹脂の総量にもよるが、概ね次の通りである。

- 1.60 度から 150 度まで窯の能力の限り急速加熱する。
- 2.150 度を 1 時間維持する。
- 3.150 度から 220 度まで窯の能力の限り急速加熱する。
- 4.220 度を 1 時間維持する。
- 5.220 度から 850 度まで 2 時間かけて温度が上がるよう加熱する。
- 6.850 度を 1 時間維持する。

(ナ) 冷ます

自然に石膏が冷えるまで 1~2 日ほど放置した。冷却時間は石膏の大きさや形状に依存する。

(ニ) 型の中を洗う

窯から石膏を取り出し、エアを吹き付けて内部の残滓を吹き飛ばした。型が丈夫な場合は樹脂が入っていた部分に水を入れ、中の残滓や石膏の破片を十分に洗い流すことも可能である。

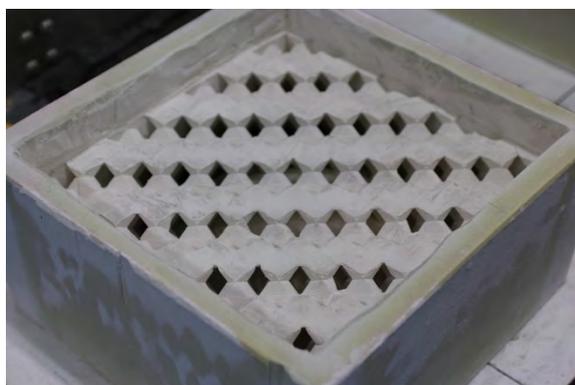


図 39 多孔質形状になった石膏



図 40 よく見ると積層痕が確認できる

(ヌ) ガラスの重さを計算する

ガラスの容積に比重をかけ、必要最低限のガラス重量を算出した。容積はデジタルデータを計測したものとアナログで測ったもののうち、大きい方を採用した。デジタル計測には、Rhinoceros の Volume コマンドを使用した。アナログ計測は、はかりの上に十分湿らせた石膏を置き、満水になるまで空隙に水を入れ増えた重量を見る方法を取った。ガラスの比重はどのカレットを使用するかによって異なるため、販売店に尋ねるなどして調べた。

(ネ) ガラスを入れて焼く

湯口の部分に計量したカレットを入れ、窯で焼成した。適切な加熱時間と温度は作品の大きさ、形状、用いたカレットの種類、窯詰め個数などによって全く異なるため後述する。



図 41 窯詰め

焼成中に中を確認しても良いが、大変熱いので注意が必要である。耐火手袋を使用する。繊維の服を着てはいけない。ガラスの光を長時間見つめてはいけない。



図 42 焼成中の様子

(ノ) 冷ます

窯内部の温度が室温程度になるまで十分に放置し、自然徐冷した。

(ハ) 石膏を壊す

ガラスを傷つけないよう注意しながら、冷めた石膏の周辺をゴムハンマーで叩き、大きな石膏のかけらを取り除いた。

崩した石膏には積層痕が見られた。



図 43 焼成後も積層痕の残る石膏の欠けら

(ヒ) 石膏溶解液につける

石膏溶解液にガラスを浸け置きし、細かい石膏を取り除いた。なお、石膏溶解液とは歯型をとる時に使用されることの多い液体であり、歯のように入り組んだ形状の隙間に詰まった石膏を溶かしだす効果をもつ。

(フ) ガラスのバリをとる

ルーターを使って、ガラスのいらぬ部分を取り除いた。ガラスに積層痕が転写されていることが見て取れた。



図 44 バリに転写されている積層痕

(へ) ガラスを磨く

必要であれば、艶出しをしたい部分に対し金剛砂ややすりを用いて研磨を行なった。



図 45 ガラス用のヤスリ (ガラス教室にて許可を貰い撮影)

機械を使用することのできる環境であればそれを使うのが好ましい。

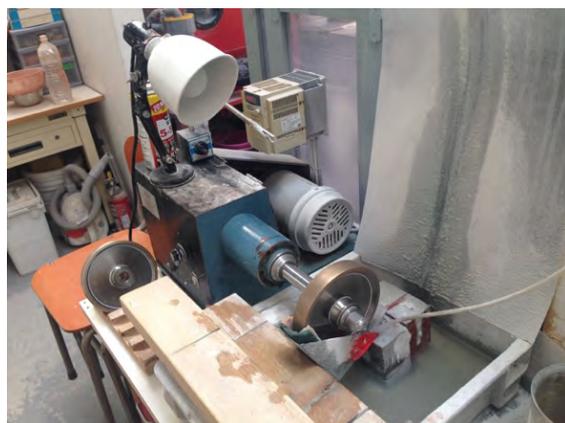


図 46 自動でヤスリ部分が動くガラス研磨用の機械 (ガラス教室にて許可を貰い撮影)

(ホ) 完成

各制作の相違点について

制作物のパラメータ（焼成の最高温度やそのキープ時間など）や、特に気をつけたことなど、前述の手順には書かれていない相違点を記す。文頭に振られている番号は、五章の冒頭に記述されている一覧表と対応している。なお、これらを別の環境で再現する際には、窯の中の位置や窯自体の大きさなどにより、多少の数値のズレが生じると推測される。

1：800度で60分焼成

2～5：820度で30分焼成

6：左は800度で30分焼成。右は850度で30分焼成

7,8：820度で60分焼成

9：830度で60分焼成

10,11：5%を目安に金油で希釈したラスター液を定着させる目的で530度で10分焼成

12：表面加飾に関しては外部機関へ依頼した参考作のため詳細なパラメータは不明。ディップコーティングによりチタニアという金属酸化物を数百ナノオーダーの薄膜にして定着

13：インフィル100%で出力した30mmのスタンフォードバニーを使用

14,15：0.5mm以下のガラス粉末を使用

16～18：後述

19～21：原型はCNCで作成。850度で60分焼成

22～24：原型はCNCで作成。850度で60分焼成。枠にアルミ製コの字パーツを使用

25：850度で120分焼成

26：原型は粘土で制作。焼成に関しては外部へ依頼したため詳細不明

27：820度で180分焼成

28：Monolithに初期インストールされたパターンのみを用いて制作

29：820度で30分焼成

30,31：850度で60分焼成

32：850度で120分焼成

33～43：市販のシーガラスとビー玉を粉砕機で粉状にしてカレットとして使用。830度で120分焼成

44～52：850度で120分焼成

53：850度で120分焼成。のちに、常温のガラスに対し接着剤を混ぜた珪砂を用いた

54：0.5mm以下のガラス粉末を使用。830度で120分焼成。

55～60：850度で180分焼成

61：市販の板ガラスを粉砕機で粉状にしてカレットとして使用。850度で200分焼成

62：860度で240分焼成

63：62で制作した内部構造パターンと同一

竹中工務店との共同研究－光の実験

竹中工務店の全面協力のもと、制作した建築用ブロックの光の拡散度合いを測定した。下図のように、二枚の黒い板に試験体サイズの穴をあけ、穴の部分に試験体を設置した。光源を奥と底面、障子紙の露光面を手前に設置した。障子紙をデジタルカメラで撮影し、画像の明度の分布をグラフに記述した。試験体は複数用いられ、各試験体のグラフが比較された。



図 47 装置と実験の様子（竹中工務店技術研究所にて撮影）

改良点

- ・絞り
- ・シャッタースピード
- ・ISO
- ・EV を固定

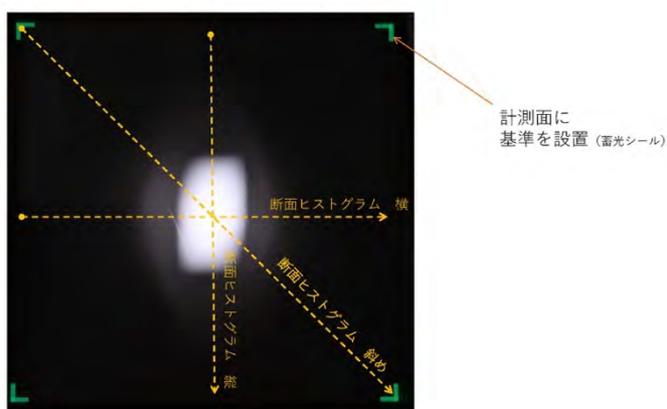


図 48 計測面の様子（竹中工務店技術研究所にて撮影）

屋外での植物の実験

多孔質ブロックの穴を植物が通過できるかを確認するため、下図のように屋外にて実験を行なった。

ベニヤ板の箱を用意し、箱の中にヘデラと多孔質ブロックを設置した。多孔質ブロック上面のベニヤ板はブロックと同じ大きさに切り抜かれており、ヘデラの葉にはブロックを通じて日光と雨が到達する。蔓の先端を多孔質ブロックの穴の入り口に固定し、蔓が箱の外へ向かって伸びるのかを検証した。

似たような成長度合いの株を比較対象として箱のすぐ上に設置した。枯れてしまった場合に箱内部のみの環境によるものか、箱を設置した屋外環境によるものかを見極められるようにした。



図 49 箱の内部（側面の板を一時的に外して撮影）



図 50 屋外に設置された様子

竹中工務店との共同研究－長期の実証実験

竹中工務店の全面協力のもと、屋外に樹脂製の環境呼応エレメントを設置する実証実験を行なった。東京都渋谷区に存在するエコカーのショールームの壁面を設置環境とした。このショールーム外壁には元から菱形の穴が多く開けられており、そこへ樹脂製のエレメントを取り付けて雨風に晒した。2020年1月現在、取り付けから10ヶ月が経過した。なおこの実験は七章で詳しく記述している通り、複数人による環境呼応エレメントの制作および実験のプロジェクトである。



図 51 ショールーム外観（ショールーム敷地周辺から許可を貰い撮影）



図 52 取り付け後の様子（ショールーム敷地周辺から許可を貰い撮影）

四章：結果

この章では，第三章の手順によって得られた作品そのものと，
実験結果について写真をメインに記載する．

ここでは一見し起きているとわかる現象や結果のみを簡単に取り扱い，結果の分類や分析といった考察は後ろの章に譲る。

掲載の順は大まかには制作した時系列だが，関連したものの繋がりを理解しやすくするため，一部の順番が前後している。

実験：市販の瓶を焼成した．立体感が失われ平らになり，また表面の文字が残ることが確認できた．



図 53 完成した制作物



図 54 完成した制作物

実験：市販の瓶のガラスを複数用意し、同じ温度・時間で溶かし、溶け具合の様子を見た。
ガラスごとに形状変化が異なることが見てとれた。



図 55 完成した制作物



図 56 完成した制作物



図 57 完成した制作物



図 58 完成した制作物

実験：市販の瓶のガラスを複数重ね、高温で溶かした。溶けにくいガラスであっても高温で溶かすことにより一つの雫状にすることが可能であると判明した。

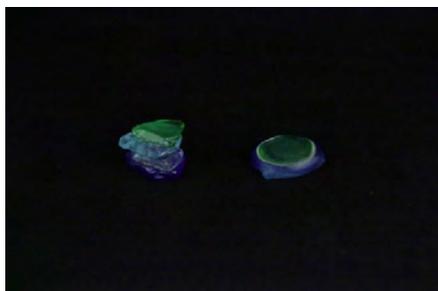


図 59 完成した制作物

実験：ガラスのカレットを熱して接着した。低温で接着することにより、粒感が残る一方で、型の細かな形状は転写されないことが見て取れた。



図 60 完成した制作物



図 61 完成した制作物



図 62 完成した制作物

実験：無色透明のガラスに虹色のラスター液を塗り焼成した。(写真に収めるのが困難だが、)シャボン玉のような光の干渉効果が肉眼で確認できた。



図 63 完成した制作物

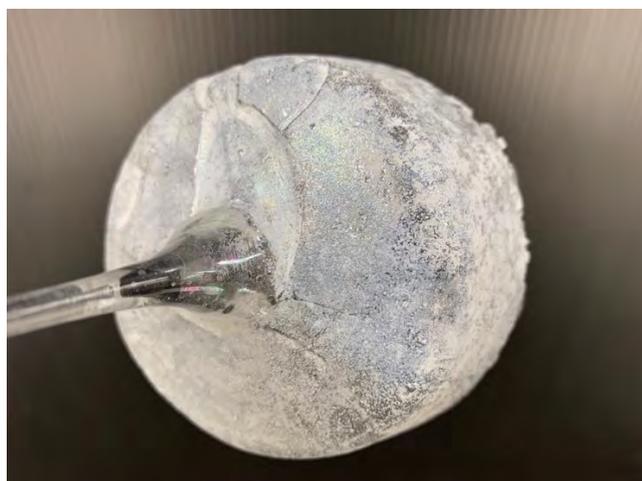


図 64 完成した制作物

実験：多孔質ガラスにディップコーティングで金属の薄膜をつけた。こちらも上記と同様に、虹色の干渉効果が確認できた。



図 65 完成した制作物

実験：スタンフォードバニーを PVA で出力し石膏で型を取った。インフィルが 100 パーセントのものを使用したため、給水した PVA に石膏が内側から圧迫され割れた。



図 66 PVA の原型



図 67 水で原型を溶かしている様子

実験：光造形の液体にガラスの粉を混ぜて出力した。本来であれば高さのある造形物なのだが、出力中にガラスの粉が下へ沈み、造形不可能であった。



図 68 完成した制作物



図 69 完成した制作物

実験：樹脂ブロックが光にもたらし様子を計測した。何も無い状態と比較して、グラフのカーブがなだらかになっており、光が拡散していることが伺えた。



図 70 実験の結果

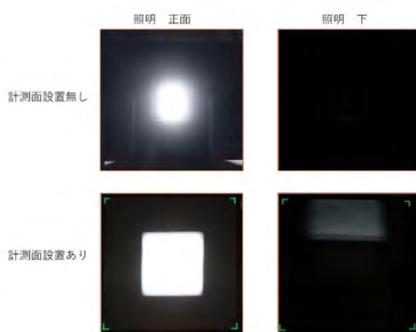
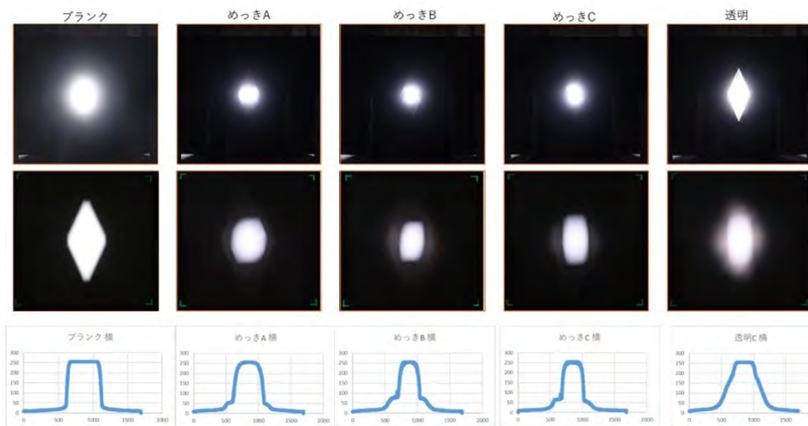


