

建築 3D プリンティング技術への応用を見据えた
コンクリート造形に発現する光沢斑紋形質の探求



令和7年度 卒業プロジェクト 成果報告
「建築 3D プリンティング技術への応用を見据えた
コンクリート造形に発現する光沢斑紋形質の探求」

慶應義塾大学 総合政策学部 平井瑛大
指導教員 田中浩也

Abstract

近年、建築分野における3Dプリンティング技術は、その技術的成熟を背景に、造形特性に基づく固有の建築表現を実現する手段として注目されている。建築3DPが介入する領域の一つにコンクリート施工における型枠設計への寄与が挙げられるが、この領域における新たな建築表現として「光沢斑紋」と称する光学的形質を提案する。光沢斑紋は表面起伏と付与された光沢から生まれる反射光であり、光源や視点の位置関係によって視覚像が定まるという現象の偶発性を有している。3DP造形の持つ有機的形状への特性を通じて、この形質がコンクリート造形に拡張されることで、新たな視覚効果が立ち上がっている。本研究ではその基礎的検討として、複数の試作実験や既存の建築表現との比較検討を踏まえ、その形質や表現可能性を記述的に整理した。また本探求は、これまで「ノイズ」として捉えられてきた積層痕に、価値転換の新たな側面を見出すものでもある。

Contents

1. 序論

1.1 建築3DPをめぐる議論の発展経緯	9
1.2 本研究の着眼点：新たな造形特性「光沢斑紋」	10
1.3 本研究の目的と構成	11

2. 建築3DPの技術動向と表現の潮流

2.1 セメント系3DPの施工分類	14
2.2 積層造形による特性と制約	19
2.3 近年の実践事例	20

3. 動的な視覚効果を伴う建築表現の整理

3.1 Sun glitter	29
3.2 Caustics	30
3.3 映り込みによる空間調和	32
3.4 鏡面による注視効果	34

4. 造形プロトタイピング

Experiment1	40
Experiment2	44
Experiment3	52

5. 総括

5.1 造形実験を通じて獲得された知見の整理	64
5.2 光沢斑紋の把握	65
5.3 水面反射のアナロジー	65
5.4 積層痕による新たな価値創出	65
5.5 本研究の限界 / 終わりに	67

Reference - Text	68
------------------	----

Reference - Figure	70
--------------------	----

Acknowledgment	72
----------------	----

建築分野における 3D プリンティング技術（以下、建築 3DP）は、研究開発と社会実装の両面において急速な進展を見せている。研究が先行する欧米や中国、東南アジア、中東といった地域の知見を参照しながら、日本においても研究開発が進められてきた。特に建設産業の DX が喫緊の課題とされる中、建築 3DP は施工プロセスの省人化・生産性向上に寄与する工法として注目されており、これまで政府を含む様々なプレイヤーが研究開発に取り組んできた。さらに、近年では日本国内においても実施工の事例が散見されるなど、社会実装が着実に進みつつある。

そして、建築 3DP への注目は単なる生産効率化にとどまらず、造形特性に基づく固有の建築表現を実現する手段としての役割についても論点化されつつある。本章では、この建築 3DP をめぐる議論の発展経緯を整理しつつ、近年注目の高まる造形特性に基づく建築表現の検討に向けて、その新たな一側面として「光沢斑紋」と称する光学的形質を提案する本研究を位置づける。

fig1. 欧州最大の 3DP 建築 ,WAVEHOUSE in Heidelberg, ドイツ（出典後述）



1.1 建築 3DP をめぐる議論の発展経緯

建設産業では、労働人口の減少と熟練技能者の引退が同時並行で進行している。働き方改革に基づく時間外労働の削減も相まって、これまでのような労働集約的な施工プロセスを維持することは困難である。日本における生産年齢人口の減少は疑いのない将来トレンドであり、生産性向上は喫緊の課題であった。実際に国土交通省が 2016 年に生産性向上や業務・組織・風土といった働き方の改革を目指す「i-Construction」を施策に掲げるなど、建設産業の DX は国家全体の重要な課題として取り組まれてきた。2024 年には施工プロセスのデジタル化と自動化を加速させる「i-Construction2.0」として更なる指針が定められるなど、その推進力は一段と高まっている。[1][2]

建築 3DP は、従来の施工プロセスを前提としない「機械制御による建設手法」である。機械化による省人化や熟練技能に依存しないという期待から、実際の建設現場での運用を見据えた研究開発が進められてきた。現在では R&D に位置付けられるような実験的造形を超えて、建設事業を企画・統括する立場にある大手デベロッパーや総合建設会社が、建築 3DP の研究開発に主体的に取り組んでおり、将来的な建設手法の一選択肢として検討を進めている。中でも研究開発が盛んなのがセメント系材料を用いた施工領域であり、材料研究が他材料に先行して蓄積されてきたことで、実施工の事例を含めて社会実装が進んできた。

そして、建築 3DP の社会実装が着実に進展する中で、その評価は省人化や機械化といった生産効率化の手段にとどまらず、新たな造形手法として固有特性や表現可能性についても注目がなされており、新たな論点として重心が移りつつある。この議論は、これまで主として研究・デザイン領域で蓄積されてきた。社会実装の文脈でも将来的な建築価値として想定されており、まずは実建築としての成立を目指し技術条件が優先的に検討されてきた。近年、こうした技術的成熟が一定程度進んだことで、研究・デザイン領域で展開されてきた造形表現にまつわる議論と、実施工を前提とした社会実装とが具体的に接続され始めている。

1.2 本研究の着眼点：新たな造形特性「光沢斑紋」

このように、技術的成熟が一定程度進んだ建築3DPは、造形特性に基づく固有の建築表現を実現する手段としての役割が求められるようになった。本研究では、建築表現として接続しうる新たな造形特性として「光沢斑紋」と称する光学的形質を提案し、その表現の可能性と実建築にてもたらしうる効果について一連の試作実験を通じて検討する。

光沢斑紋とは、表面に形成された有機的なうねり形状の起伏に応じて鏡面反射が局所的に生じることで現れる、光沢が斑状の模様を成す視覚像のことである。この形質は、コンクリート造形にも発現させることができ、3DP型枠を通じて有機的な形状を転写することと樹脂コーティングによって光沢を付与させることで実装される。光源および視点の位置関係に応じて視覚像が変化する点に

特徴があり、動的な視覚効果をもたらす。このような動的な視覚効果は、すでに建築分野において実践的に用いられてきた表現手法であり、ここに本形質を持つコンクリート部材を建築表現へと接続する可能性を見出している。

また、本形質は有機的なうねり形状を持つ光沢素材の造形物に観察される現象であるが、先行事例より大型の3DP造形においても発現することが確認されている。荒井ら(2022)によれば、光沢を有する樹脂素材と表面テクスチャを組み合わせた大型3DP家具において、同様の光源および視点の位置関係に応じて動的に変化する光沢による模様が確認されている。fig.3で示すのは、大小二種類の半球を敷き詰めた“Bubble”と称されるパターンに発現する光沢斑紋の様子である。[3]



fig2. 光沢斑紋形質を発現させたプロトタイプ (PLA 3DP)



fig.3 光沢斑紋形質の発現する大型3DP家具 (出典後述)



fig4. 光沢斑紋コンクリートとその構成材料

1.3 本研究の目的と構成

本研究は、将来的な建築3DPへの応用を見据え、3DP型枠を用いたコンクリート造形に見出される光沢斑紋と称する光学的形質について、その基礎的検討を行うものである。3DP型枠を用いた造形試作とその観察を主たる研究手法とし、制作過程および完成した造形物の分析を通じて、その特性を把握・整理する。動的な視覚効果を伴う既存の建築表現を参照しながら、本形質が実建築においてもたらしうる効果について考察する。なお基礎的検討として位置付ける本研究では、構造性能や施工合理性の検証には立ち入らず、あくまで表面に発現する光学的形質の記述と検討を対象とする。

第二章では、本研究が応用を見据える建築3DPについて、セメント系材料を用いた施工領域における技術動向と、建築3DPにおいて標準的な手法である

材料押出方式の積層造形の表現可能性について事例を交え整理する。これは建築3DP領域において現在何が実現可能なかを把握することを目指している。第三章では、動的な視覚効果を伴う建築表現の事例を記述的に分析し、光沢斑紋形質と建築表現の接続可能性を検討する。これは第五章での本形質の将来的な応用可能性の議論を見据えて、既存実践を整理するものである。第四章では、目的の異なる三種類の造形プロトタイプを行い、本形質の発現条件および表現上の特性を検証する。第五章では、一連の試作および検討を通じて得られた知見を踏まえ、光沢斑紋形質の特性を整理する。特に第二章・第三章で整理した、技術的実現可能性と将来的な応用可能性を踏まえて、試作実験を通じた考察と展望を示す。同時に、その限界についても言及する。