図 71 実験の結果



同様の形状→表面状態や材料によって光の広がり、収束の仕方が異なることがわかる

図 72 実験の結果

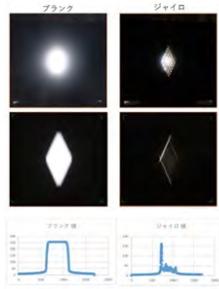


図 73 実験の結果

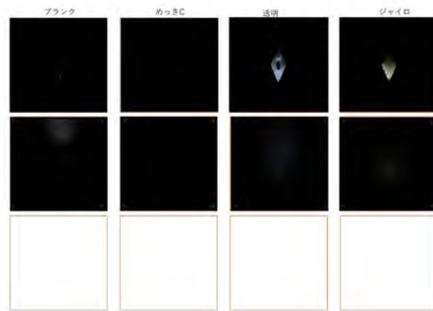


図 74 実験の結果

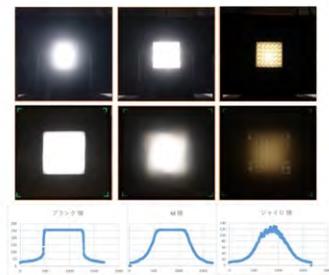


図 75 実験の結果

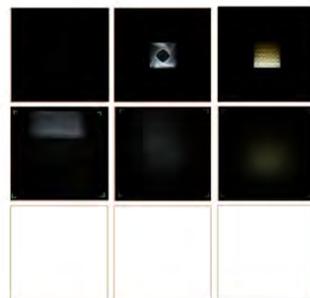


図 76 実験の結果

実験：Gyroid ブロックに葛を絡ませた。実験開始時はブロックの下部にあった先端が，上から確認できるまで移動した。（その後，冬季になり葉の色が変色した）



図 77 実験の結果

実験：Gyroid ブロックを建築へ長期間取り付けた。屋外での長期設置には向かないと一般に言われている PLA 樹脂だが，執筆時で少なくとも 10 ヶ月の設置に耐えている。また，一見汚れやすそうな形状であるにも関わらず，汚れ方が少ないことが判明した。



図 78 実験の様子



図 79 実験の様子

習作：波の模様を小さな板ガラスに転写した。デフォルメされた波のデータと、写実的な波のデータを使用した。光の屈折により本物の水面の影に近い濃淡を確認できた。



図 80 完成した制作物

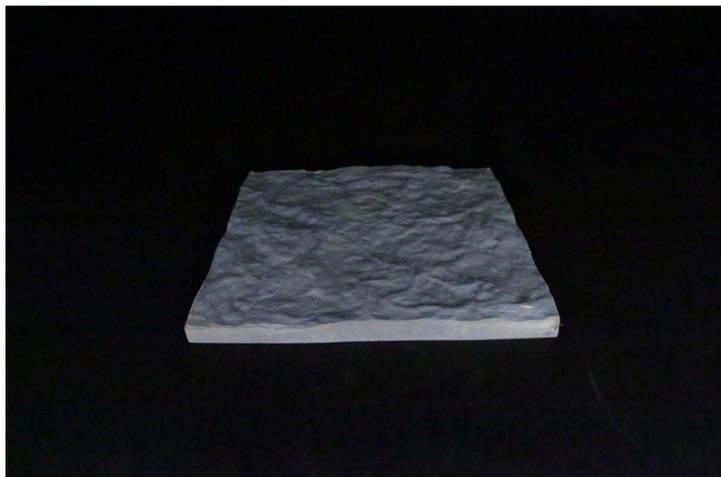


図 81 原型



図 82 完成した制作物

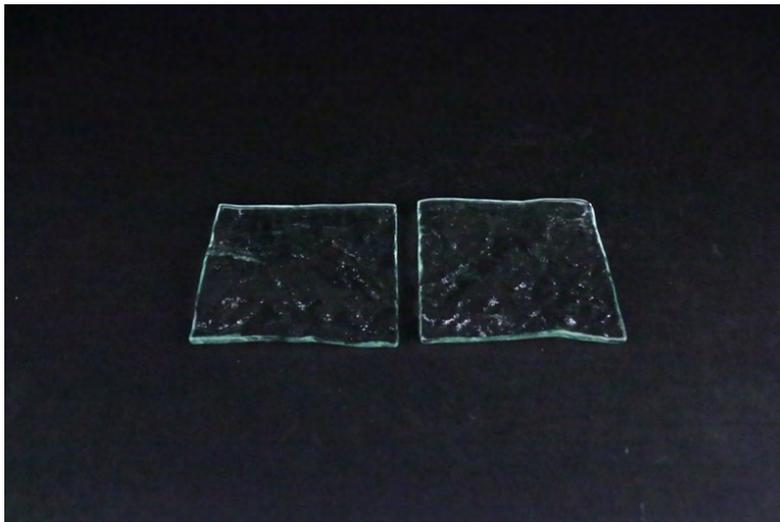


図 83 完成した制作物

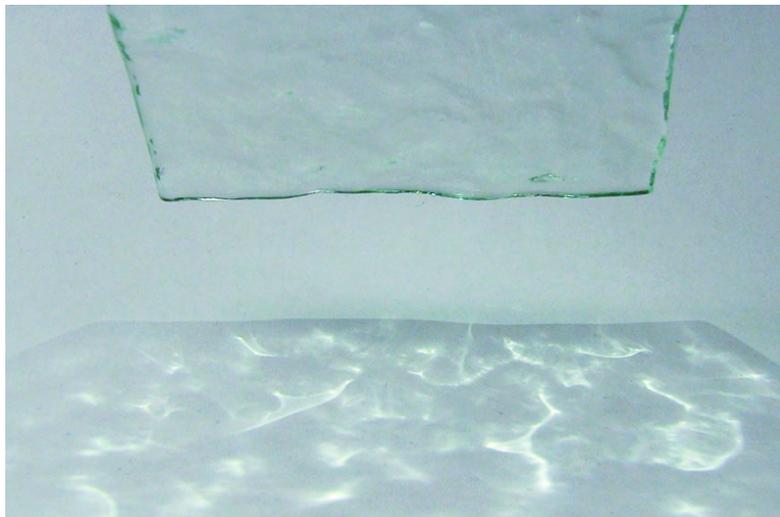


図 84 完成した制作物

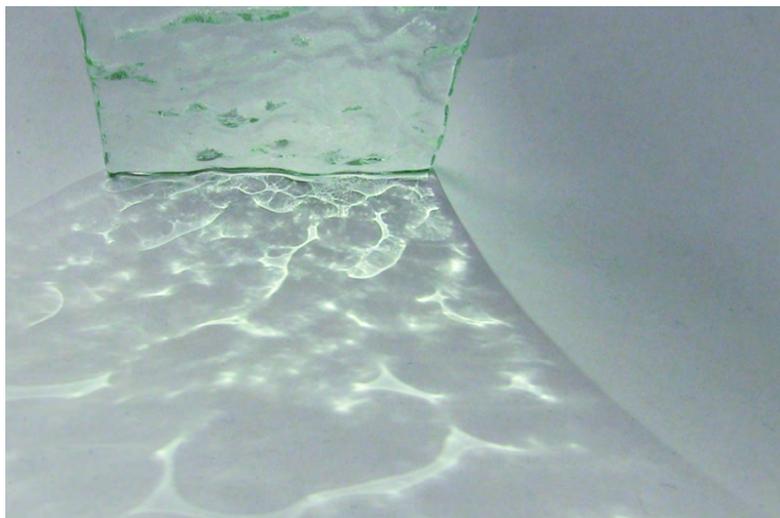


図 85 完成した制作物

習作：波の模様を大きな板ガラスに転写し、アルミの枠をつけた。板厚を一定にし、かつ模様を拡大縮小すると、大きい模様ほど影がくっきりと出ることが確認できた。

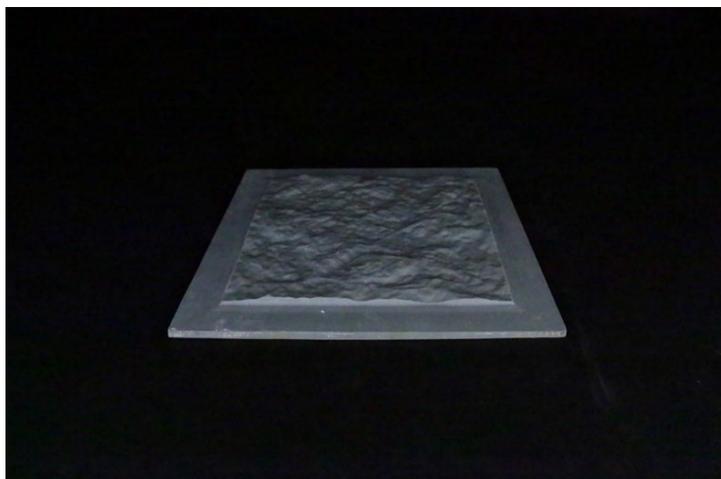


図 86 原型



図 87 原型

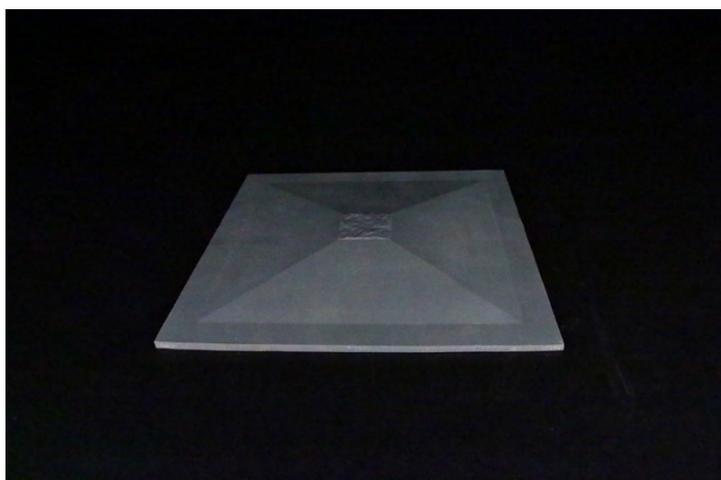


図 88 原型

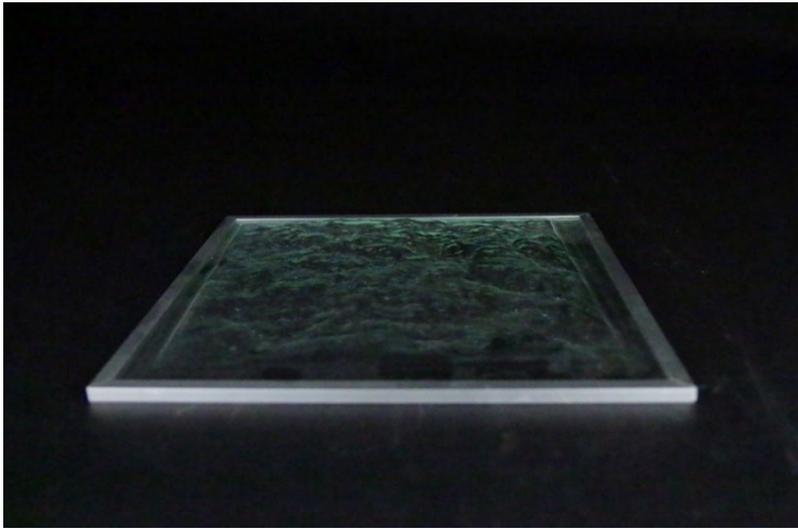


図 89 完成した制作物

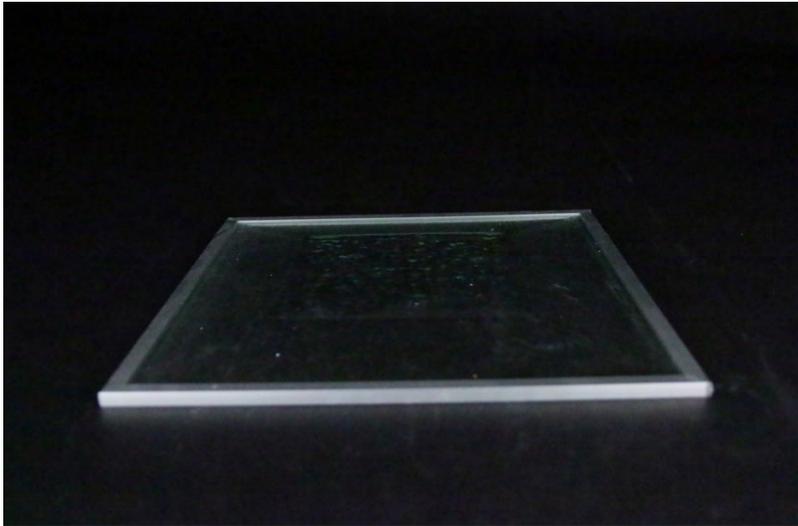


図 90 完成した制作物

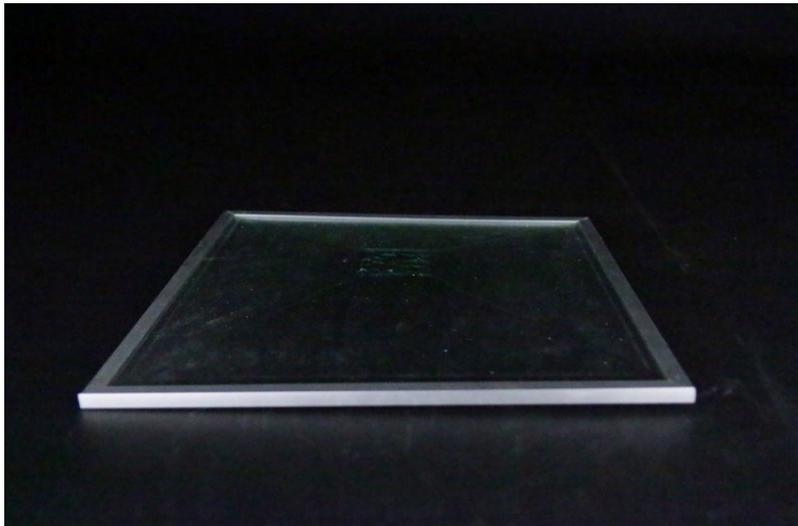


図 91 完成した制作物

習作：スタンフォードバニーを焼成した。圧力をかけずにガラスの自重のみでキャストしたため、耳の先端のように細く奥まった部分は再現されないことが判明した。



図 92 原型



図 93 完成した制作物

習作：三角形の皿を二種類のカレットで焼成した。ガラスは液体になっても人為的に力を入れなければ完全に混ざることはなく、黄色と灰色の部分がグラデーションになることが確認できた。

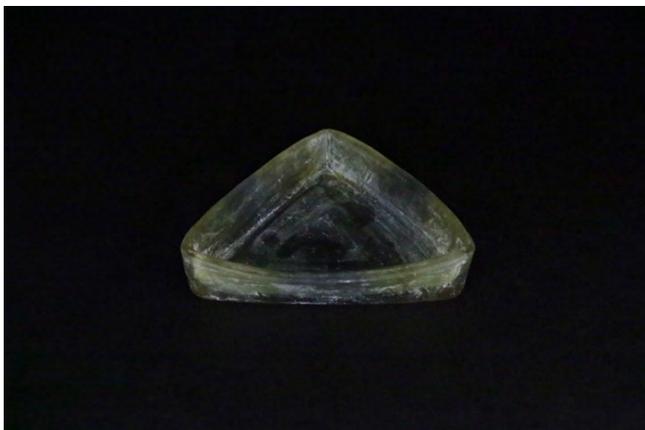


図 94 完成した制作物

習作：泡, 凹凸, 積層痕で幾何学模様をガラスに焼成した. 光に透かすとそれぞれの要素が陰影を作ることが確認できた.



図 95 完成した制作物



図 96 完成した制作物



図 97 完成した制作物

習作：様々な内部構造のパターンをマッピングした。あくまで直感的な印象による配置だが、法則性のようなものがあることが確認できた。

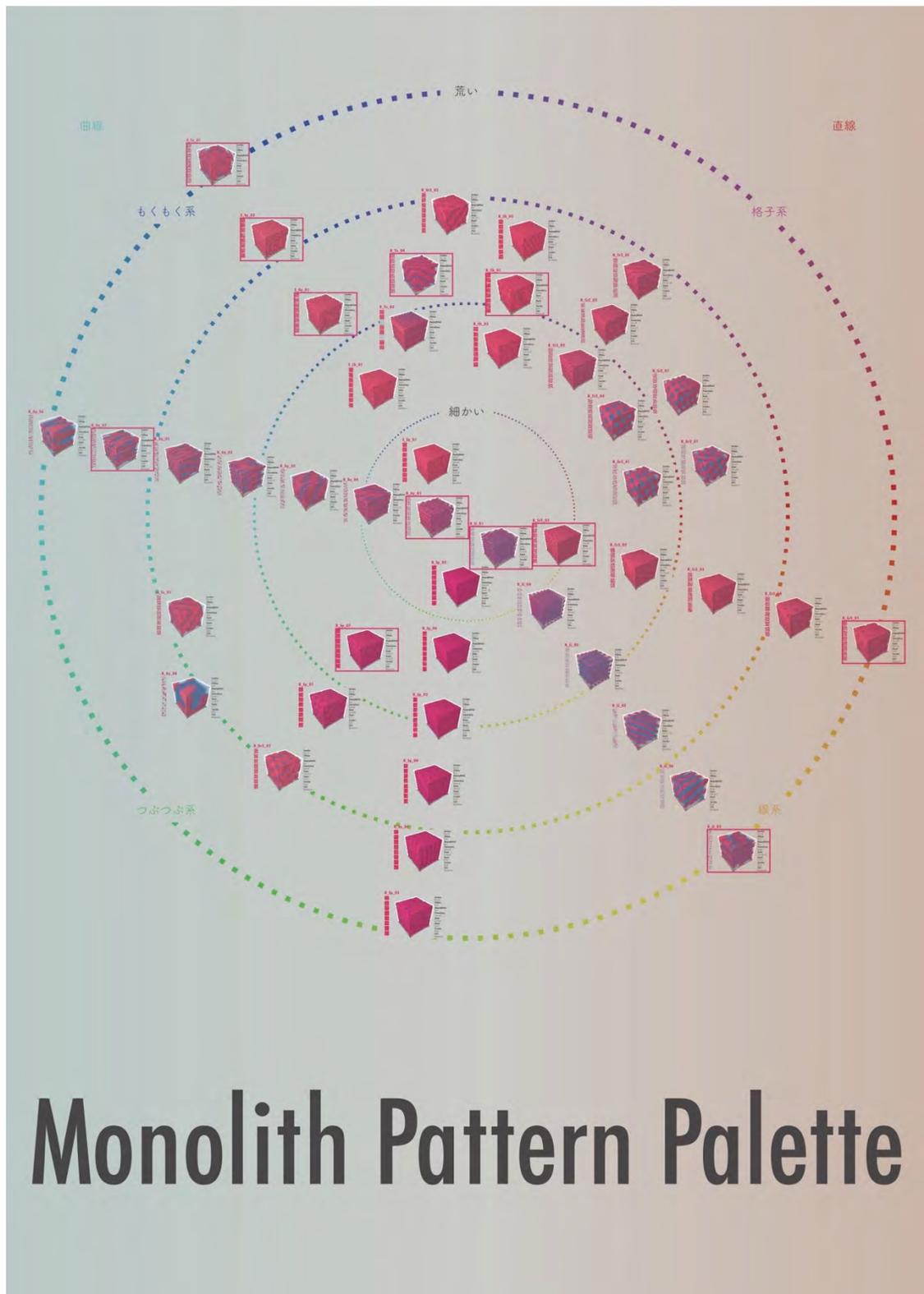


図 98 完成した制作物

習作：多孔質形状が環境に呼応するダイアグラムを描写した。これにより今後の制作の方向性が決定された。

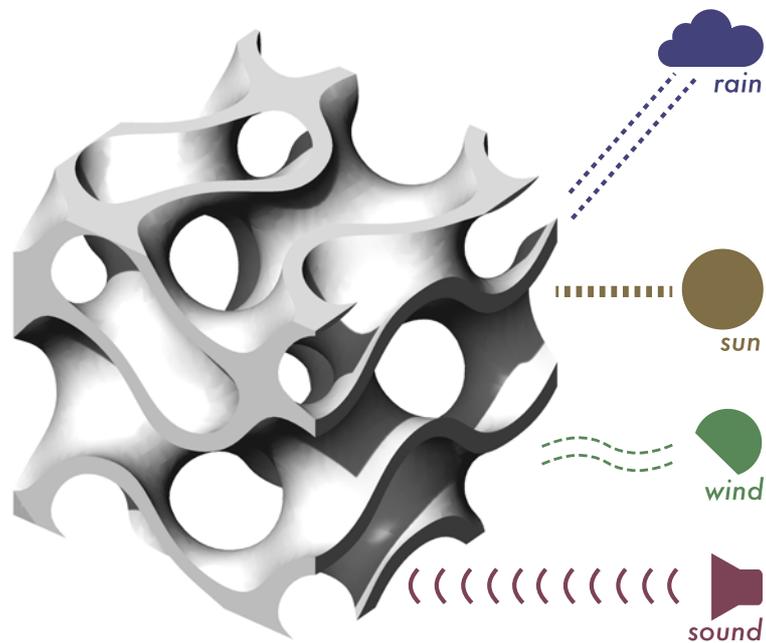


図 99 完成した制作物

生態系との共存



図 100 完成した制作物

習作：単純な多孔質形状を，粒感を残して焼成した．Gyroid のシェルのみの形状はその薄さも相まって脆そうな見た目になることが確認できた．



図 101 完成した制作物



図 102 完成した制作物

習作：Gyroid を円形に配置し，粒ガラスで焼成した．窯の中で温度にムラがあったためか，偶然にも粒感の残る部分と残らない部分が一つのガラス内で生成された．



図 103 完成した制作物



図 104 完成した制作物

習作：様々なガラスを砕いて多孔質ガラスへ焼き直した。溶ける温度と比重の違いにより、同じ型の形状でも異なるガラスを得られることが確認できた。



図 105 完成した制作物



図 106 完成した制作物

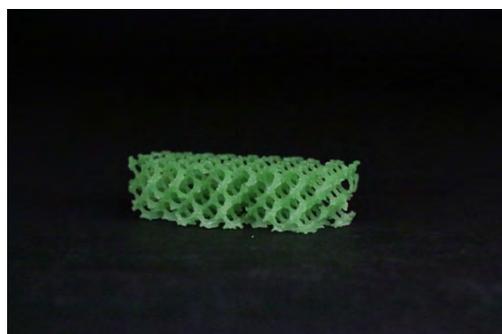


図 107 完成した制作物



図 108 完成した制作物



図 109 完成した制作物



図 110 完成した制作物



図 111 完成した制作物



図 112 完成した制作物



図 113 完成した制作物



図 114 完成した制作物



図 115 完成した制作物

習作：同じ形状の Gyroid を複数焼成した。異なるガラスカレットを使用すると結果が異なるのはもちろん、同じものでも窯の中での位置や詰め方の微妙な差により形状へ差が出ることが確認できた。



図 116 原型



図 117 原型に表面処理をおこなったもの



図 118 テクスチャの比較



図 119 完成した制作物



図 120 完成した制作物



図 121 完成した制作物



図 122 完成した制作物

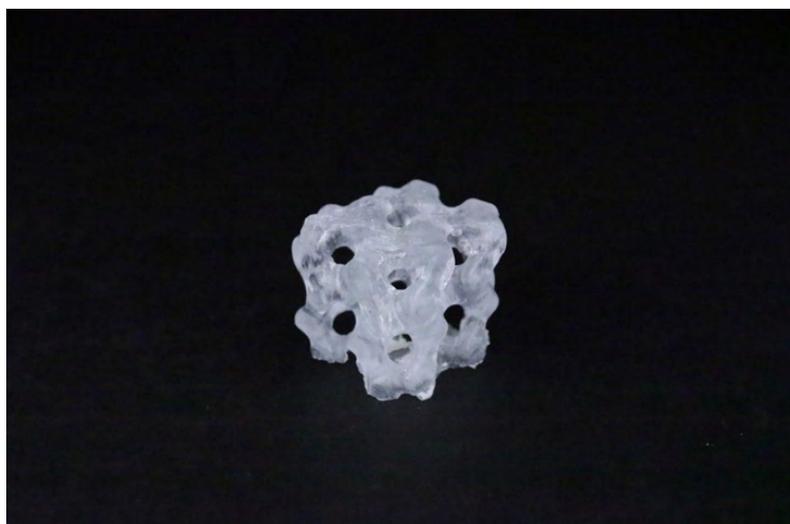


図 123 完成した制作物



図 124 完成した制作物

習作：一つ前の習作と同じ Gyroid 形状を用いて、イソギンチャクのような形状のガラスを焼成した。オーバーレッセントグラス特有の粘りにより独特の形状になると確認できた。



図 125 完成した制作物

習作：ダブル Gyroid 構造のガラスを焼成した。二つの Gyroid が知恵の輪のように絡み合っていて取れないことがこの構造の特徴だが、ガラスでもそれを再現可能なことが確認できた。



図 126 完成した制作物



図 127 完成した制作物

習作：珪砂とガラスの中間物を焼成した。珪砂はガラスの主原料である。原料の自然物と人工物とを複雑に絡まり合わせ、独特の印象を与えることが可能であると確認できた。



図 128 完成した制作物



図 129 完成した制作物



図 130 完成した制作物

習作：氷のようなガラスを焼成した。細かなガラスの粉を用いることで、白いガラスを使用せずとも泡の反射により白く見せられることが確認できた。



図 131 完成した制作物

習作：樹脂と二種類のガラスを用いて、4個の花瓶を作成した。オパールレスセントガラスが特定の厚みになった部分では、光の干渉により白色光をオレンジ色に変化させていることが確認できた。

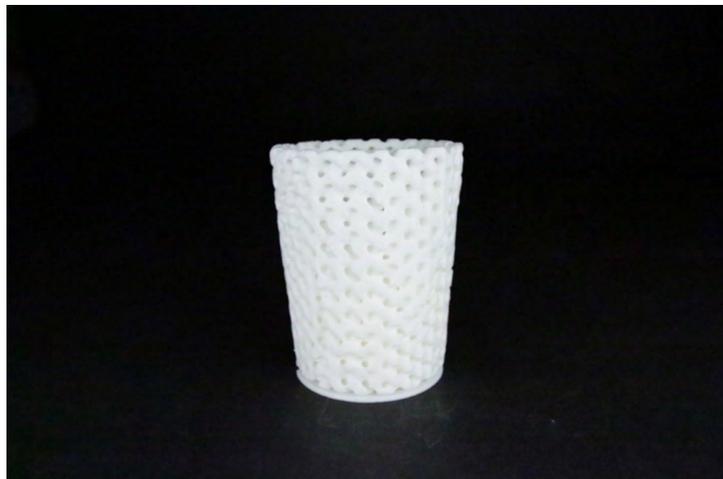


図 132 形状検討モデル



図 133 完成した制作物



図 134 完成した制作物



図 135 完成した制作物



図 136 完成した制作物

習作：イソギンチャクのようなガラスを焼成した。ガラスが奥まで流れ込むが型肌には沿わない穴の形状をデザインした。菱形の尖っている部分はガラスの流れ込みが少ないので、高さが低くなることが確認できた。



図 137 完成した制作物



図 138 完成した制作物

習作：ガラスの溶ける温度の違いを利用した二つの彫刻を制作した。同じ形状の型を用いて、最も型肌に沿うクリスタルガラスと、最も沿わないオパールレスセントガラスの物性の差を可視化した。



図 139 完成した制作物



図 140 完成した制作物

習作：板ガラスを粉碎し、大型の多孔質形状のガラスを焼成した。板ガラスの粘度の高さにより、型肌に沿わない部分が多く見られることが確認できた。

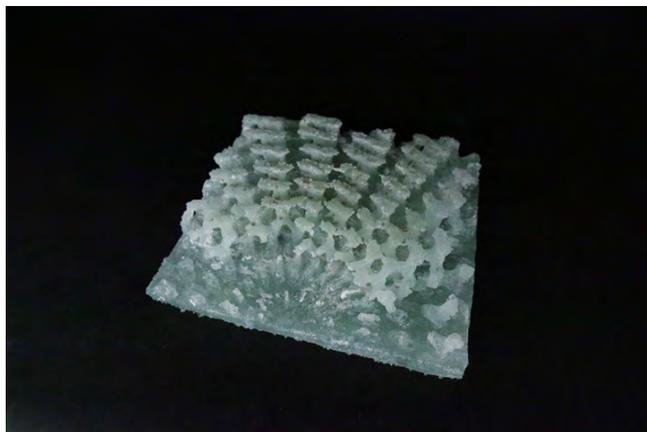


図 141 完成した制作物

制作：これまでに作った習作から得た経験を生かし、空間エレメントとして使用可能な大型の多孔質ガラスを内部構造から制作した。光／視線／植物の三要素に注目して設計した。全体の厚みと形状により雪の結晶のような幾何学的見え方をすることが確認できた。



図 142 完成した制作物



図 143 完成した制作物

また、上記のガラスのデザインを用いながら、銀座にパビリオンを設計した。壁や天井など空間を仕切ることを目的としたエレメントを逆さにし、器の形状を採用することで、「切断しない境界」という多孔質ガラスの特性を強調した。銀座の交差点を行き交う人々の様子を、ガラスの小さな穴を通した映像の断片によって窺い知ることが可能である。