Part2 建築 3DP の技術動向と表現潮流

2.1 セメント系 3DP の施工分類

本節では、本研究が応用を見据えるセメント系材料を用いた施工領域について整理する。これは建築 3DP の研究開発の中でも特に社会実践が進む領域である。セメント系材料が特に注目されてきた背景には、そもそもコンクリートが長年にわたり一般的な構造材料として用いられてきたという前提がある。さらに、セメント系材料は、建築 3DP で標準的な手法である材料押出方式において、

要求される物性条件への適合性が高い。そのため、既存のコンクリート施工を再編する手法や、セメント系材料そのものを 3DP の材料に用いる手法などといった様々な検討が行われてきた。

ここでは、① 3DP によって型枠を製作する手法、② 建設部材自体を造形する手法、③ 埋没型枠を用いたハイブリッド型の手法の三類型に分けて、その動向を整理する。

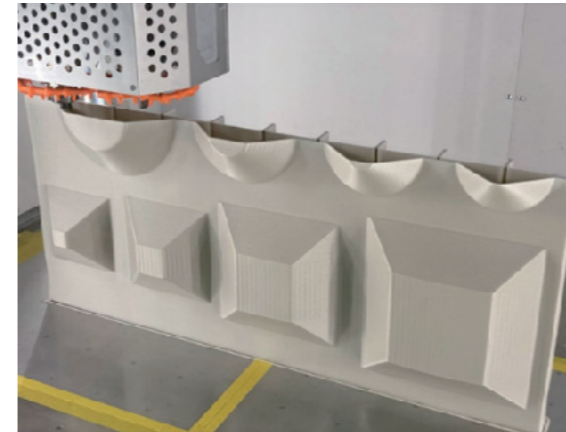


fig.5-1,2
三井化学株式会社と郡家コンクリート工業株式会社による
意匠コンクリート開発（出典後述）

3DP によって型枠を製作する手法

本手法では、従来のコンクリート施工を前提とするものとして、部材形状を規定する型枠を 3DP によって製作する。機械制御による製作は、既存工法の抱える熟練技能への依存や労働集約的な作業工程を代替・軽減するものとして機能する。型枠製作以外の打設、養生、品質管理といった施工プロセスが既存工法と等しいため、現行の生産システムや法規制と整合性を保ちやすい。[4]

また 3DP による型枠は、従来の木製・鋼製型枠では製作負荷の高かった、曲面形状や有機的形の造形に特性が認められる。例えば、大阪関西万博の「いのちめぐる冒険」パビリオンでは、生命感ある質感を表現するために、3DP 型枠を用いて有機的な凹凸形状のコンクリートパネルを製作している。これは、建築表現として活用される造形特性の事例として改めて説明する。

一般的にこの手法では、型枠としての強度を確保でき 3DP 造形が容易な熱可塑性のプラスチック材料が用いられる。さらに、近年ではセメント系材料などを用いて型枠自体を造形し、撤去せずに残置する「埋没型枠」として活用する手法も検討が進んでいる。これはハイブリッド型の手法として後述するものである。



fig.6 いのちめぐる冒険
パビリオン外壁に用いられる意匠コンクリート（出典後述）

建築部材自体を造形する手法

これは、セメント系材料を用いて建築部材を直接造形する手法である。三次元制御されたノズルを移動させながら、フレッシュ状態のセメント系材料を連続的に押し出し、所定の経路に沿って積層することで造形する。これは材料押出方式の積層造形と呼ばれ、材料にはノズル内を円滑に移送可能な「押出性」と、積層後に上層部の自重を支持し過度な変形を生じさせない「積層性」が同時に要求される。セメント材料の硬化特性や流動特性を踏まえつつ、これらの要件を満たす複合材料の検討が進められてきた。

本手法は、型枠を原理的に不要とする点において、従来のコンクリート施工を大きく刷新するものである。同時に、これは建築基準法をはじめとする構造安全性や施工品質に関する現行の評価制度や法規制が想定しない手法であることを意味し、事実、制度的枠組みの整備は追いついていない。このような背景から、現時点の実践は、その多くが構造安全性に直接関与しない屋根の仕上げ部や外装体などの非構造体への適用を中心としている。

実証的な事例も検討が進んでおり、各種強度試験を踏まえた特別な認可を得ることで構造体として適用するものもある。具体的な実証事例として、清水建設潮見イノベーションセンター内の駐車場底構造施工を取り上げる。清水建設は、押出性や積層性を確保した繊維補強セメント複合材料「ラクツム」を開発した。本材料は、プリント層の稠密性や、合成繊維配合による高靱性といった特性を備えているほか、粗骨材を添加するなどの改良が施され、構造用材料として建築基準法上の指定建築材料として国土交通大臣の認定も取得している。本施工事例では、写真が示すように、駐車場底構造の一部に軸方向鉄筋を配置した積層造形を構造体として用いている。[5]

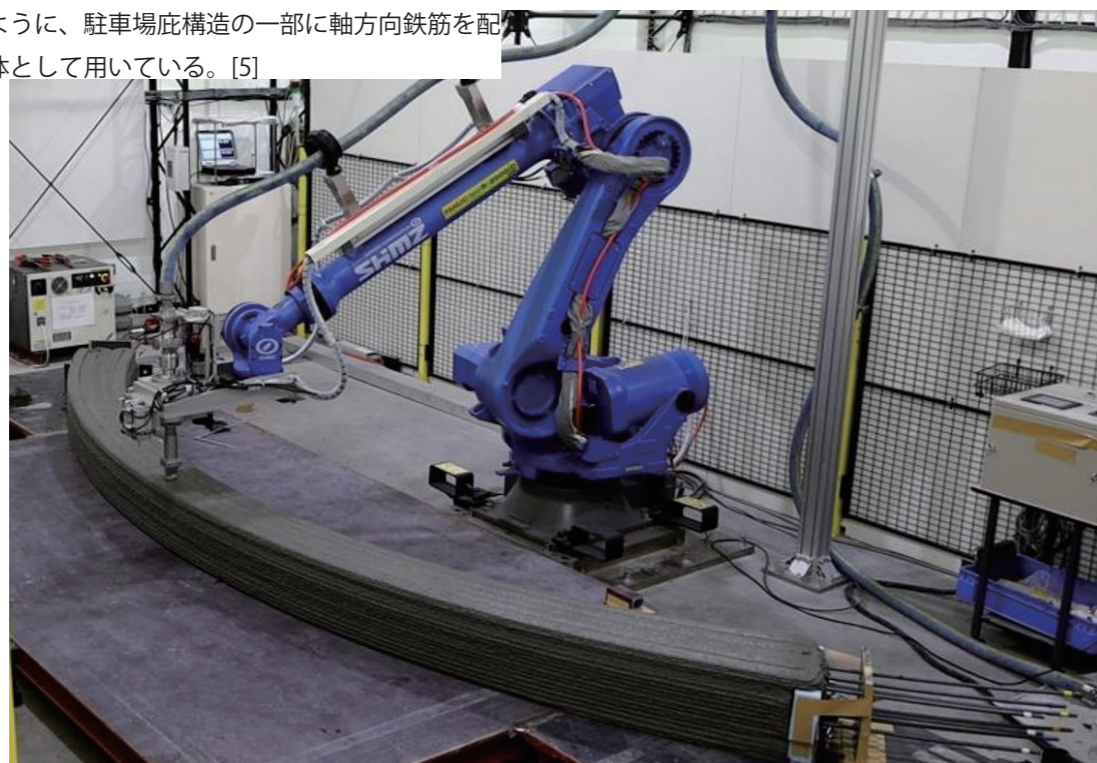
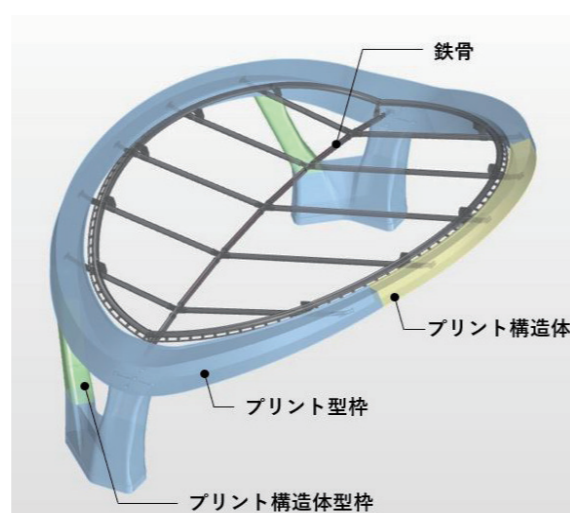


fig. 7-1,2,3 清水建設 駐車場底構造 (出典後述)