図 144 完成した制作物



図 145 完成した制作物



図 146 完成した制作物 背景は Google Earth を元に作成



外部と内部を隔てる境界

切断しない境界

図 147 完成した制作物

五章：考察

この章では，四章にて紹介した制作・実験の分析を行う．

はじめに、議論しやすいよう全ての作品に番号を振った。
 以下の写真リストがそれに当たる。

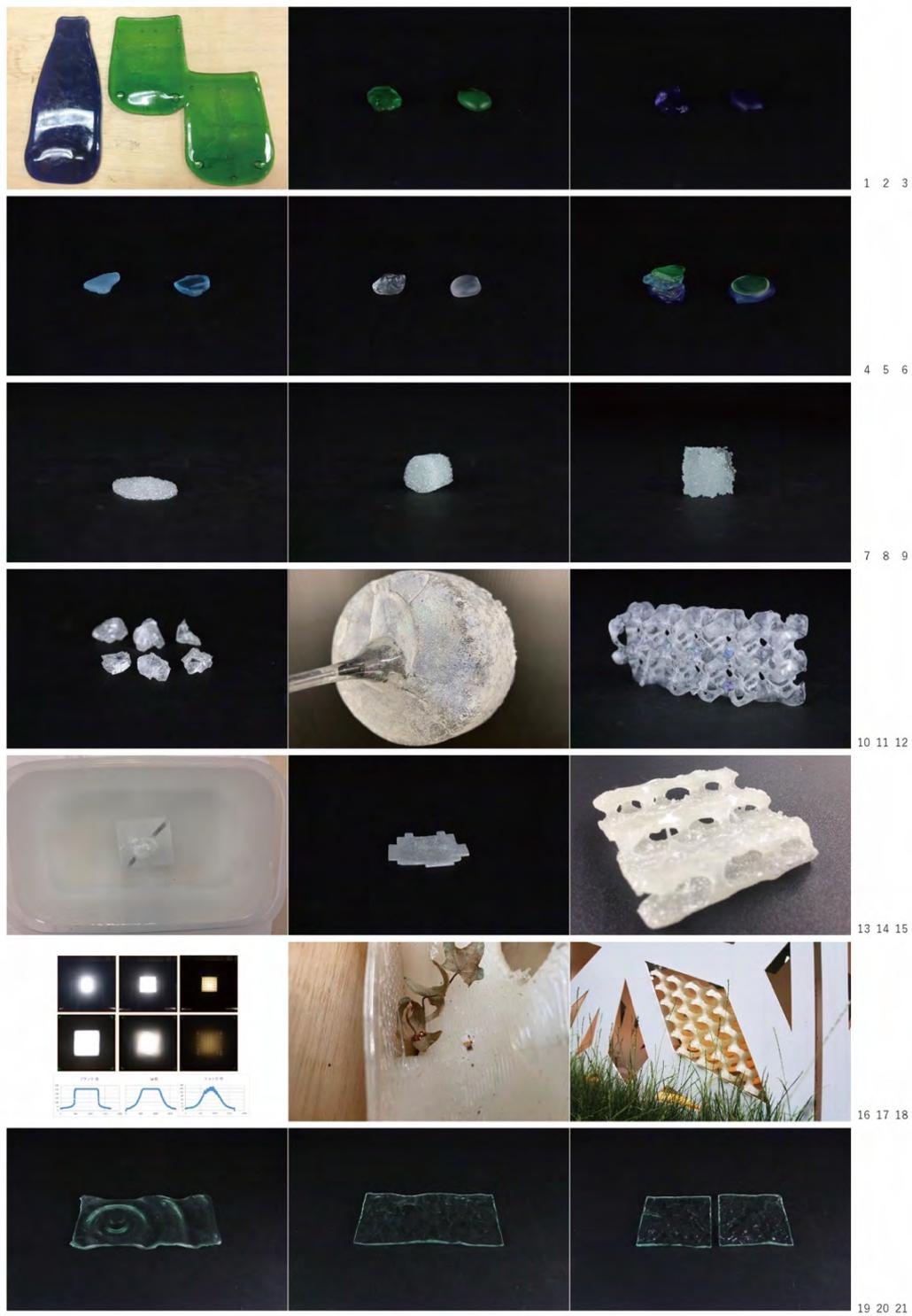


図 148 作品一覧

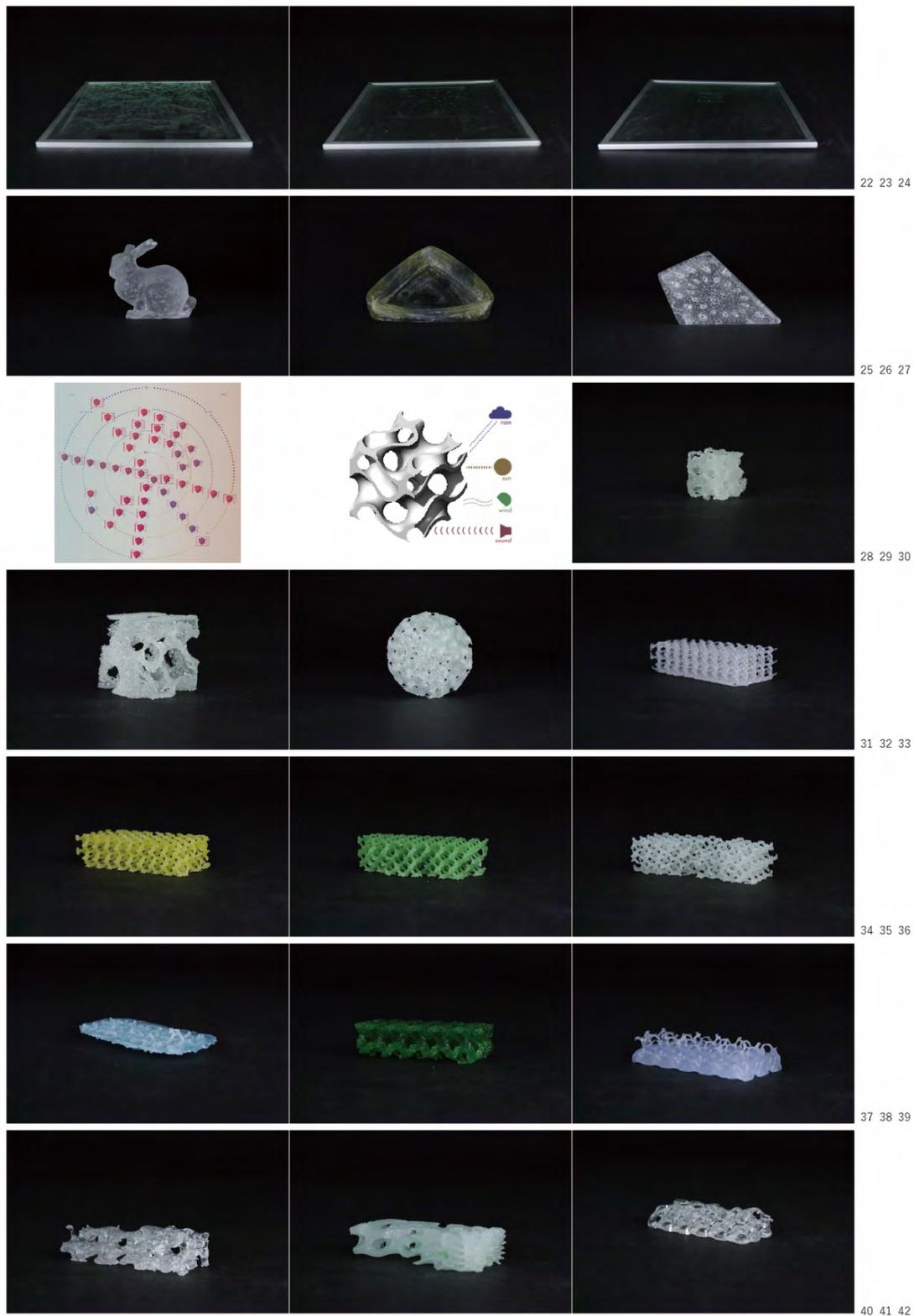


图 149 作品一覽



图 150 作品一覽

次に、一連の制作を振り返り、共通項となりそうな 12 の特徴をピックアップした。該当するものに○、しないものに空欄を当てて分類した。

12 の特徴は以下を当てた。

「建築ガラスの平滑さ、面材らしさをリセット」

「他の用途に使われていたガラスの転換」

「複数素材の使用を想定」

「表面処理で見え方に変化を与える」

「ボクセル感を残したままの焼結」

「ガラス固有の物性を利用した形状操作」

「面の転写」

「多孔質構造」

「内部構造を一から設計」

「視線」

「光」

「植物」

	面材らしさをリセット 建築ガラスの平滑さ、 いたガラスの転換 他の用途に使われて 複数素材の使用を想定	複数素材の使用を想定	表面処理で見え方に 変化を与える	残したままの焼結 ボクセル感を	ガラス固有の物性を 利用した形状操作	面の転写	多孔質構造	内部構造を一から設計	視線	光	植物
1											
2		○									
3		○			○						
4		○			○						
5		○			○						
6		○	○		○						
7				○							
8				○							
9				○							
10			○							○	
11			○		○	○				○	
12			○				○		○	○	
13			○								
14			○								
15			○				○				
16							○	○	○	○	
17							○		○	○	○
18							○	○	○	○	○
19	○					○				○	
20	○					○				○	
21	○					○				○	
22	○		○			○				○	
23	○		○			○				○	
24	○		○			○				○	
25			○								
26			○								
27					○	○				○	
28							○	○			
29							○		○	○	○
30				○			○				
31				○			○				
32				○			○	○			
33							○				
34		○		○			○		○		
35		○		○			○		○		
36		○		○			○		○		
37		○		○			○		○		
38		○		○			○		○		
39		○					○		○		
40							○		○		
41				○			○		○		
42							○		○		
43							○		○		
44			○				○		○	○	
45			○				○		○	○	
46			○				○		○	○	
47			○		○		○		○	○	
48			○				○		○	○	
49			○				○		○	○	
50			○		○		○		○	○	
51			○				○	○	○	○	
52			○				○	○	○	○	
53		○	○	○	○		○		○	○	
54			○	○	○		○	○	○	○	
55		○		○	○		○	○	○	○	○
56		○	○	○	○		○	○	○	○	○
57		○	○	○	○		○	○	○	○	○
58					○		○	○	○	○	
59			○				○	○	○	○	
60			○		○		○	○	○	○	
61	○			○			○	○	○	○	
62			○				○	○	○	○	○

図 151 特徴と作品の対応

それぞれの項目に関して、制作当時に気づいていなかったが振り返ってわかること、明らかにできたこと／できなかったこと、今後の展望などについて記述する。

「建築ガラスの平滑さ、面材らしさをリセット」について

水面のようなガラスに関しては以下「面の転写」で言及する。

建築用板ガラスを粉砕して多孔質形状にする試みでは、(水面のガラス制作の段階で想定していたが、) 細い空隙を進めるほどの粘度にするための温度コントロールが他のガラスと比較し困難であることがわかった。形状操作を今後の課題としたい。

「他の用途に使われていたガラスの転換」について

実験当時は手近にある素材から始めたが、組成の公表されていない素材を正確に形状操作することは困難であることにまもなく気づいた。また一口に「瓶のガラス」「シーグラス」などと言っても、一つ一つが異なる性格を持つので、材料が変更されるたびにパラメータの再調整が必要となる。

ここから次のステップとしては以下二点が考えられる。一点目は、安定的に大量かつ一種類のリサイクルガラスを手に入れるルートを確保すること。二点目は、高温で熱することの可能な炉を用意し、その炉内で複数のガラスを混ぜ合わせ不純物や混合物の偏りを無くすことで新たな一種類のガラスとして扱えるようにすることである。どちらも研究室のみで行うのは規模や金銭面で難しい解決策であるため本稿では断念したが、リサイクル業者などとの協働が実現できれば不可能ではないと思われる。

「複数素材の使用を想定」について

ガラスを形状操作するための温度や時間はガラスごとによって異なることはすでに述べてきたが、複数のガラスを同時に使用するにあたっての困難はそれだけではない。ガラスは固有の膨張係数を持ち、異なるガラスを接触させたまま冷却するとその膨張率の違いから残存応力が発生する。何事もなく使用に耐えうるものができる場合もあれば、制作後しばらくしてヒビが入る場合もあった。ヒビが入る場合と入らない場合の制作手順の差異は未だ判明していない。

ここで「異なる膨張係数のガラスは同時に使うべきでない」とするのが一般的な工芸・工業ガラス分野での主張だと思われる。しかし、後期で制作したダブルジャイロイドのよう

に「物理的にはくっついていないが、知恵の輪のように絡まって二つのガラスが離れない状態」を構造で採用すれば、異なる膨張係数のガラス出会っても同時に使用することが可能だろうと予想される。

また、多孔質構造の空隙の部分に他の材料を入れることで、全く別の見え方や使用方法をそのマテリアルに当てられることもあるだろう。制作ではガラスの原料である硅砂とガラスとを組み合わせ、**「ガラス未満のマテリアル」**の見え方を追求した。他に考えられる素材の組み合わせとしては、引張応力に弱いガラスと引張応力に強い素材（例えば鉄など、熱を加えてキャストできるもの）などである。構造的に弱く力のかかりやすい部分に採用しづらいという多孔質ガラスエレメントの欠点を克服できる可能性がある。

「表面処理で見え方に変化を与える」について

複雑な形状のガラスを後加工で磨いたりコーティングしたりするには、大別して二種類の方法があると考えられる。

一点目は、液体にディップする方法である。ラスター液、金液、エナメル液、ほか金属の溶けた液に浸ける着彩や、フッ化水素によるエッチングなどがそれに当たる。

二点目は、特殊な環境の気体の中に放置する方法である。金属蒸着や、あえて失透を狙った長時間加熱などがそれに当たる。

サンドブラストのように個体（この場合は砂）をぶついたり、直接ヤスリで磨いたりする方法は、内側の加工が不可能なため、多孔質形状全体を加飾するのに適切とは言えない。本稿ではラスター液に浸した後に焼き付ける方法と、チタニアのディップコーティングを試した。どちらもシャボン玉のように光が干渉することによる虹色効果を狙って行なった。結果は、目で見える変化はあったものの、劇的な変化とまでは言いがたく、手法の再検討もしくは形状変更の余地がある。

「ボクセル感を残したままの焼結」について

当初はガラスカレットが溶け残った”失敗作”であると捉えていたが、制作を重ねるうちに、むしろ粒が残っていた方が「面材としてのガラス」の概念を崩せるのではないかと次第に考えを改めた。さらにそこから粒感を残したままの多孔質ガラスを制作した。ボクセルモデリングによって設計された痕跡を、ガラスの粒感に託すことが可能であると思われた。ガラスは粒の集まりであることをこの見た目が思い出させてくれる。

多孔質という脆い形状をこれまた脆いガラス粒で表現しているため、構造的に弱いことが今後の課題である。多孔質形状を比較的丈夫なものに再設計する、加熱温度と時間の調

整により接着度合いと粒感のバランスを取る，上述の複数素材を組み合わせるなどの対策が考えられる。

しかし同時に、「脆いこと」「脆そうに見えること」は，近代におけるガラスの表現方法とは相反するものである。本研究がそれを乗り越えることを目指している以上，脆さは完全に消し去ってはならない大きな武器であると捉えることも可能である。崩壊しそうでしないそのバランスを見極めることが求められる。

「ガラス固有の物性を利用した形状操作」について

序盤はガラスごとの物性を理解していなかったために，意図しない形状操作が選択したガラスによって強制的に行われていた。中期になるとガラスごとの熔融温度や時間の違いに体験として気づき，また文献を読むことで原料の違いによる特性の差異を知り，型肌に添わせることができるようになった。後期になると，部分的に型肌に沿わず重力を利用し空隙の中を滑らせるようにガラスを進ませる造形法（既存の技法の中では工芸ガラスのサギング技法に近いが，完全に一致する技法は存在しないようである）を発見し，何度か制作を重ねるうちに安定的に行えることがわかった。

「面の転写」について

波の模様を板ガラスに転写する技法では，自然に存在する模様から光の屈折が美しいと感じるものを選択した。しかし，様々な物質の3D表面データがウェブ上に存在する現代においては，抽象的／具象的な水面の模様ではないサーフェスを選択する余地もあったと考えられる。

また，当時はCNCマシンを使用し型を制作していたが，のちに3Dプリンタを使用した型の技法を発見した。それにより，切削では水平方向にも垂直方向にも造詣不可能だがAMではそのどちらでも制作可能な（下図を参照）型肌のサーフェスを採用する道も開かれた。今後の展開の一つとして検討の余地がある。

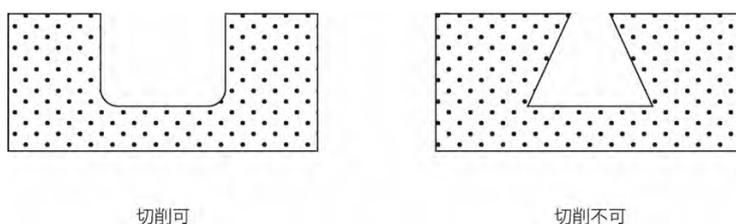


図 152 切削可能な断面と平面／不可能な断面と平面

「多孔質構造」について

単純なガラスの溶融実験やシンプルな形のキャストリングを終えた後、多孔質構造に取りかかった。3D プリンタの分野では比較的広く知られている Gyroid 構造ひとつ取っても、一周期のサイズ、粗密の偏らせ方、角度などいくつかのパラメータがあり、意図した形状を得られるものとそうでないものがあることがわかった。特に、窯詰めした際に、垂直方向の周期が長く水平方向の周期が短いと、型肌に添わせるのが比較的容易であると確認できた。上記のガラス固有の物性と連動した、形状コントロールのための網羅的な検証を今後の課題としたい。

「内部構造を一から設計」について

Gyroid 形状をいくつか焼成したあと、多孔質であることのみならずその形状自体にも何らかの効果を持たせられないかと考えた。ここでの効果とは美的／視覚的印象に加えて、環境呼応、さらには従来のガラスに求められなかった機能を広く指す。そこで制作したのが菱形十二面体の空間充填形状から発想を得た多孔質構造である。狙った効果については後述する。何らかの効果を求めるか否かに関わらず、この技法で重要なのは以下二点であることがわかった。

一点目は、内部のサポートなしで出力できる形状であることだ。一般にサポートを出力物から外す際にはニッパーで切り離すと良いとされているが、多孔質形状は内部までニッパーが届かないためサポートなしで出力できるのがベストである。なお、PVA でサポート形成すれば水に浸すことでサポート除去が可能であるため、この条件は必ずしもマストであるとは言い難い。

二点目は、焼成時にガラスが流れ込むことの可能な形状であることだ。窯詰めした際に水平な面が多孔質形状内に多くあるとガラスが型の下部まで流れづらくなるのがこれまでの制作で判明した。

「視線」について

本研究は当初から空間エレメントとして使用することを前提としていたため、多孔質形状による視線の抜けは重視されてきた。視線効果で面白いと思われるのは、最も遮られる時と最も通る時で見え方が大きく異なる形状である。この状態を引き起こす形状を作るには、以下二点が重要であることがわかった。一点目はエレメント全体に対して内部構造の角度を少なくとも一軸以上振ることである。二点目は、内部構造の周期をずらすことに

より、エレメントを特定の角度から見た際に向こう側の景色が全く見えなくなる瞬間が生じるようにすることである。

「光」について

「視線」の項目と同じく、空間エレメントとして使用することを前提としていたため、光の効果は本研究の当初から重要視されてきた。光の効果で面白いと思われるのは、光の屈折や干渉や反射を起こすことにより、一見してわからない視覚効果を得ることができる場合であろう。これを起こすには、水面など自然界で光を効果的に曲げているもののサーフェスをトレースする、表面処理を行う、オーバーレッセントガラスなど特殊なガラスを用いる、など従来の工芸ガラスで用いられている方法がある。加えて、光の曲がり方がある程度予測し内部構造を作るなど、様々な方法が存在することが制作を通じて判明した。また、ガラスに限らず多孔質形状の光の透過具合を計測する実験は類例がないが、本稿にて実験方法を提案することができた。グラフと印象の定量的な分析に関しては今後の課題としたい。

「植物」について

植物が登攀することを想定し行われた制作・実験は一連の中で多くはない。またガラスを長期間屋外に設置した上での登攀実験は本稿にて扱えなかったため、今後の課題としたい。

ガラスに限らず、多孔質形状の内部を植物が成長するか否かについての実験は類例がないため、実験方法を本稿にて確立できた点は若干なりとも寄与できたと思われる。

先行研究から登攀しやすい棒の径と角度が判明しているため[21]、最終制作ではそのデータを元に内部構造を設計した。

設計プロセス全体一型を繰り返し取る行為についての分析・考察を行う。

下図は、制作を行なった際に筆者が作品に対して感じている感覚の変化を表した四象限の図である。縦軸にデータとして捉える／現実のものとして捉える、横軸にネガへの意識／ポジへの意識を取っている。

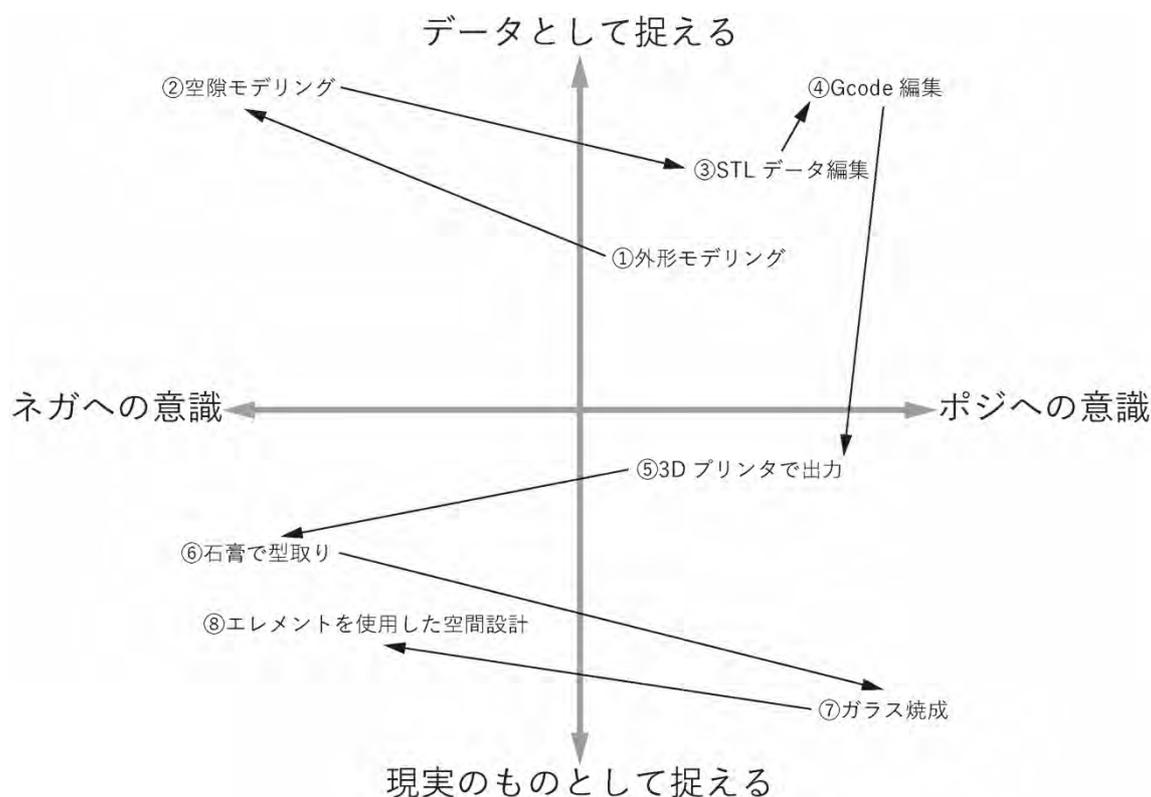


図 153 制作の各ステップとその移行

制作時には半ば無意識に行なっているが、図にて改めて分析すると、①から⑧へと順に進めるにあたり異なる四つの象限を移動していることが伺える。

この“半ば無意識に”というのが重要である。そうしようと意識せずとも、次のステップに進む上で、細部は忘れ去られ頭の中で要素のみを扱いながら、データ／モノとネガ／ポジを行き来している。

また、筆者の頭の中のみならず、実際にも類似の現象が起きている。型を取り、型の型を取り、型の型の型を……と①②③と順を追ってゆくうちに、ボクセルデータとメッシュデータ

は自動整理され、スライシングによって微細な凹凸は失われ、プリントエラーにより部分的な欠けが発生し、あまりにも入り組んだ細部には石膏とガラスが流れ込めず必然的に削除される。

このデフォルメを伴う移行の繰り返しにより、外形モデリングをしている段階では想定していなかった造形が最終的には現れる。表面のざらつきや、型肌に沿わない箇所や、局所的に発生した不透明性や、部分的な粒子感などがそれに当たる。正確にいうと、これらはもちろん全く突拍子もない想定外ではなく、脳やコンピュータや樹脂やガラスが固有に持つ移行の癖が反映された想定外である。「想定範囲内の想定外」とでも呼ぶべき揺らぎが最終成果物に表出している。

これこそ、一種のマテリアリティの顕現だと言えるのではないだろうか。多孔質ガラスの空間に向かうという大きな流れがありつつも、個々のステップでは用いられた素材がその素材らしさを発揮している。

「型取る」の語源は説明するまでもなく「形取る」である。同じ「形取る」を語源とし、かつ「型取る」の同音異義語である「象る」「模る」という単語も存在する。これらの単語とそれぞれの漢字には「象徴する」、つまり抽象から具象への移行の意味と、「模倣する」、つまりエッセンスを抽出しつつ元になったものに似せるという意味とがある。(デジタルからデジタルへの移行も含めた広義での) 繰り返し「型を取る」という行為は、一つ前の手順の形状を「模り」ながらも、最終形状である多孔質ガラスの空間を「象っ」てゆくという二重性を内包している。

多孔質ガラスの特性を決定づける要素について考察する。以下は、各要素と、その要素のスケールの大小を表した図である。

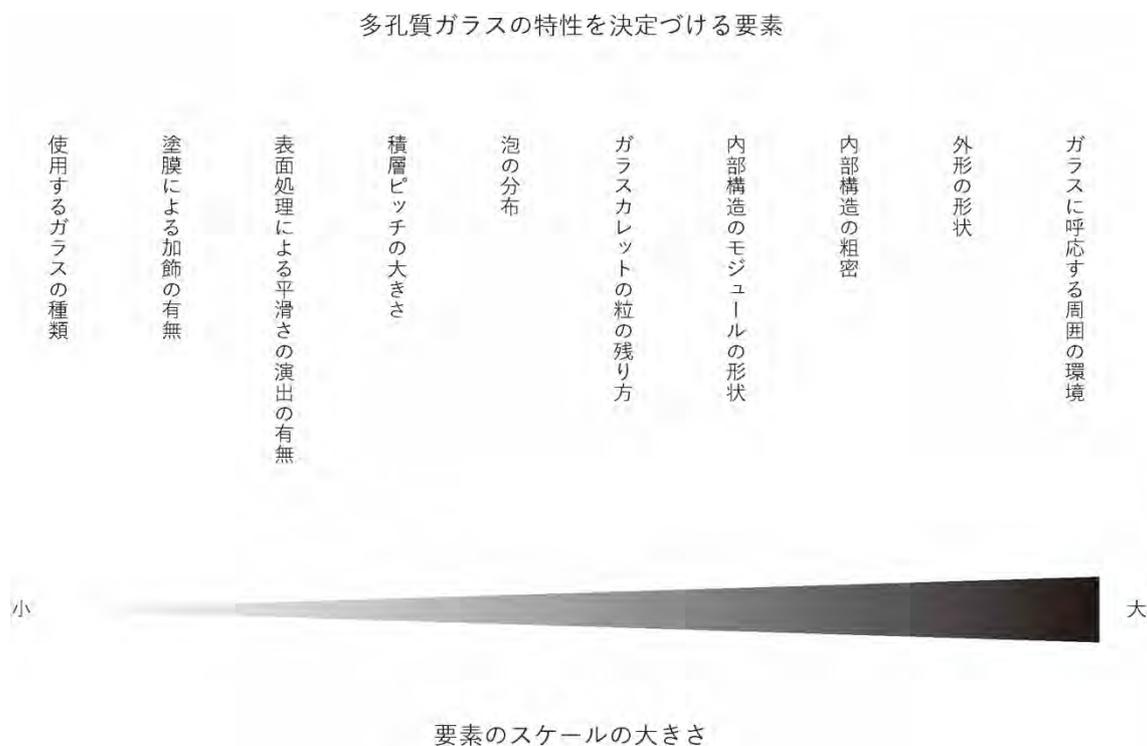


図 154 多孔質ガラスの特性を決定づける要素と、そのスケールの大小

図のように、これまでに制作してきた多孔質ガラスは多数の要素から構成されている。さらに、各要素を決定づけるパラメータも要素ごとに複数存在する場合もある。例えば、「ガラスカレットの粒の残り方」という要素は、「焼成温度」「焼成時間」「徐冷時間」「元々の粒の大きさ」「型内部の空隙の厚さ」「ガラスの種類」などに依存する。

従来の板ガラスを比較対象とし考察する。板ガラスは「塗膜による加飾の有無」と「表面処理による平滑さの演出の有無」にはある程度のバリエーションがあるが、他の項目については一種類しかないものとして扱われているか、そもそも要素としてカウントされていない。そのため、ガラス自体の特性やそれを用いた表現が画一的になるのではないかと推測される。

本研究にて確立された技法を用いて作られるガラスには、設計者が選択可能な数多くの要素とそれを決定づけるパラメータがある。選択肢の増加により従来よりも差異に富んだ特性をガラスに持たせることができよう。この点において多孔質ガラスは板ガラスより優位であると考えられる。

制作したガラスと、他の建築用ガラスとを比較し、ガラスの光効果について考察する。

光がガラスと接したときに見られる主だった現象には、透明性／透過性／陰／影／映り込みの5つがある。

ここでは、それぞれの単語を以下のように定義する。

透明性とは「濁っていないこと」

透過性とは「光を通過すること」

陰とは「光の当たらない部分」

影とは「光源と反対側に現れる物体の形」

映り込みとは「鏡面に近いサーフェスに像が映ること」

下図は、二章の先行研究にて紹介した、カーテンウォール以後に誕生した主だったガラス表現と、本稿で制作したガラスとの比較である。

ガラスの呼称	代表的な建築	透明性	透過性	陰	影	映り込み
(一般的な)カーテンウォール	国連ビル	最大限あるかのように振る舞わせる	ある	ない	ない	積極的に利用。ミラーのように空の色を映す
曇りガラス	プレゲンツ美術館	積極的にないものとして扱う	ある	ぼんやりとある	ぼんやりとある	ほぼない
ガラスブロック	メゾンエルメス	ない	ある	ほぼない	積極的に利用。表面の凹凸で濃淡を作る	ほぼない
凹凸ガラス	ブラダプティック	ない	ある	ほぼない	ない	積極的に利用。周囲の景色を歪める
多孔質ガラス	—	ヴォイドの部分にある	ガラスの部分にある	積極的に利用。エレメント厚でコントロール	積極的に利用。内部構造の角度と積層痕による濃淡	基本的にはないが表面処理でコントロール可

図 155 各建築用ガラスと光の効果の対応

「(一般的な)カーテンウォール」「曇りガラス」「ガラスブロック」「凹凸ガラス」に加えて本研究で制作した「多孔質ブロック」の5つを比較し、特に注目すべき部分に黄色の背景色を塗った。

二章で示したように、近代以降のガラスは基本的に、高い透明性の実現を目指しつつも、実のところ高い透過性を持つガラスであった。しかし設計者がガラスを使用する際には、

極限まで透明性の高い「虚」であるかのように用いられてきた歴史がある。また、地面に対し垂直な平面として用いられることがほとんどであるため、陰影についてはほぼ無視されている。陰影どちらもある従来のガラスには曇りガラスが挙げられるが、透明性を完全に手放すことでそれを成立させている。また、ガラスブロックに関しては明るい空間の印象があり、ほとんど陰の効果は見られないと思われる。多孔質ガラスは陰と影どちらも別のパラメータを用いながらコントロールしつつ、透明性についても空隙の部分で担保している。

また、周囲の色をガラス表面に拾う映り込みについては、三章で示した表面処理の手順を行うか否かで調整可能である。そこで、上記の表で写り込みがあると示されている、表面を平滑にした多孔質ガラス／虹色の干渉膜を付加した多孔質ガラスと、カーテンウォールや凹凸ガラスとを比較し考察する。映り込みは、観測者・ガラス・光源・映るものの4つの位置関係と設置角度によってその効果が決定される。多孔質ガラスは内部構造によりガラスの面が様々な角度を向いており、カーテンウォールや凹凸ガラスに比べ周囲の様々な方向の景色を写り込ませることが可能であると推測される。

このように、多孔質ガラスは他の建築用ガラスに比べ、光の様々な効果を演出可能な特性を持っている。光や影を拡散している空間は、良い空間であるというのが通説である。柔らかな光が空間全体を満たしていると、人は快適さを感じると広く信じられている。この評価基準を是とするならば、多孔質ガラスは従来のガラスよりも良い空間を形成しやすいガラスであり、他のガラスに比べ優位であると結論づけられる。

最後に、本研究で確立された技法と、3Dプリンタを用いてガラスを作る他の技法とを比較する。

二章で紹介した先行研究と本研究とを比較し、各技法の長所と短所についてまとめたのが以下の図である。あらかじめ断っておくと、各技法にて作られたガラスを測定器にかけるなどして定量的に比較したわけではない。また、かかる工数や機材準備の難易度は、各論文から読み取れる範囲で評価している。よって、同じ記号がマークされていることは、全く同一の評価であることを必ずしも意味しない。

開発者	造形サイズ	複雑さ	透明度	強度	工数	機材の準備
MIT	○	×	○	○	○	×
ETH	×	○	○	×	×	△
KIT	×	△	○	×	×	△
DOE	×	○	○	○	○	△
COPL	×	△	×	—	○	○
MICRON3DP	△	×	×	—	○	×
本研究	○	△	○	○	×	△

図 156 3Dプリンタを用いたガラス造形の比較

このように比較すると、どの手法も一長一短であることが伺える。本研究は工数の多さで他の研究に劣っており、手順の簡略化は今後の課題である。

他方、空間スケールの多孔質ガラスを作る技法として見た時には、「造形サイズ」と「複雑さ」の二つが必須項目だと推測される。この両方の項目で本研究の技法は遜色ないレベルを維持しており、他の研究と比較し優位であると考えられる。