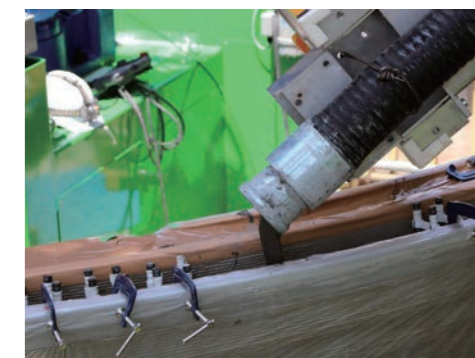


fig. 8-1,2,3,4
大林組「3dpod™」(出典後述)

埋没型枠を用いたハイブリッド型の手法

これは、セメント系材料などを用いて造形した建築部材を埋没型枠として活用する手法である。埋没型枠は、打設後に撤去される通常の型枠とは異なり、打設後も建築物内に残置される型枠である。これは、構造安全性に直接関与しない非構造体に位置付けられるものの、柱や壁体といった構造体の打設時において最終的な外形や施工品質に強く関与する。既存の施工プロセスや制度的枠組みとの整合性を保ちながら、省人化や機械化に強く寄与する最も社会実践が進む手法である。

本手法によって躯体を一体の建築物として施工する、株式会社大林組の実証棟「3dpod™」事例を参照する。本事例では、施工現場に設置する建築 3DP によって曲面形状を持つ外殻をオンサイトで造形した。造形物は埋没型枠として機能し、躯体としての形状を規定するほか、内外装材としても活用されている。本事例は、新材料・新工法を用いた建築物として構造耐力の性能評価を経て国土交通大臣の認定を取得しており、これにより建築確認を得ている。[6]

本手法の適用は先事例にとどまらず、2025 年 8 月には土木学会コンクリート委員会が技術指針を示すなど、産業全体への深化を伴うものとして取り組みが進められている。[7]



fig.9 材料噴射型 3DP (出典後述)

このように本節では、特に研究が進むセメント系材料を用いた施工領域について動向の概観をつかむことを目指した。建築 3DP が国家全体として取り組まれる建設産業の DX 施策として期待されることを念頭に、大手デベロッパーや総合建設会社による先行的な研究開発や実証事業を交えて整理した。一方で、建築 3DP の実践はそれらに限定されておらず、実際の施工を担う中小規模の施工業者やスタートアップを含めて、多様なプレイヤーの関与の中でこれまでの研究開発が行われてきた。今後は制度整備や技術指針の検討と歩調を合わせながら、より一層裾野を広げた社会実装に取り組んでいくところである。[8]

また、技術的観点からいえば、本節で主として取り上げた材料押出方式に限らず、他の造形手法についても研究開発が進められている。例えば、鉄筋に対してセメント系材料を吹き付けることで構造体を形成する材料噴射型 3DP などは、鉄筋コンクリート施工の機械化として検討が行われている。[9]

2.2 積層造形による特性と制約

建築 3DP の社会実装が着実に進展する中で、新たな造形手法としての固有特性や表現可能性についても注目がなされてきた。ここでは、その造形原理に基づく固有特性を整理する。

造形表現について議論を行うにあたり、その具体的な造形原理に立脚しなければ、その表現特性や制約条件を十分に捉えることはできない。もちろん、3DP を「あらゆる形状を実現しうる装置」として理解する枠組みは建設 DX への期待としては適切であり、躯体と表現造形を一体として構成できる点や、形状データによって施工プロセスが直接決定される点など実施工に変容を促す側面も認められる。加えて形状データ毎に異なる造形を行えることは、多品種少量生産の手法としてオーダーメイド施工を容易にするものである。ここでは、現在の建築 3DP の実質的な標準手法である「材料押出方式の積層造形」に限定して造形特性を整理する。

設計自由度の高さと称される形状に関する特性を取り上げる。材料押出方式による積層造形では三次元制御された経路に従い、造形物そのものを一体として直接積層する。そのため、組立工程を前提とした部材単位への分離や接合方法、型枠造形を前提とした脱型手順といった設計条件が存在しない。また、既存の施工プロセスにおいて前提とされてきた構造安定性や施工合理性に立脚した、直線部材や平面要素といった設計条件も必須ではない。一方で、積層安定性・可能性という固有の制約が求められ、設計上考慮しなければならない。原則、下部に自重を支える構造を持たない中空部は自壊する。これらの制約は、積層する各層のせり出す角度を制限するオーバーハングという設計や、造形物を輪郭部と内部充填構造に二分する設計などを用いて解消される。また形状は三次元座

標情報の集合として記述されるため、コンピュータショナルデザインと親和性が高い。これらの諸条件を踏まえ、曲面形状や有機的形狀といった既存工法とは異なる造形が、固有の特性として立ち上がっている。

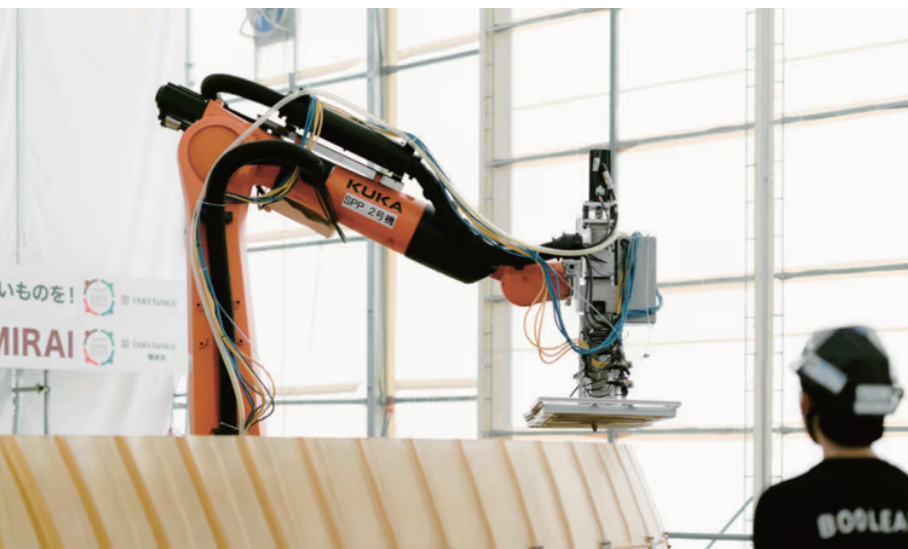
材料という観点からも言及する。材料押出方式による積層造形では、前述したセメント系材料の研究過程の通り、押出性と積層性が求められる。スケールや個別案件ごとの制約も多く詳細は後述する実例に説明を託すが、異なる要件が課されることで既存の工法では必ずしも適格的でなかった素材や配合が、新たな造形適性をもつ材料として顕在化する場合がある。

また造形に伴う不可避の特性には、積層痕と呼ばれる線状の痕跡や、押出時の揺らぎなどが現れた側面の凹凸形状が存在する。この副次的作用は、他の造形手法との比較の中で、造形時のノイズとして制御すべき対象として扱われる。一方で、あえて積層痕が大きく発現するような設計を通じて、固有の造形表現として活用されるデザインも行われている。[10]

このように、建築 3DP は造形原理に由来して固有の表現特性を立ち上げてきた。これはあくまで、既存工法とは異なる領域に特性と制約が認められることに過ぎないが、結果的にこれまで建築に活用されていなかった造形特性として、新たに“拡張”されたように認識されている。そして、これらの造形特性は建築表現として検討され、どのように実施工へ接続しうるのか、実証が進められている。次節では、造形特性を実際に建築表現として検討をした具体的な事例として、その最新動向が集積していた 2025 年大阪関西万博における建築 3DP の活用事例を紹介する。