六章：結論

この章では、今までの議論についてまとめる。

本稿の次のステップとして手をつけやすい展開について

四章と五章で紹介したように、これまでの制作は手近にある素材やすぐに思いつく技法からひとまずスタートし、その結果を見て次の制作に取り掛かるという手順を繰り返すものであった。例えば3Dプリンタやガラス分野における工学系の論文では、初めに具体的なゴール条件を設定し、全てのチェック項目の達成に向かって試行錯誤を繰り返すという形式がよく見られる。しかしながら、本稿は様々な分野を横断する研究であるため、一つのジャンルで見られる形式に完全に則っているわけではない。従って、工学的観点から見ると、制作の狙いとその結果の表れ方との関係性に関して、範囲を限定できていない部分が存在する。また、制作物に対する印象の定量的な評価に関しても、今後の課題としたい。

一章と二章で触れた話題の振り返りについて

総合すると、バウンダリーデザインとは中間体をデザインすることであった。ここで言う中間体とは、自然／人工、ヒトの空間／ヒト以外の空間、面／塊、ボリューム／ヴォイド、デジタル／アナログ、内部／外部、などの両義性を孕み、異なる階層のものを結びつける存在を指す。

また結果として、それは多孔質なデザインをきっかけにしたマテリアリティの奪還によって達成された。デジタルデータの変換も含む広義での「型取り」は、ガラスの特性を様々なスケールで調整する要素を再発明し、「虚の平面」ではないガラスを選択する余地を再び与えた。ガラスは自身の透明性を維持したまま、本来の存在感を発揮することが可能になったのである。そして、奥行きと連続性を持つバウンダリーでユニークなガラスは、切断ではない空間の発生を人間に示唆した。

また同時に、それは壁・柱・窓といったエレメントの区別をリセットする設計でもあった。建築の複雑性を一旦は回避するため、また造形サイズという研究室での現実的な制約から、エレメントの探索として本研究はスタートした。しかしながら、研究が進むにつれて、泥遊びのようにマテリアルと戯れる原始的行為の連続が、エレメントごとに考えざるをえなかった構築的な空間への疑問を挟ませたのである。

既存のパーツとは異なる新しい概念からのアプローチは、全体性を変化させうる力を持つ。多孔質ガラスによる建築へのアプローチは、新しい空間の可能性を拓いた。眼前に結晶した素材のリアルは退屈な設計の定型を軽々と飛び超えて、美感や自然観をも更新するであろう。

最後に

AM 技術とデジタルモデリングが建築にもたらしたのは、広く知られるようなコストパフォーマンス、工期の短縮、宇宙空間など特殊環境での建設、といった利点のみではない。産業革命以後の建築が前提とした構法と設計法が必然ではなくなったとき、エレメントという概念が崩壊し、全てのモノやヴォイドがグラデーショナルな点や線の集まりとして捉え直されるだろう。

それは人の空間の捉え方にも影響を与え、設計の良し悪しの基準にも影響を与える。今の時代の建築家たちは、二つの異なる物質の接合部、取り合いのあり様を「ディテール」と呼び有り難がっている。しかし、価値観が変われば言葉の意味も変わっていく。今後“詳細”に注目すべき場所は、端部のピンポイントではなく、厚みを持ったバウンダリーになるだろう。目の前の景色が一度に塗り替えられるような大きな変化は、身近な素材、例えばガラスから始まり伝搬してゆくのかもしれない。

私達が目にしているのは「虚の平面」ではなく、新しい時代へと繋がる扉なのだ。

七章：その他

この章では、付録、参考文献を記載し、
最後に謝辞を掲載する。

付録

本研究にて取り扱っている作品および実証実験の一部は、竹中工務店との共同研究である「Reactive Wall Project」として行われている。このプロジェクトは筆者の所属する研究室メンバー複数人による連作であり、他の制作者も環境呼応型の作品を長期に渡り屋外設置している。

プロジェクトメンバーによって合同の Web サイトが制作された。

以下がそのサイトの URL である。

<https://www.archifab.co/reactivewall>

また、Web サイト制作に並行して作品概要が写真とダイアグラムを用いてまとめられた。以下に一部作品の概要を記載する。

Reactive Wall Project

Abstract

Abstract 01/02

0. Overview

This is a project to set up a series of wall panels corresponding to the change of seasons. Environmental factors such as light, wind, temperature, rain, and sound are changing rapidly as time progresses. By converting, exaggerating, and visualizing these elements, it enabled to easily grasp the passing of seasons. Alternatively, these elements could be semi-automatically incorporated into the interior to blur the distinction between the inside and outside of the room. The series were made using cutting edge technology, including custom-built large 3D printers and special modeling techniques. This project explored certain spaces where the transition of nature harmonized with the behavior of people.

1. Porous Block: building material for ambiguous spaces with large 3D printers

This building material was designed by imitating the geometric structure of a biological surface called "Gyroid". A gyroid structure possesses a property of maintaining high strength with only a small amount of material. The porous structure can softly absorb sunlight, wind, rain, and sound. This building material created a space where you can vaguely feel the outside situation while remaining indoors. Small creatures in nature, such as plants and insects, find their place in the fine irregularities and holes on the surface. As time goes by, the building and the non-building integrates, eventually becoming a part of that space.

2. Maple Window: a window frame of a winged fruit that falls due to rising temperatures using a shape-memory resin

The phenomenon of "fall" is related to daily scenery in Japan. After the cherry blossoms are in full bloom, the petals fall all at once, and you can enjoy fallen leaves in autumn and snow in winter. In this work, the falling phenomenon was applied to the wall of the building. Resin with a shape memory property was used for the window frame. When the branches of maple trees deform due to an increase in temperature, the seeds rotate and fall. When a part of the wall surface is taken away, the lighting through the whole wall surface changes. The falling scene shows an unprecedented look of the building.

3. Breathing Facade: a facade with a breeze that exchanges air between the inside and outside

This work is a facade that changes its shape depending on the surrounding environment. When the wind blows, the facade swells as if breathing and then returns. "Auxetic Pattern," a pattern that easily distinguishes the change in appearance, was used. The air moves from outdoors to indoors and from indoors to outdoors through the gaps. We can enjoy the light coming in through the slit in the facade and the flickering shadows. Each module is connected to its neighbors by a chain. It was designed to be as light as a breeze.

4. Twisted Window Frame: a glowing 3D window frame with a twisting, continuously varying shape pattern that can only be created with 3D printers

The facade consists of two thin walls with spaces in between them. By inserting a thick object into the opening of the wall, a rich three-dimensional contrast is created. This differs from the previous representation of facades, which simply consisted of flat 2D patterns, and the inserted thick object can only be made with a 3D printer. The shape of the object is such that the diamond used in the original outer wall pattern continues to deform while being three-dimensionally twisted. Because of its translucent nature, this work shines milky white through the light from outside during the day and shines under illumination at night, thus functioning as a twisted light window frame that gives a new look to the wall.

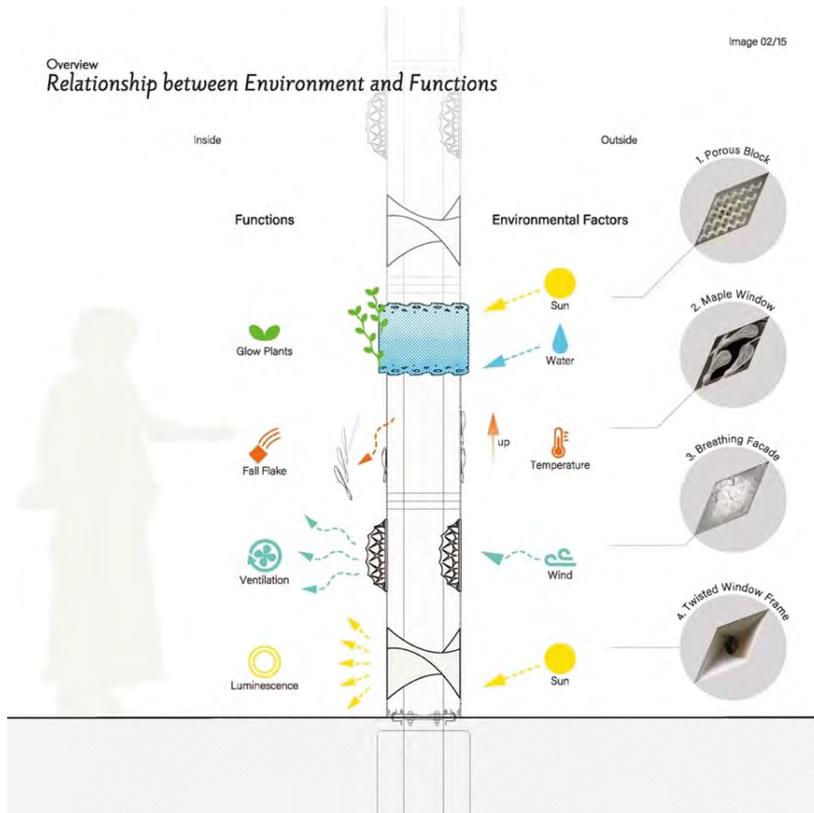
☒ 158 Reactive Wall Project



☒ 159 Reactive Wall Project

Overview
Relationship between Environment and Functions

Image 02/15



☒ 160 Reactive Wall Project

Overview
Large 3D Printer

Image 03/15



This is a large custom 3D printer that can output objects as large as one cubic meter at a time. By moving three heads at the same time, speedy production can be realized.



The photo on the left was taken with a tracking camera attached to the nozzle. It makes use of the traces of large pitch lamination to create a surface with a unique expression.

☒ 161 Reactive Wall Project

I. Porous Block

building material for ambiguous spaces with large 3D printers

Image 04/15

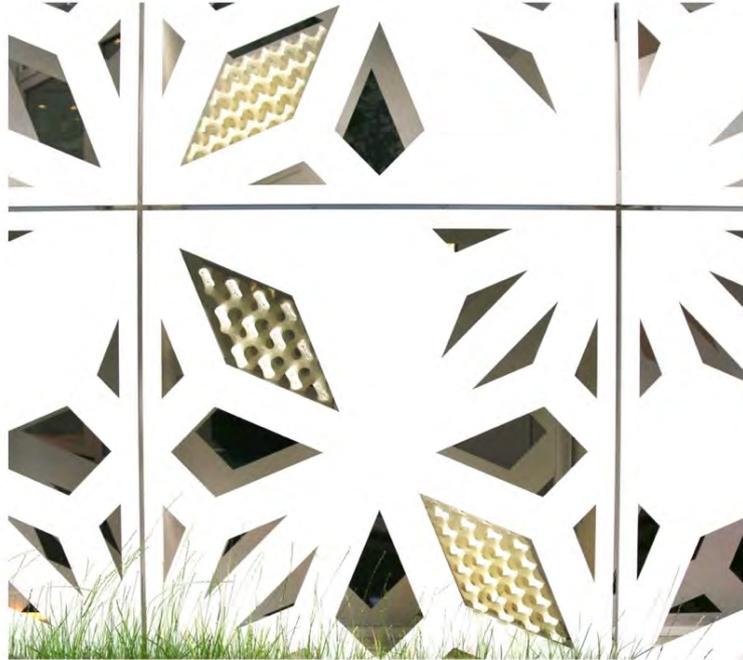
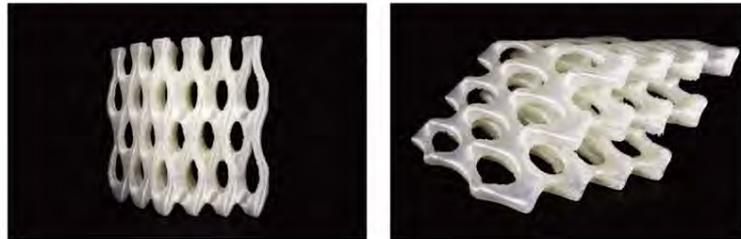


图 162 Reactive Wall Project

I. Porous Block Prototype

Image 05/15



The porous 3D printed block was designed by biomimetics based on light and strong butterfly wings. Because the inside of the branch is hollow, the surface reflects light beautifully.

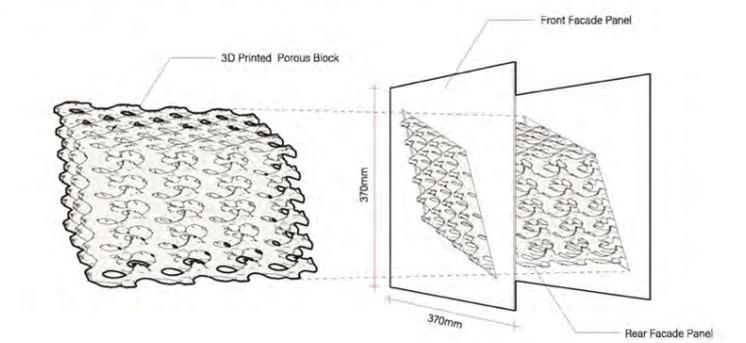


图 163 Reactive Wall Project

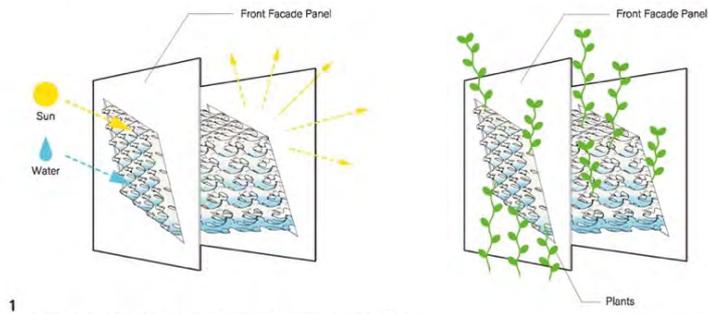
1. Porous Block Response to Weather



Puddle in the Courtyard



Garden Plants



1 Sunlight and water pass through the small holes in the block. An environment suitable for plant growth is maintained.

2 Plants grow through the inside of the block. It climbs using the unevenness of the 3D printed surface.

☒ 164 Reactive Wall Project

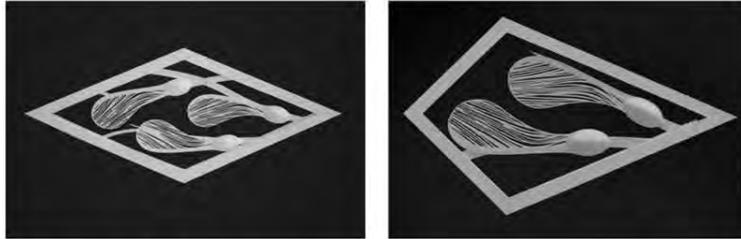
2. Maple Window

a window frame of a winged fruit that falls due to rising temperatures using a shape-memory resin

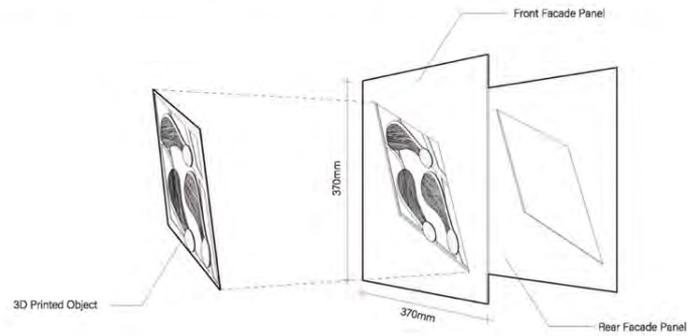


☒ 165 Reactive Wall Project

2. Maple Window
Prototype



The maple window was designed by biomimetics based on maple seeds. The branch connected to the frame changes its shape in high temperature, and the seeds come off, slowly twirling and hovering before they fall to the ground.



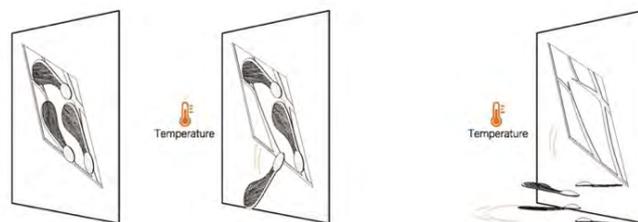
☒ 166 Reactive Wall Project

2. Maple Window
Response to Air Temperature



Before Deformation

During Deformation



1 The branches connected to the frames are made of shape memory polymer(SMP). It changes its shape when the temperature is over 35 degrees Celsius, and slowly comes off the frames.

2 When the seeds come off and get released, they fall and spin like actual maple seeds.

☒ 167 Reactive Wall Project

3. Breathing Facade

Image 10/15

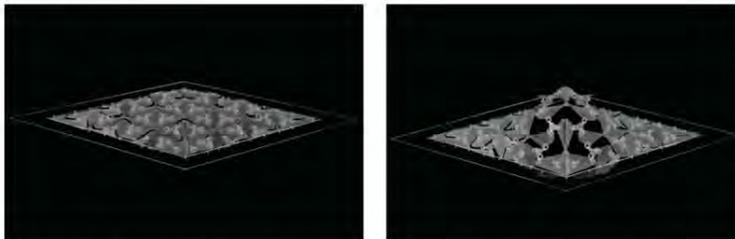
a facade with a breeze that exchanges air between the inside and outside



图 168 Reactive Wall Project

3. Breathing Facade Prototype

Image 11/15



This 3D printed facade changes its shape and forms gaps according to the wind force of the environment it is exposed to. Thus, the gaps of the facade will enable better ventilation and lighting.

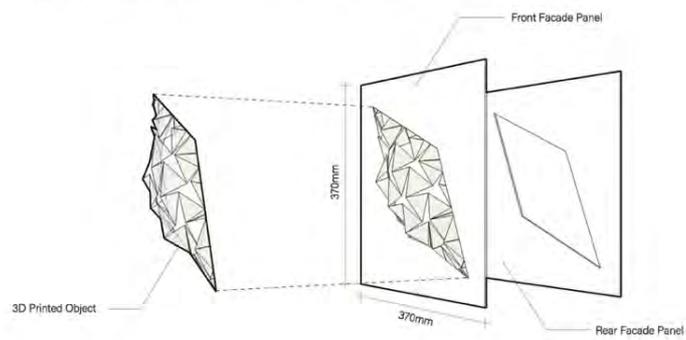


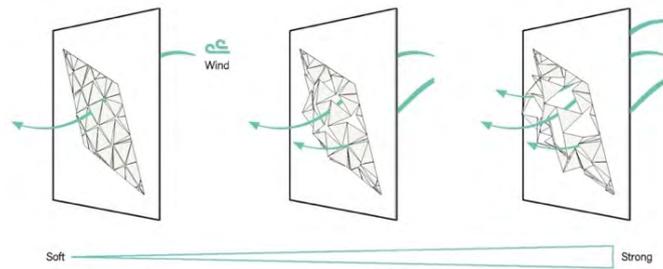
图 169 Reactive Wall Project

3. Breathing Facade *Respose to Wind*



Close

Open



As seen in the diagram above, the stronger the wind the larger the gaps grow.

☒ 170 Reactive Wall Project

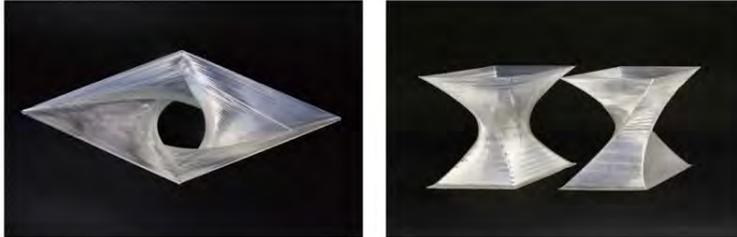
4. *Twisted Window Frame*

a glowing 3D window frame with a twisting, continuously varying shape pattern that can only be created with 3D printers

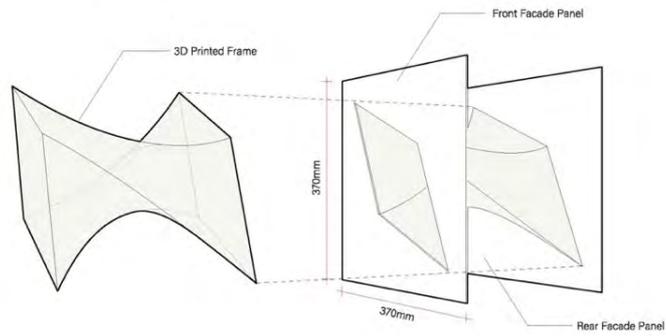


☒ 171 Reactive Wall Project

4. Twisted Window Frame
Prototype

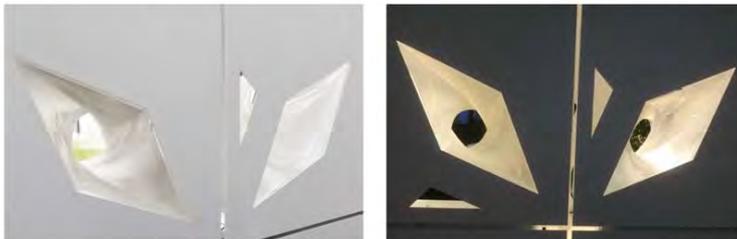


The 3D printed translucent frame bridges between two panels, and it has a depth to control light to come into the building and goes out from the building.



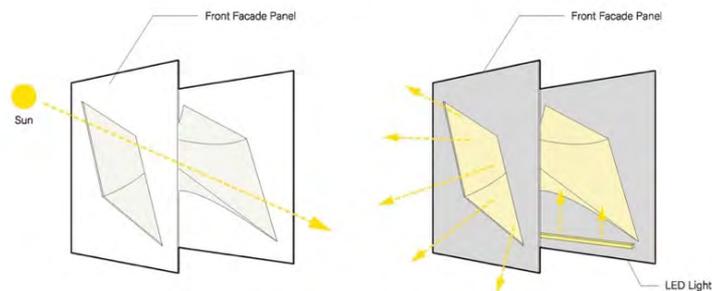
☒ 172 Reactive Wall Project

4. Twisted Window Frame
Response to Light



Daytime

Nighttime



1
 Light comes into the interior space through the specific directions defined by the opening of the frames.

2
 The Frame also emits the light in the nighttime, transmitting LED light that has set inside of the façade panels.

☒ 173 Reactive Wall Project

本稿にて取り扱った内部構造のマップは、「ドーナツチェア」という椅子の作品が制作されるのと前後し、ドロ잉された。「ドーナツチェア」は筆者により形状のデザインが行われ、所属する研究室のメンバーと共にペレット式大型 3D プリンタによる出力がなされた。同一の外部形状に異なる内部構造を適用し、最終的に、そのうちのいくつかのバリエーションが制作された。「ドーナツチェア」は研究室内の他の人物により制作された他の作品群とともに、ビルの屋上にて撮影された。該当の写真は、2018 年 1 月 18 日の日本経済新聞に掲載された。

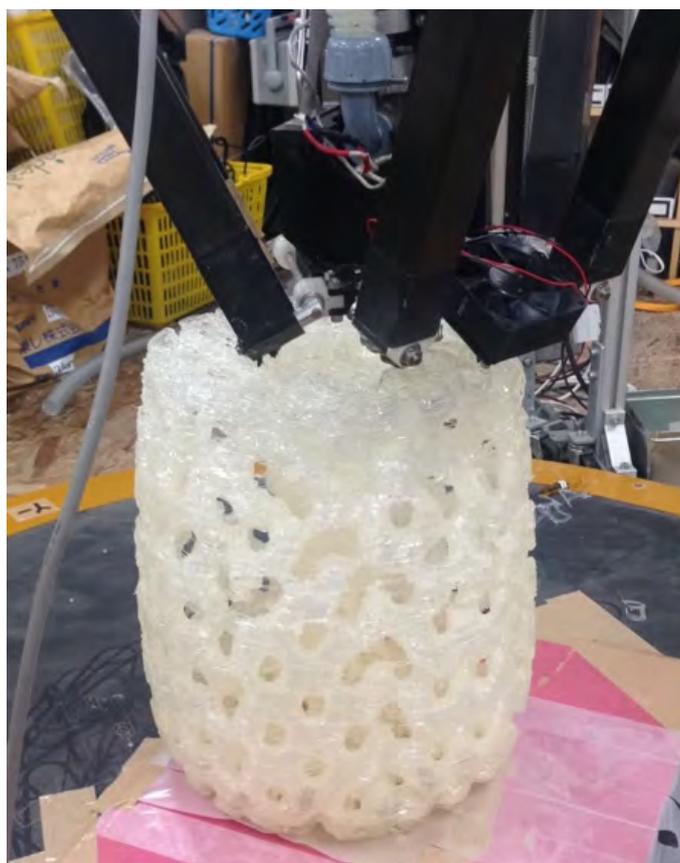


図 174 出力中のドーナツチェア



図 175 日経新聞に掲載された大型 3D プリンタ製の出力物 出典：r.nikkei.com

本稿にて取り扱った一部の作品は、2017年から2019年にかけて、都内で行われた複数の展示に出展された。それぞれ「ORF2017」、「ORF2018」、「まつろわぬ物質」展、「たわやかな物質」展というタイトルの付いたこれらの展示は、筆者の所属する大学ないしは研究室のメンバーによる合同展示である。以下に会場の様子を掲載する。

ORF2017



図 176 展覧会の様子

ORF2018



図 177 展覧会の様子



図 178 展覧会の様子

「まつろわぬ物質」展



図 179 展覧会の様子



図 180 展覧会の様子



図 181 展覧会の様子



図 182 展覧会の様子

「たわやかな物質」展



図 183 展覧会の様子



図 184 展覧会の様子

参考文献

図表の出典

該当する各図表の直後に URL を掲載した。引用文献と内容が重複するもの（例えば Web ページと論文 PDF の両方が存在する場合）でも、URL と文献の両方を扱った。

なお、出典に関して特に断りのない図表は、筆者もしくは本研究の協力者によって直接撮影・制作された。

引用文献リスト（文中登場順）

文中の [] に括られた番号と以下の番号は対応している。

1. Star, S.L. and J.R. Griesemer, Institutional Ecology, 'Translations' and Boundary Objects: Amateurs and Professionals in Berkeley's Museum of Vertebrate Zoology, 1907-39. *Social Studies of Science*, 1989. 19(3): p. 387-420.
2. 吉田航太, インフラストラクチャー／バウンダリーオブジェクトにおける象徴的価値の問題 インドネシアにおける廃棄物堆肥化技術をめぐって. *文化人類学*, 2018. 83(3): p. 385-403.
3. Latour, B. and 嘉. 伊藤, 社会的なものを組み直す：アクターネットワーク理論入門. 叢書・ユニベルシタス. Vol. 1090. 2019: 法政大学出版局. 524, 53p.
4. 平田晃久, 平田晃久：建築とは「からまりしろ」をつくることである. 現代建築家コンセプト・シリーズ. Vol. 8. 2011: INAX 出版. 159p.
5. ワタリウム美術館, ルイス・バラガンの家：世界の名作住宅をたずねる. とんぼの本. 2009: 新潮社. 139p.
6. 黒川高明, ガラスの技術史. 2005: アグネ技術センター. viii, 342p.
7. 浜本隆志, 「窓」の思想史：日本とヨーロッパの建築表象論. 筑摩選書. Vol. 0027. 2011: 筑摩書房. 270p.
8. 内田祥哉, et al., 内田祥哉窓と建築ゼミナール. 2017: 鹿島出版会. 202p, 図版 [6]

枚.

9. 伊香賀俊治, et al., 窓と建築をめぐる 50 のはなし. 2017: エクスナレッジ. 143p.
10. 矢代真己, 田所辰之助, and 濱寄良実, 20 世紀の空間デザイン : マトリクスで読む. 2003: 彰国社. 254p.
11. 蔵屋美香, et al., 窓展 : 窓をめぐるアートと建築の旅. 2019: 平凡社. 205p.
12. Krieg, O., HygroSkin – Meteorosensitive Pavilion. 2016.
13. Krieg, O., et al., HygroSkin – Meteorosensitive Pavilion. 2014. p. 272-279.
14. Krieg, O., et al., HYGROSKIN:: Negotiating Design & Making. 2017. p. 272-279.
15. Klein, J., et al., Additive Manufacturing of Optically Transparent Glass. 3D Printing and Additive Manufacturing, 2015. 2(3): p. 92-105.
16. Moore, D.G., et al., Three-dimensional printing of multicomponent glasses using phase-separating resins. Nature Materials, 2019.
17. Landgraf, M., 3D-Printing of Glass Now Possible. Karlsruhe Institute of Technology, 2017.
18. Kotz, F., et al., Three-dimensional printing of transparent fused silica glass. Nature, 2017. 544: p. 337-339.
19. Destino, J.F., et al., 3D Printed Optical Quality Silica and Silica-Titania Glasses from Sol-Gel Feedstocks. Advanced Materials Technologies, 2018. 3(6).
20. Baudet, E., et al., 3D-printing of arsenic sulfide chalcogenide glasses. Optical Materials Express, 2019. 9(5): p. 2307-2317.
21. 齊藤幹保, クズが登攀可能な支柱の直径の推定. 日本森林学会大会発表データベース, 2015. 126.

関連文献リスト (著者名順)

本稿との研究領域が近いため、紹介すべきだと思われる文献のリストを以下に記す。一部は上記の引用文献リストと重複している。

- i. 家庭ガラス工房：すてきな手作り雑貨，ほるぷ出版.
- ii. (2002). 日陰をいかす庭づくり，日本放送出版協会.
- iii. (2009). 基礎からわかるはじめての陶芸：自分だけのやきものを作ろう!，学研パブリッシング
- iv. 学研マーケティング(発売).
- v. (2016). 仕上げデザイン究極ガイド：practical guide for surface material design, エクスナレッジ.
- vi. Battista, A. and 三輪福松 (2011). 絵画論，中央公論美術出版.
- vii. Baudet, E., et al. (2019). "3D-printing of arsenic sulfide chalcogenide glasses." *Optical Materials Express* 9(5): 2307-2317
- viii. Bob Sheil, A. M., Ruairi Glynn and Marilena Skavara (2017). "Fabricate2017." UCL Press.
- ix. Correa Zuluaga, D., et al. (2013). HygroSkin: A Climate-Responsive Prototype Project Based on the Elastic and Hygroscopic Properties of Wood.
- x. D. J. Stockton, R. J. W. B. a. M. H. (1996). "Computer Controlled Brilliant Cutting of Flat Glass." *Int J Adv Manuf Technol*.
- xi. Designsight and 吉岡徳仁 (2008). セカンド・ネイチャー：Second nature, 求龍堂.
- xii. Destino, J. F., et al. (2018). "3D Printed Optical Quality Silica and Silica-Titania Glasses from Sol-Gel Feedstocks." *Advanced Materials Technologies* 3(6).

- xiii. E., K., et al. (2019). 視覚的無意識, 月曜社.
- xiv. Fabio Gramazio, M. K., Silke Langenberg (eds.), Fabricate. London, UCL (2017). "Fabricate2014." gta Verlag.
- xv. FriedbergAnne, et al. (2012). ヴァーチャル・ウィンドウ : アルベルティからマイクロソフトまで, 産業図書.
- xvi. Klein, J., et al. (2015). "Additive Manufacturing of Optically Transparent Glass." 3D Printing and Additive Manufacturing 2(3): 92-105.
- xvii. Kotz, F., et al. (2017). "Three-dimensional printing of transparent fused silica glass." Nature 544: 337-339.
- xviii. Krieg, O. (2016). HygroSkin – Meteorosensitive Pavilion.
- xix. Krieg, O., et al. (2014). HygroSkin – Meteorosensitive Pavilion: 272-279.
- xx. Krieg, O., et al. (2017). HYGROSKIN:: Negotiating Design & Making: 272-279.
- xxi. Landgraf, M. (2017). "3D-Printing of Glass Now Possible." Karlsruhe Institute of Technology.
- xxii. Latour, B. and 伊藤嘉高 (2019). 社会的なものを組み直す : アクターネットワーク理論入門, 法政大学出版局.
- xxiii. Menges, A. and S. Reichert (2015). "Performative Wood: Physically Programming the Responsive Architecture of the HygroScope and HygroSkin Projects." Architectural Design 85.
- xxiv. MiodownikMark and 松井信彦 (2015). 人類を変えた素晴らしき 10 の材料 : その内なる宇宙を探検する, インターシフト
- xxv. 合同出版 (発売).
- xxvi. Moore, D. G., et al. (2019). "Three-dimensional printing of multicomponent glasses using phase-separating resins." Nature Materials.