2.3 近年の実践事例：大阪関西万博での活用

2025年に開催された大阪関西万博では、建築 3DP の固有造形特性を建築表現として検討する施工事例が集積していた。



森になる建築

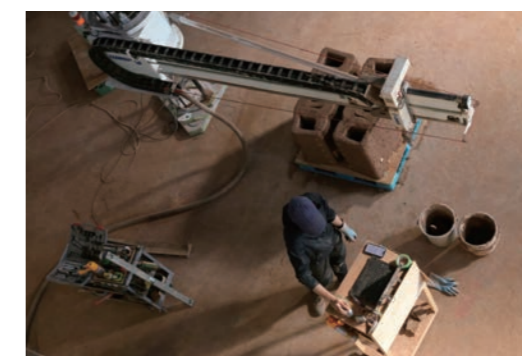
代表企業・設計：株式会社竹中工務店
竣工：2025

酢酸セルロース樹脂によるこの仮設建築は、スクラップ&ビルドを前提とした従来の建築の在り方への疑問に端を発した、「会期終了後、微生物によって分解され土に還り、やがて森へと移行する建築物」である。外装材には、日本の草木の種を漉き込んだ手づくりの和紙を用いており、その制作や維持管理にも来場者を巻き込んでいった。採用された材料を用いた建築 3DP は前例のない挑戦であったが、試行錯誤の末に「生分解性樹脂を構造材として一体造形した、世界最大の 3D プリント建築」としてギネス世界記録に認定されるまでのものとなった。オンサイト造形による本建築は、材料の無駄を出さない建築としても既存工法を刷新する。人と自然をつなぐ、この建築の新たなチャレンジは会期後も続いており、2026年3月にも本プロジェクトを取り仕切った竹中工務店の所有林に移設され、分解の過程へと移る予定である。[11][12]

fig.10-1,2,3 (出典後述)



fig.11-1,2,3,4 (出典後述)



Gorge

設計：Aki Hamada Architects
竣工：2025

これは、土を出力することが可能な建築 3DP を用いて構築された、「峡谷のような建築とランドスケープ」である。これらの形態は、3D スキャンを通じて、自然界に存在する有機的な起伏や浸食地形をサンプリングして作られている。複数の部材に土プリントが用いられ、また一部の部材では、オンサイトで構造を出力する試みも行われた。材料には、日

本の伝統構法である土壁に着想を得て、土・粘土・藁・顔料・海藻糊、そして硬化剤である酸化マグネシウムを用いている。これらは強度や造形安定性といった技術的要件を満たすだけでなく、すべて国内で調達可能であり、会期後に自然へ還ることを前提に選定された。[13]



fig.12-1,2 (出典後述)

いのちめぐる冒険

設計: OSO/ 小野寺匠吾建築設計事務所
竣工: 2025

「建築やデザインを通して地球環境を回復に向かわせるための探求 / Restorative Design Exploration」をレガシーに掲げる本パビリオンは、海で広がる低環境負荷建築システムに挑戦している。セルと呼ばれる方向性のない構造モジュールが不規則に積み上げられた形をなす本建築は、会期後にモジュール単位で解体・再輸送され、新たな建築物として再構成されることを前提として設計された。その規格も海運効率を考慮したものである。加えて、外装材に用いたコンクリートパネルは、新たに開発した海水を用いて練り上げる工法によって製作した。これは、将来顕在化する水資源問題に対する建築的な応答を示す試みである。

本パビリオンを設計した OSO は、そのデザインリサーチ組織である OSO Research と共に、本プロジェクトを内包する「Restorative Design Exploration」を継続してきた。公開されている資料からは、「See House Project」として、今回新たに開発された海洋親和性の高いコンクリートを海底に設置し、海洋生物のための「海の家」として活用する可能性について検討が行われていることが読み取れる。ここでは、建築が役割を終えた後も、海洋生態系の一部として機能し続ける未来像が構想されている。これらのコンクリートパネルは 3D プリント型枠によって有機的な表面形状が付与されており、生命感のある質感を備えた建築表現として機能する。また、海中設置後には生物の定着を促す機構として作用することも示唆されるだろう。[14][15]



fig.13-1,2,3,4 (出典後述)

島の小さな蜃気楼

設計 : PONDEGE, farm, NOD
3DP 設計協力 / 製造 : VOID, ND3M
竣工 : 2025

3D プリントで成形されたポリカーボネートパネルは、周囲の風景や光を写し込む外装材として機能する。これは、「光や風、人の動きに応答し、時間とともに表情を変える蜃気楼のように存在する」というコンセプトから、周囲に立ち並ぶ象徴的なパビリオン群に対し、あえて背景化するように配置され、風景の中に滲むように佇む姿を目指し、設計されたものである。

造形過程で生じた試作品や不適合部材は破碎・再利用され、原料として再び製作プロセスに組み込まれている。これはポリカーボネートが持つ熱可塑性によって再成形が可能な性質と、破碎されたペレットを材料に用いる材料押出方式の積層造形プロセスに起因するものである。[16][17]

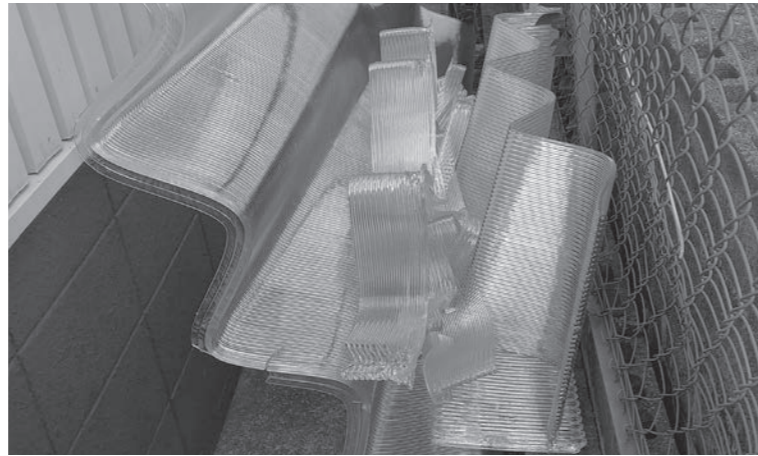


fig.14-1,2 破碎による再利用ペレット (出典後述)



fig.15 (出典後述)



fig. 16 (出典後述)

HOTABENCH

設計 / 製造 : 清水建設, 甲子化学工業
竣工 : 2025

コンクリート施工と織り交ぜることで、廃棄されてきた帆立貝殻を材料として活用する。この事例は、大阪関西万博の Co-Design Challenge プログラムに基づく清水建設と甲子化学工業の協業によるものである。両社はこれまで、それぞれ建築 3DP によるコンクリート施工と、廃棄される帆立貝殻に材料によるアップサイクルに取り組んできた。[18]

清水建設はこの協業事例の他にも、体験型サウナ施設プロジェクト「太陽のつぼみ (TAIYO TSUBOMI)」に参画しており、先述のセメント系複合材料「ラクツム」を用いて、施設内の水風呂の施工を建築 3DP にて行なった。[19]

TAIYO TSUBOMI

設計 : KOMPAS
竣工 : 2025



fig.17-1,2 (出典後述)

Part3 動的な視覚効果を伴う建築表現の整理

本章では、光沢斑紋の持つ、光源および視点の位置関係に応じて見え方が変化する動的な視覚効果に着目し、これまで建築分野においてそのような効果を意図的に用いてきた表現事例を整理することで、両者の接続可能性を検討する。

このような表現には特に水面が用いられてきた。水面が波立つことで視覚像が動的に変化するために、空間に時間的変化や偶発性を与える表現として活用されており、周囲の景観を映し込む鏡のような表現にも活用される。これはガラスや金属など非流体素材を用いることで水平面から拡張された表現もなされている。さらには曲面や多面形状などを用いて、構造体そのものに固有の鑑賞効果を与える表現も行われる。これらの鏡面反射は、視点の移動によって視覚像が変化する。この移動動作に合わせて視覚像が呼応する現象は、歩行時の注視行動を喚起するものとして考えられる。

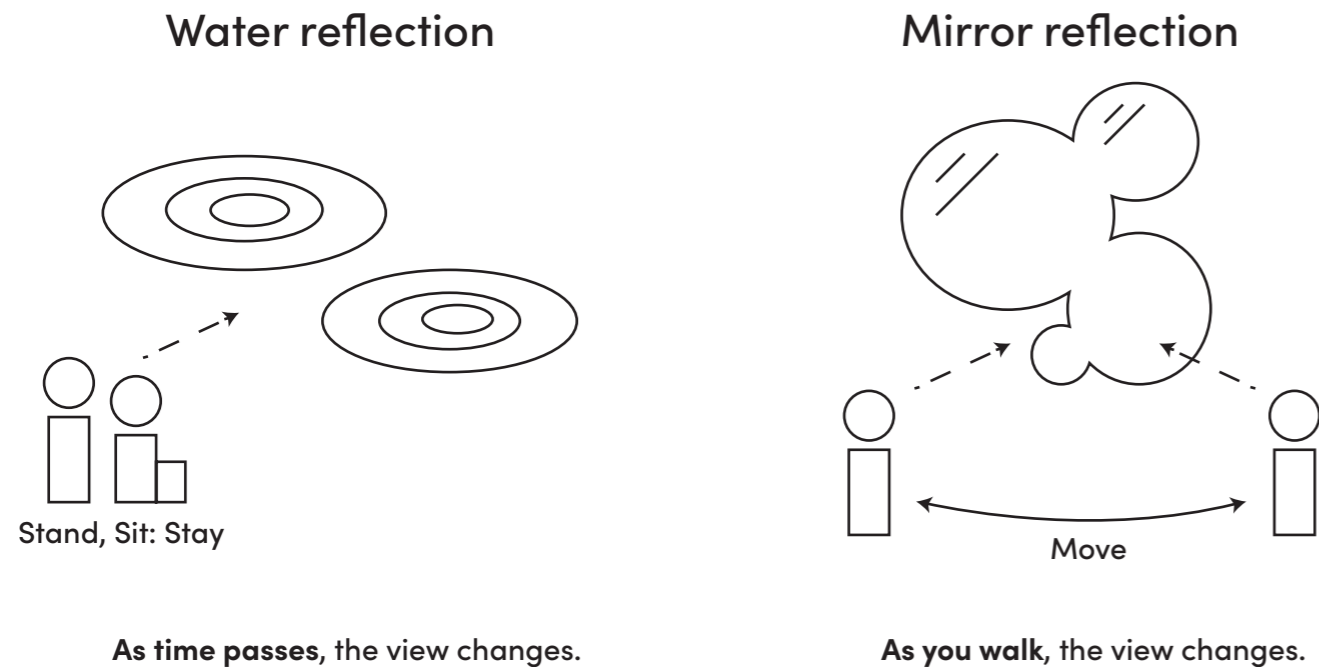


fig.18 水面反射と鏡面反射の模式図

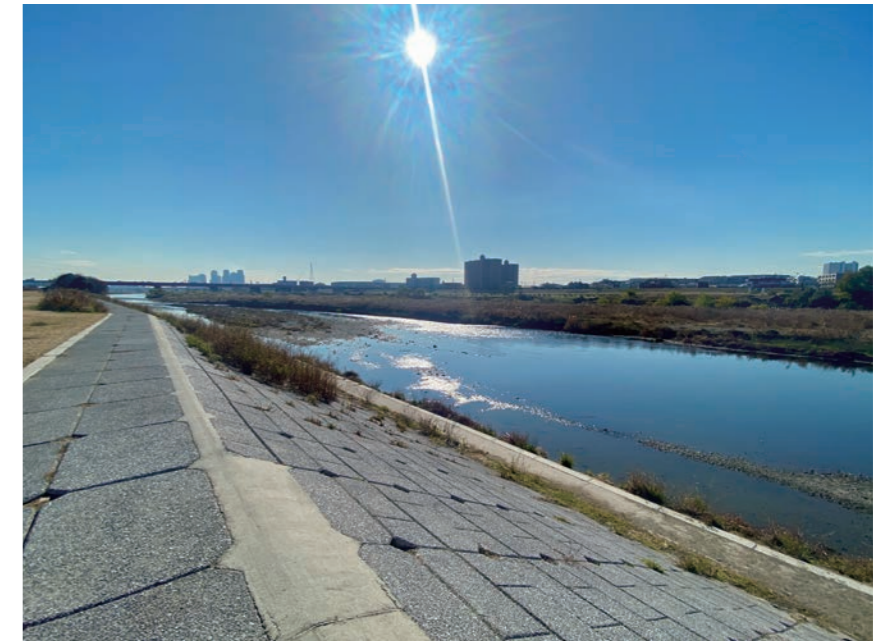


fig.19 二子玉川河川敷（二子玉川公園）

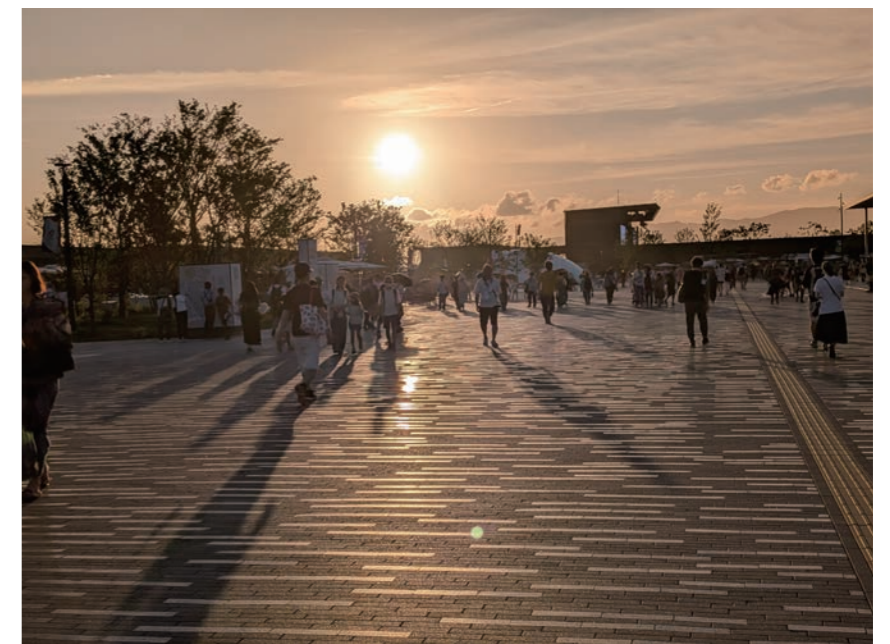


fig.20 大阪関西万博での夕日を反射する舗装面， SNS 投稿より（出典後述）



fig.21 雨天時に舗装面が作る夜間景観（慶應義塾大学湘南藤沢キャンパス）

3.1 Sunlitter

Sunlitter とは、太陽光が水面に反射する際、微細な水面の揺らぎや起伏に応じて、強い反射光が粒状あるいは帯状に分布して知覚される現象を指す。これは水面そのものを鑑賞対象とするため、狭義の建築にとどまらず水辺景観の整備といったランドスケープにおいてもその効果が取り入れられてきた。[20]

また類する反射現象は、夜間においても観察される。街灯や住居灯などの人工光源が暗闇の中で相対的に強い光源として機能することでこの現象もたらされ、美しい夜間景観を創出する一因をなしている。[21]

また、この反射効果は水面に限らず光沢を有する素材上にも発生する。光沢を持たないアスファルトやタイルなどの舗装面であっても、表面が水に濡れることで反射特性が強調され、景観を生み出すことがある。