- xxvii. qp, et al. (2012). 窓の観察, 長島明夫.
- xxviii. Sheil, R. G. a. B. (2017). "Fabricate2011." UCL Press.
- xxix. ShimomuraTakashi, et al. (2006). "Studies on the growing technique of potted Hedera helix L. cuttings using a wooden prop." Journal of the Japanese Society of Revegetation Technology 32(1): 44-49.
- xxx. Star, S. L. and J. R. Griesemer (1989). "Institutional Ecology, 'Translations' and Boundary Objects: Amateurs and Professionals in Berkeley's Museum of Vertebrate Zoology, 1907-39." Social Studies of Science 19(3): 387-420.
- xxxi. TatarellaFrancesca and 牧尾晴喜 (2014). ナチュラルアーキテクチャーの現在, ビー・エヌ・エヌ新社.
- xxxii. YkkAp 株式会社窓研究所 (2015). 窓学アーカイブ : 窓学 = Windowology archive, YKK AP 株式会社窓研究所.
- xxxiii. エクスナレッジ (2015). デザインが劇的にうまくなる!目的別を選ぶディテール 300, エクスナレッジ.
- xxxiv. エム・ワイ企画 and 中山公男 (2000). 世界ガラス工芸史 : カラー版, 美術出版社.
- xxxv. コンピュータ教育振興協会 and 日経ものづくり編集部 (2016). 3D プリント活用技術検定 = Certification of 3D printing skills : 公式ガイドブック, 日経 BP 社
- xxxvi. 日経 BP マーケティング (発売).
- xxxvii. はる陶房 and 白金陶芸教室 (2013). ゼロからの陶芸入門 : コツをつかんで上達しよう, 誠文堂新光社.
- xxxviii. ワタリウム美術館 (2009). ルイス・バラガンの家 : 世界の名作住宅をたずねる, 新潮社.
- xxxix. 伊香賀俊治, et al. (2017). 窓と建築をめぐる 50 のはなし, エクスナレッジ.

- xl. 井上一夫 "ダイヤモンドの輝きの数値化." Gemmological Society of Japan.
- xli. 井上暁子 (2003). 産地別すぐわかるガラスの見わけ方, 東京美術.
- xlii. 一ノ瀬雅之, et al. (2004). "建材の日射透過および反射性能における分光感度特性." H 本建築学会環境系論文集 583.
- xliv. 羽兼直行 (2016). はじめての多肉植物 : 育て方のコツと楽しみ方 : 枯らさないためにはどうしたら?, 主婦の友社.
- xlv. 奥二郎 and 合沢祐美 (1997). 板ガラスでつくる, ほるぷ出版.
- xlvi. 奥二郎, et al. (1998). 電気炉を使って, ほるぷ出版.
- xlvii. 奥野美果 (2008). キルンワーク : 電気炉を使った手作りガラス工房, ほるぷ出版.
- xlviii. 加藤紘一 (1986). "ガラス工業原料としての珪砂." 鉱山地質.
- xlix. 加藤紘一 (2017). アートなガラスの材料学, ブックウェイ.
- l. 加藤正吾 (2011). "負の光屈性によるキヅタ葡萄シュートの伸長." 日本森林学会誌 93.
- li. 家庭ガラス工房編集部 (2009). ステンドグラス : ジャンルを越える物づくりの世界, ほるぷ出版.
- lii. 吉岡徳仁, et al. (2017). 吉岡徳仁 : 光庵 : ガラスの茶室 = Tokujin Yoshioka : kou-an : glass tea house, 求龍堂.
- liii. 吉岡徳仁, et al. (2013). Tokujin Yoshioka : crystallize, 青幻舎.

- liv. 吉田航太 (2018). "インフラストラクチャー／バウンダリーオブジェクトにおける象徴的価値の問題
- lv. インドネシアにおける廃棄物堆肥化技術をめぐって." 文化人類学 83(3): 385-403.
- lvi. 吉田智 (2008). "入門:ガラスの破壊学." NEW GLASS 23.
- lvii. 久野恵一 (2016). うつわ, グラフィック社.
- lviii. 近岡令 (2012). フュージングをはじめよう : ガラスを溶かす楽しみ, ほるぷ出版.
- lix. 金田一 and 川嶋和樹. (2012). "装飾用ダイダモイन्दのカットデザインの3Dシミュレーション." 日本デザイン学会デザイン学研究 BULLETIN OF JSSD 60.
- lx. 駒野幸子 and 磯谷桂 (2011). トンボ玉のアクセサリー, ほるぷ出版.
- lxi. 隈研吾, et al. (2018). Kengo Kuma : a Lab for materials, 新建築社.
- lxii. 建築知識 (2012). 木造・S造・RC造ディテール集, エクスナレッジ.
- lxiii. 五十嵐太郎 (2008). 建築と植物, INAX 出版.
- lxiv. 五十嵐太郎 and 五十嵐太郎研究室 (2015). 窓の漫画学 : 2014 年度「窓学」研究成果物, [出版者不明].
- lxv. 五十嵐太郎, et al. (2013). 窓の格言学, YKK AP 窓研究所
- lxvi. 東北大学五十嵐太郎研究室.
- lxvii. 五十嵐太郎, et al. (2013). 窓へ : 社会と文化を映しだすもの, 日刊建設通信新聞社.
- lxviii. 五十嵐太郎 and 東北大学五十嵐太郎研究室 (2014). 窓と建築の格言学, フィルムアート社.
- lxix. 五十嵐太郎, et al. (2014). 窓から建築を考える, 彰国社.

- lxx. 五十嵐太郎 and 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻都市・建築デザイン学講座五十嵐太郎研究室 (2017). 世界の美しい窓, エクスナレッジ.
- lxxi. 浩秀李 (2004). "建築物ファサードに用いられるガラスの透過性・反射性に着目した街並み景観上の視覚像に関する研究：都心業務地大阪船場地区を事例として." 都市計画論文集.
- lxxii. 黒川高明 (2005). ガラスの技術史, アグネ技術センター.
- lxxiii. 砂山太一, et al. (2014). マテリアライジング・デコーディング：情報と物質とそのあいだ, millegraph.
- lxxiv. 斎藤昭嘉 (2012). ムサビのガラス, 武蔵野美術大学出版局.
- lxxv. 作花済夫 (2004). トコトンやさしいガラスの本, 日刊工業新聞社.
- lxxvi. 山下カリ (1997). ステンドグラスでつくる, ほるぷ出版.
- lxxvii. 重森千青 (2010). 日本庭園, ナツメ社.
- lxxviii. 出川直樹 and 芸術新潮編集部 (1983). やきもの鑑定入門, 新潮社.
- lxxix. 小暮紀一 and 蜻蛉玉丙午 (2006). トンボ玉, ほるぷ出版.
- lxxx. 小野遼, et al. (2010). ガラスのジュエリー, ほるぷ出版.
- lxxxii. 松井信義 (2009). 知識ゼロからのやきもの入門, 幻冬舎.
- lxxxiii. 松岡純 (2008). "ガラスの破壊とその周辺." NEW GLASS 23.
- lxxxiii. 松山吉秀 (2016). "ジュエリーカットしたガラスを使った光の屈折実験." 東レ理科教育賞受賞作品集 48.
- lxxxiv. 松村潔 (2007). バーナーワーク：酸素バーナーを使った耐熱ガラス工房, ほるぷ出版.

- lxxxv. 松田尚子 (2001). バーナーでつくる小さな妖精たち, ほるぷ出版.
- lxxxvi. 松本昌義, et al. (2000). 木製建具デザイン図鑑 : 建築空間と建具の意匠・納まり : 框戸・フラッシュ戸・棧戸・紙貼障子・襖, 建築知識.
- lxxxvii. 新建築社 (2009). Windows : Innovative mediation = 窓 : メディアとしての境界, 新建築社.
- lxxxviii. 森下恵理子 (1999). "周囲景観のガラス面等への映り込み現象に関する実験研究." 学術講演梗概集. Summaries of technical papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan. D, Environmental engineering.
- lxxxix. 森美術館, et al. (2010). ネイチャー・センス : 日本の自然知覚力を考える : 吉岡徳仁 : 篠田太郎 : 栗林隆 = Sensing nature : Rethinking the Japanese perception of nature : Yoshioka Tokujin : Shinoda Taro : Kuribayashi Takashi, 平凡社.
- xc. 親林和生 (1992). "各種コンクリート壁面へのつる植物による吸着緑化の可能性." 日本緑化工学会誌 18.
- xc. 齊藤幹保 (2015). "クズガ登攀可能な支柱の直径の推定." 日本森林学会大会発表データベース 126.
- xcii. 川瀬敏郎 (2000). 英語で「いけばな」, 講談社インターナショナル.
- xciii. 船越美智代 and 奥二郎 (1998). バーナーを使って, ほるぷ出版.
- xciv. 蔵屋美香, et al. (2019). 窓展 : 窓をめぐるアートと建築の旅, 平凡社.
- xcv. 太刀川光, et al. "曜変天目茶碗の制作." 文部科学省指定「目指せスペシャリスト」事業 生徒研究発表.
- xcvi. 地村洋平, et al. (2019). 夢, 東京藝術大学ガラス造形研究室 : AGC 商品開発研究所.
- xcvii. 竹中司 (2013). "建築におけるコンピューテーショナルデザイン." 情報処理 54.

- xcviii. 中江秀雄 (2013). "鑄造の歴史." 早稲田大学材料技術研究所.
- xcix. 中山繁信, et al. (2016). 窓がわかる本 : 設計のアイデア 32, 学芸出版社.
- c. 中野正貴 (2004). 東京窓景, 河出書房新社.
- ci. 長井宏憲 and 隈研吾 (2009). 素材の系譜 : 動物が巣をつくるようにして建築をつくる, グラフィック社.
- cii. 塚本由晴, et al. (2010). 窓のふるまい学, フィルムアート社.
- ciii. 塚本由晴, et al. (2017). 窓の仕事学, フィルムアート社.
- civ. 土井朋子 (2013). ガラスの絵つけを楽しもう, ほるぷ出版.
- cv. 東京工業大学工学部無機材料工学科 and 山根正之 (1991). はじめてガラスを作る人のために, 内田老鶴圃.
- cvi. 東京工業大学塚本由晴研究室, et al. (2014). 窓と街並の系譜学, フィルムアート社.
- cvii. 藤森照信 (1996). "建築と緑." まちなみ大学講義録.
- cviii. 藤川史雄 (2013). プロメリアハンドブック : エアプランツとその仲間たち, 双葉社.
- cix. 藤川史雄 and 大美賀隆 (2013). ティランジア : エアプランツ栽培図鑑, エムピージェー.
- cx. 内田弘 (2000). "ガラス原料の品質要項." NEW GLASS 15.
- cxii. 内田祥哉, et al. (2017). 内田祥哉窓と建築ゼミナール, 鹿島出版会.
- cxiii. 内田信平 (2008). 建材・設備はどこで何から作られているのか : 建築史上最大の素朴な疑問, エクスナレッジ.

- cxiii. 浜本隆志 (2011). 「窓」の思想史：日本とヨーロッパの建築表象論, 筑摩書房.
- cxiv. 富山市ガラス美術館 and 家住利男 (2017). 家住利男：削りの形 = Iezumi Toshio exhibition : grind to form, 富山市ガラス美術館.
- cxv. 平田, 晃. (2011). 平田晃久：建築とは「からまりしろ」をつくることである, INAX 出版.
- cxvi. 堀江敏幸 (2019). 戸惑う窓, 中央公論新社.
- cxvii. 本間剛 (2011). "いまさら聞けないガラス講座 ガラスの結晶化." NEW GLASS.
- cxviii. 矢代真己, et al. (2003). 20 世紀の空間デザイン：マトリクスで読む, 彰国社.
- cxix. 矢野寛幸 (2001). "ガラスのファサード：空間形式とその表現." 学術講演梗概集. Summaries of technical papers of annual meeting architectural institute of Japan. Urban planning, Building economics and housing problems, History and theory of architecture.
- cxx. of architecture.
- cxxi. 矢野晴也 (1992). "ブリリアント・カットに関する二, 三の計算式." 宝石学会 (日本)講演発表論文要旨.
- cxxii. 林純子 (2004). "石膏溶解剤の成分と溶解性能に関する研究." The Japanese Society for Dental Materials and d Devices.

謝辞

本稿は、筆者が慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科、並びに慶應義塾大学 SFC 研究所 NU 関内拠点ソーシャルファブリケーションラボへ在籍中の研究成果をまとめたものである。本研究に協力していただいた人物に謝意を表す。

同大学の田中浩也教授には、本研究の実施という滅多にない幸運な機会と、そのための万全の環境とを与えていただいた。またその遂行にあたり主査として終始ご指導をいただいた。ここに深謝の意を表す。石川初教授、並びに鳴川肇准教授には、副査として多大なご助言をいただくとともに、建築設計を志す者として”普通でない”制作活動とキャリア形成に関し、親身な相談に乗っていただいた。ここに深謝の意を表す。

共同研究先である株式会社竹中工務店の中島奈央子様、大野定俊様、杉田敬太郎様、高柳菜穂様、花岡郁哉様を始めとする皆様には、実証実験のための素晴らしい敷地の用意と、それに伴う様々な調整をしていただいた。加えて、実験方法の考案や、そのデータの開示を快く引き受けていただいた。心より感謝する。

AGC 株式会社の河合洋平様を始めとする皆様には、ガラスのコーティングの実験に全面的にご協力いただくとともに、ガラスのアーティストの方々と知識を交換する機会を設けていただいた。心より感謝する。

武蔵野美術大学の太田俊二様、硝子企画舎の井上剛様には、ガラスのことなど右も左もわからない研究の初期に、貴重な絶版本も含め、数多くの役に立つ文献を具体的に勧めていただいた。また、施設を見学・使用させていただき、どのような設備や道具を揃えれば良いのかを示していただいた。心より感謝する。

NU 関内拠点ソーシャルファブリケーションラボの益山詠夢様には、イギリス流の指導法にて大学卒業後より刺激的なデザインをご指導いただいた。ここに感謝の意を表す。大野一生様、常盤拓司様、皆様には、都市部のオフィスビル内という特殊な研究環境をハード／ソフト両面から最大限整備していただくとともに、筆者の体調まで気にかけていただいた。ここに感謝の意を表す。

関内の向かいの席からいつも気遣ってくださった立川博行さん、Reactive Wall Project に携わった田岡菜さん、久保木仁美さん、河井萌さん、青山新さん、名倉泰生さん、伊藤ららさん、共に修士論文を書き上げた若杉亮介さん、脇本智正さんを始め、切磋琢磨した田中浩也研究室の皆さんに謝意を表す。

図版作成に多大なご協力をいただいた小杉真一郎さん、鈴木貴晴さん、園田哲郎さんに謝意を表す。

研究が滞った時に叱咤激励し、多数の有益な助言をしてくださった佐野虎太郎さんを始め、慶應 SFC の友人らに謝意を表す。

最後に、金銭面・生活面でのサポートを一切惜しまず、24 時間支え続けてくれた家族に感謝する。

2020 年 1 月 9 日

徳重早織