3.2 Caustics

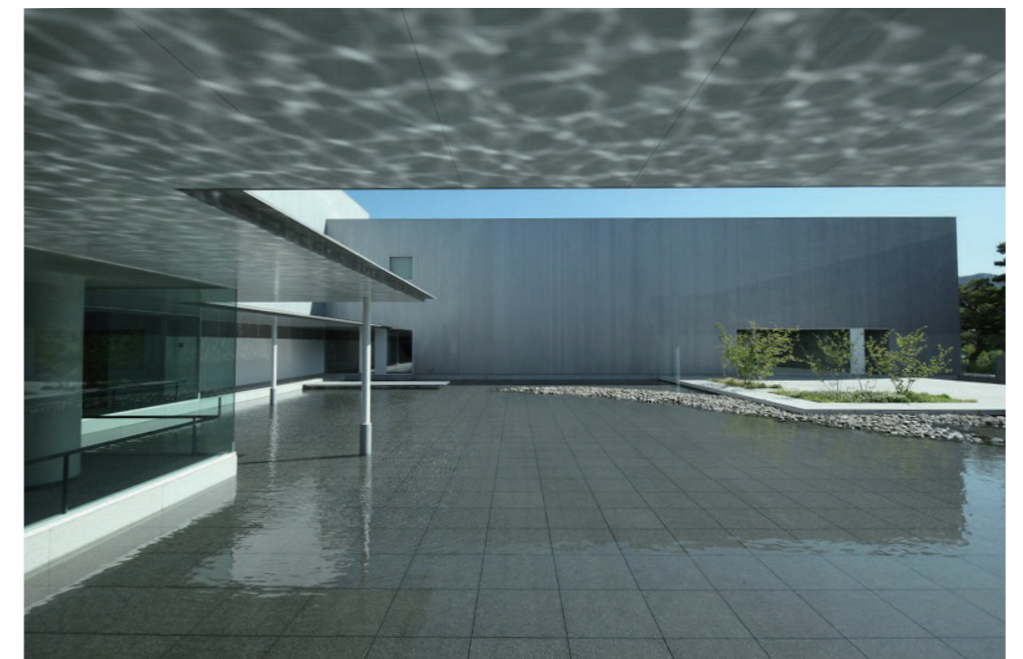
Causticsとは、曲面状の媒質や反射面を介して光が集中・分散することで、周囲の面に特徴的な光の模様が投影される現象を指す。代表的な媒質が水面であり、波打つ表面による反射・屈折の結果として、壁面や床に揺らぐ光の斑紋が現れる。この現象は、Sunglitterにおける反射光が周囲の面へと投影された状態とも捉えることができ、同様にその効果が見出されてきた。



fig.22 Caustics 現象 (出典後述)



fig.23-1,2 東京ミッドタウンにおける天井の水流が作る地下道路の景観, 筆者撮影



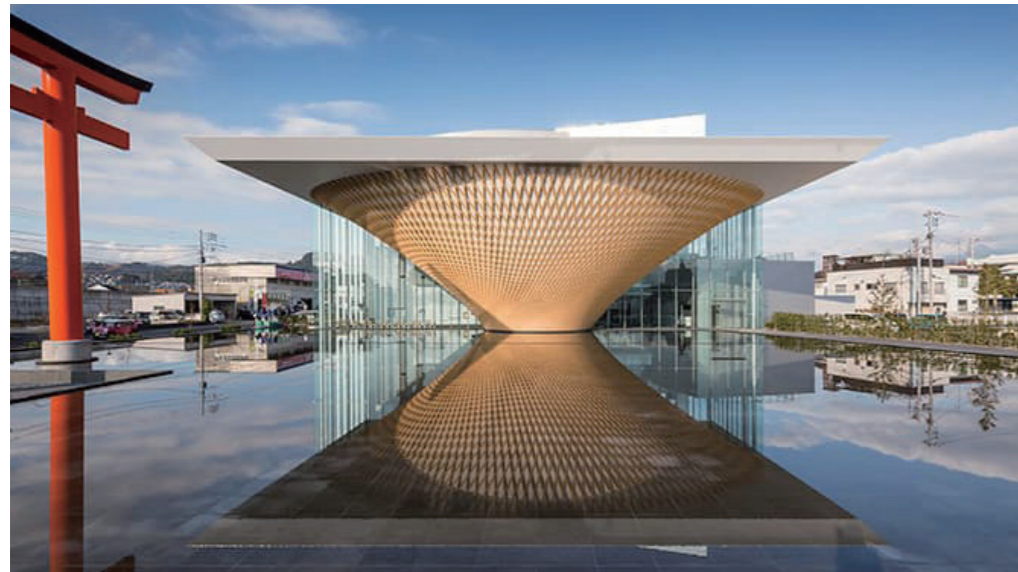
長野県立美術館 東山魁夷館

設計: 谷口吉生 竣工: 1990

fig.24-1,2 (出典後述)

3.3 映り込みによる空間調和

水面や鏡面に生じる映り込みは、周囲の景観や自然環境を建築内部に取り込むことで、実態としては分断される建築と自然をシームレスにつなぐ機構として働く。モダン建築においては、建築を合理的・自律的な構成体として成立させながらも、光や風景といった外部環境との関係性を重要な設計要素として位置付けており、水盤などのかたちで空間調和の手法として取り入れてきた。さらに、これは、建築に限らず逆さ富士のような自然景観そのものに固有の景観価値を生み出す現象としても捉えられている。



静岡県富士世界遺産センター

設計：坂茂建築設計

竣工：2017

fig.25-1,2
(出典後述)



fig.26-1,2,3 (出典後述)

ルーヴル・ランス

設計：妹島和世＋西沢立衛／SANAA, Co-Concepteurs: Tim Culbert + Celia Imrey / IMREY CULBERT, Catherine Mosbach.

竣工：2012

3.4 鏡面による注視効果

曲面や多面形状として構成される鏡面構成体は、反射像の分断や歪みといった固有の鑑賞効果を与える。視点の変化に応じて反射像が連続的に変化するため、移動動作への干渉性が高い。人間の歩行に呼応して変化する光景は、こうした固有の鑑賞効果と相まって、視線を引き寄せる表現として活用されている。



LOUIS VUITTON GINZA NAMIKI

設計：青木淳建築計画事務所, LOUIS VUITTON MALLETTIER, エイチアンドエイ, 清水建設
竣工：2021

fig.27-1,2,3 (出典後述)



大阪関西万博 シグネチャーパビリオン「null²」

設計：NOIZ 竣工：2025

fig.28 (出典後述)



ビルバオ・グッゲンハイム美術館

設計：フランク・O. ゲーリー 竣工：1997

fig.29 (出典後述)

Part4 造形プロトタイピング

本章では、三種類の造形プロトタイピングを通じて、光沢斑紋の発現のあり方と建築表現への接続可能性を検討する。改めて光沢斑紋とは、表面に形成された有機的なうねり形状の起伏に応じて鏡面反射が局所的に生じることで現れる、光沢が斑状の模様を成す視覚像のことである。本試作実験は、この光沢斑紋をコンクリート造形にも発現させることを目指したものであり、3DP 型枠を通じて有機的な形状を転写することと樹脂コーティングによって光沢を付与させることで実装した。具体的には、①型枠の作成、②コンクリートの打設、③樹脂コーティング、の三工程を経て実装しており、これらは三種類の造形プロトタイピングの全てに共通する工程である。本実験ではその材料に、家庭用として市販される骨材を混合させたセメントと、主剤と硬化剤を混合して硬化させる二液式エポキシ樹脂を用いている。[22]

本章で扱う三種類の造形プロトタイピングの概要は以下の通りである。

Experiment1 は、卓上機スケールによるコンクリートパネルの試作を通じて、実際にどのような視覚像を伴って発現するかを把握するものである。ここでは、型枠形状や造形条件の差異によって複数のサンプルを制作した。

Experiment2 は、建築模型の試作を通じて、本形質を有する造形が建築として構成された際に、空間や景観にどのような印象を与えるかを検討するものである。また、コンクリートを用いた制作は、実施工の過程を追体験する試みとしても位置づけられる。

Experiment3 では、実際の建築 3DP に用いられるスケールに近い大型機材を用いた試作を行った。光学的形質は数値的なシミュレーションが難しく、またその現象はスケールに正しく比例しない。これは、卓上機スケールで確認された表現が、実施工に近い造形条件において成立しうるかを検証するものである。

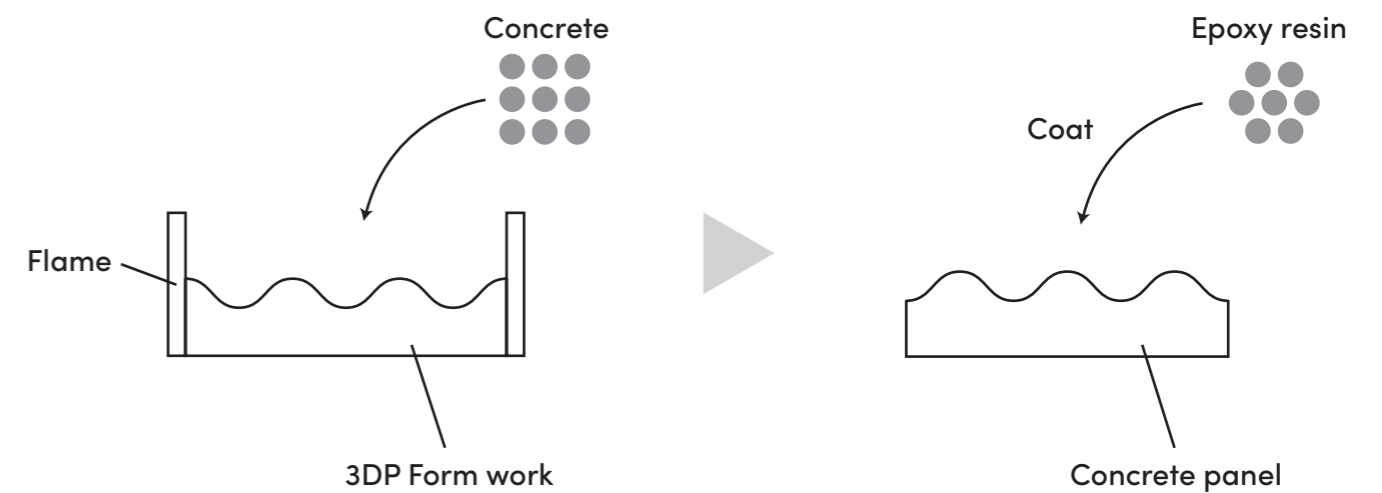
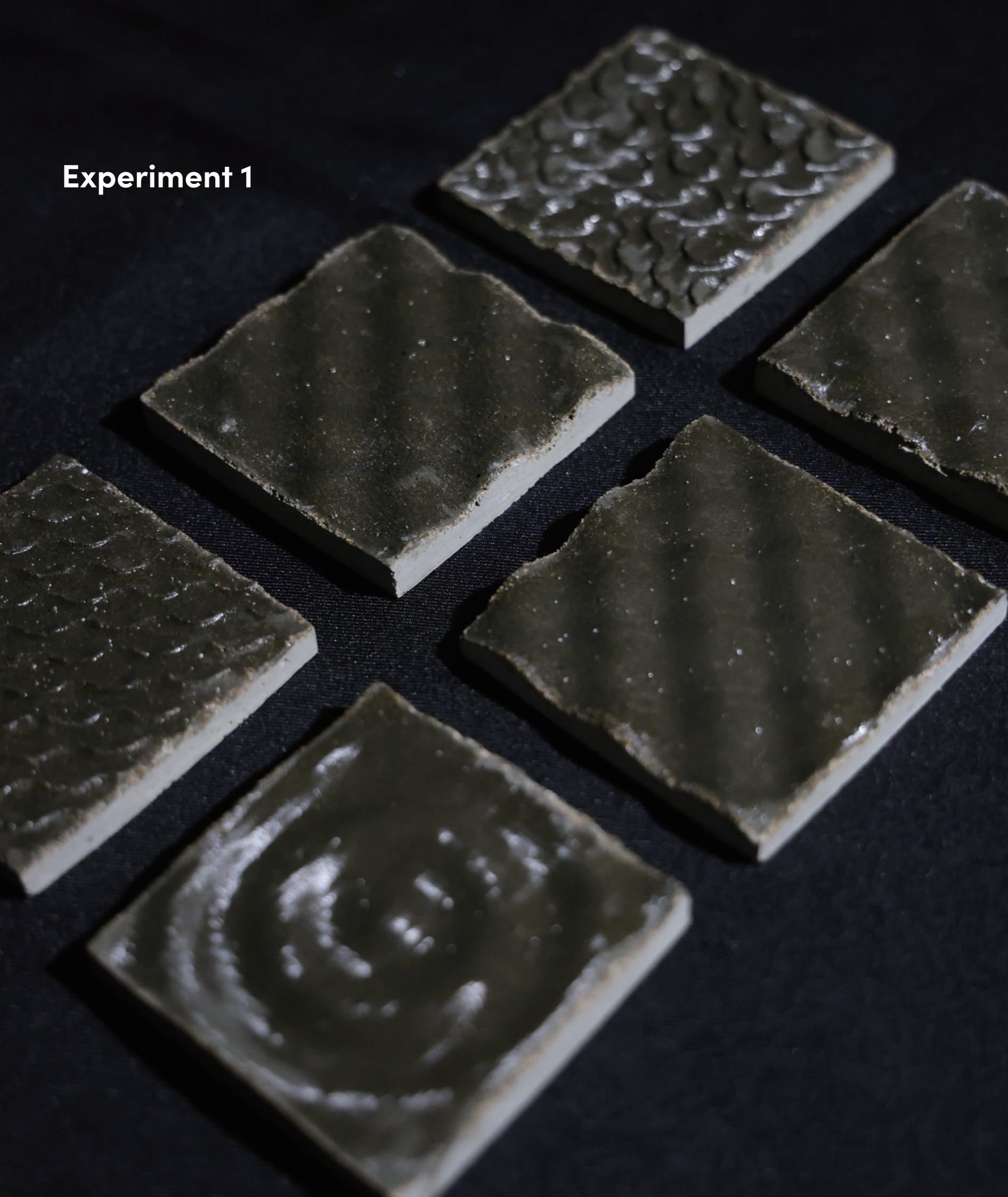


fig. 30 制作プロセスの図示

Experiment 1



Concept

本造形実験では、卓上機スケールによるコンクリートパネルの試作を通じて、光沢斑紋が実際にいかなる視覚像を伴って発現するのかを把握することを目的とした。コンクリート表面に転写される形状は、型枠の設計および印刷方法に大きく依存する。そこで本実験では、①使用する形状モデル、②造形時の印刷条件という二つの条件を設計変数とし、複数の試作モデルを作成した。

Process

型枠の作成について、本造形では「Bambu Lab A1 mini」という卓上型の3DPを用いて行った。0.4mm径のノズルやPLAのフィラメントを用いるなど、ごく一般的なセッティングである。造形面の大きさは70*70(mm)として設計した。コンクリートに転写される表面形状は、光沢斑紋の発現に寄与すると想定したうねり形状を持つことを念頭に、RhinocerosとGrasshopperを用いて設計した。[23][24][25]

また3DPの造形条件による視覚像の変化を観察するために、同一のモデルに対して積層ピッチの変更やFuzzy Skinの適用を行った。このモデルには、直交する二方向に周期的な起伏を持つ波状曲面を採用した。これは、「 $z = \sin(x) \times \cos(y)$ 」という式の通り、直交する2つの正弦波の積として定義され、極大値と極小値が市松模様状に交互に現れる周期的な曲面である。これは、その形状から「Egg crate surface」と称されるもので、本研究でもそのように表記する。[26] 積層ピッチを設計変数とするサンプルは、他のサンプルと共通する0.2mmピッチに加えて、0.1mmと0.4mmピッチの合計三種類を作成した。

これらの型枠を用いて制作したコンクリートパネルには、前述の二液式エポキシ樹脂を筆で塗布することによって光沢を付与している。

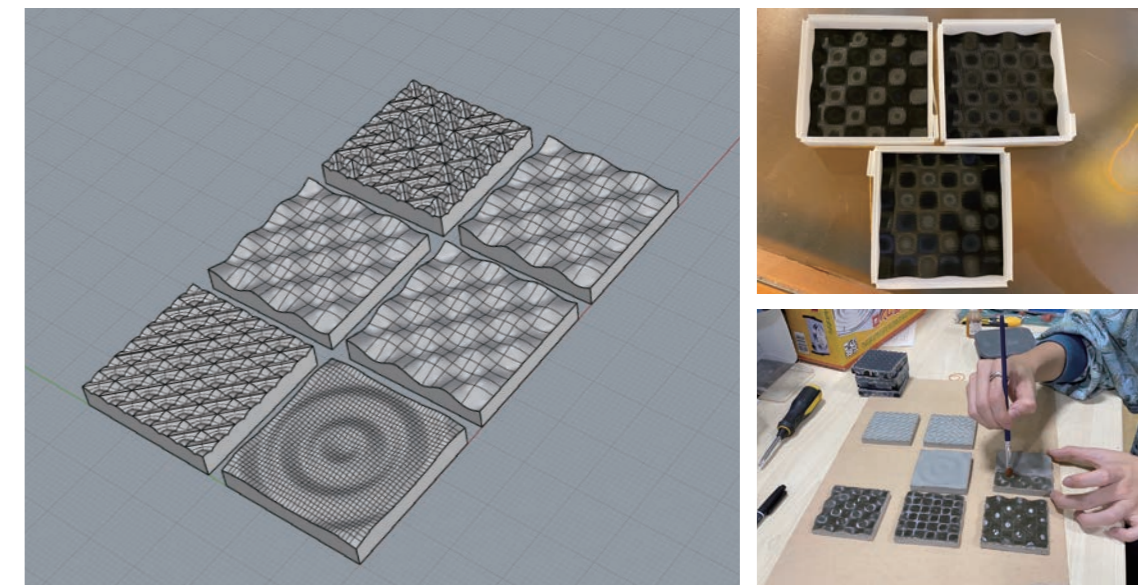
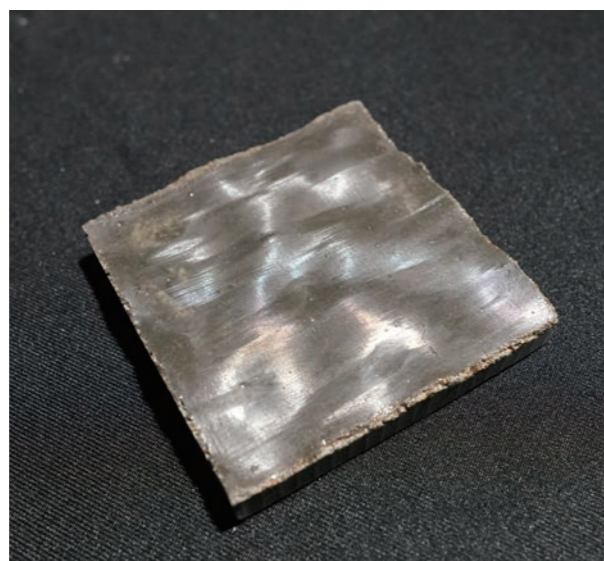


fig. 31-1,2,3 設計モデル及び作業工程の様子

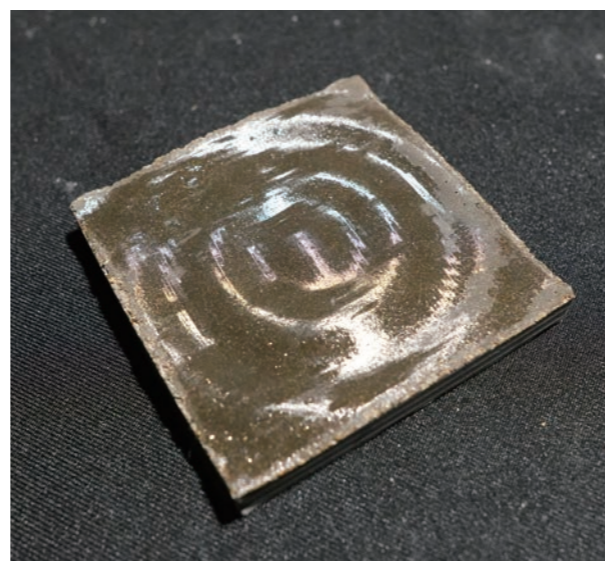
Observation

各サンプルは右に示すような視覚像を有している。本形質は鏡面反射に該当する光学的形質であり、視点や光源の移動によって視覚像が変化する。この様子の詳細は、第三の検討で示すより大きなサンプルにその説明を託す。さらに、樹脂コーティングによってコンクリート表面は濡れたような質感が付与され、斑状あるいは帯状に現れる光沢と相まって、水面反射を想起させるアナロジーが成立している。本研究が提案する、光沢斑紋形質と建築表現の接続可能性は本造形実験を経て見出されたものである。撮影した写真では反射光に虹色の色彩が観察でき、屈折現象が生じていることを推察できるが、これは肉眼では観察できなかった。

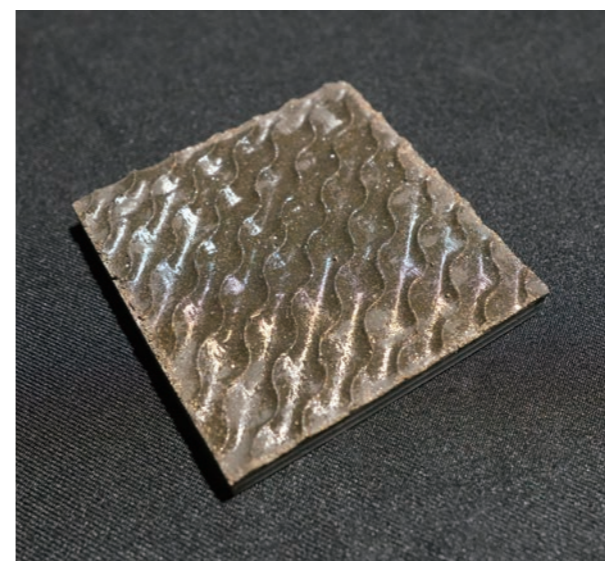
印刷条件を設計変数として設定したサンプルを比較すると、0.4mm や Fuzzy Skin サンプルのように表面に凹凸をもつ形状では、光沢斑紋に伴う陰影が強調される傾向が認められる。この凹凸と陰影の関係性は、第三の検討で示すより大きなスケールのサンプルを通じて、より詳細な様子が観察できた。詳細は後述する。



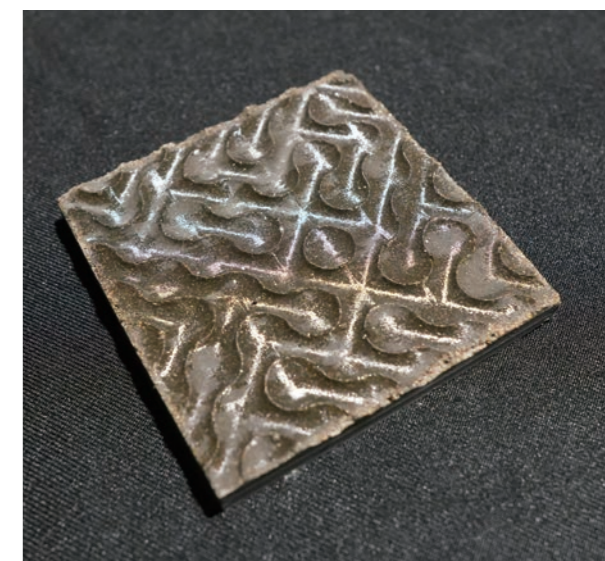
Sample1: Random



Sample2: Sine-wave



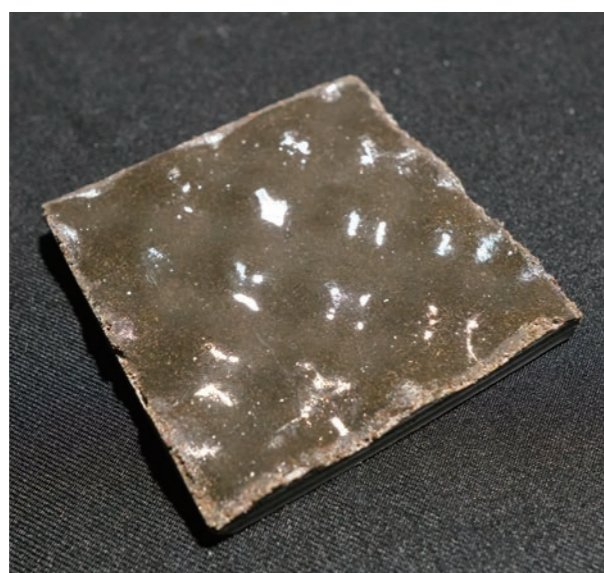
Sample3: Tiling pattern 1



Sample4: Tiling pattern 2

形状モデルに関するサンプル All Samples: 0.2mm Pitch

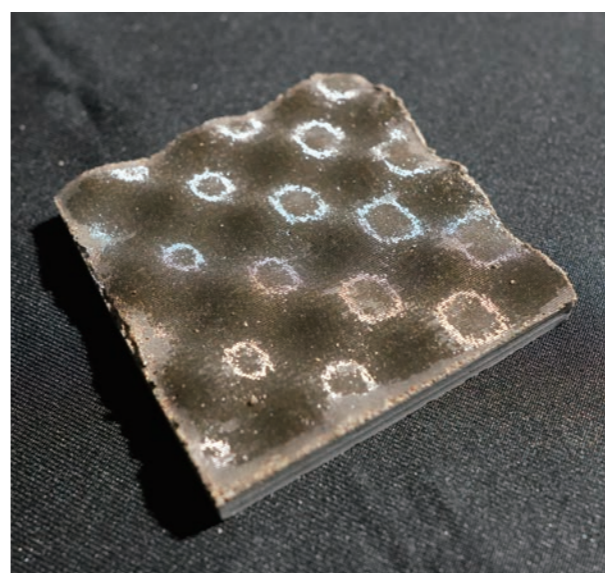
造形条件に関するサンプル All Samples: Egg crate Surface



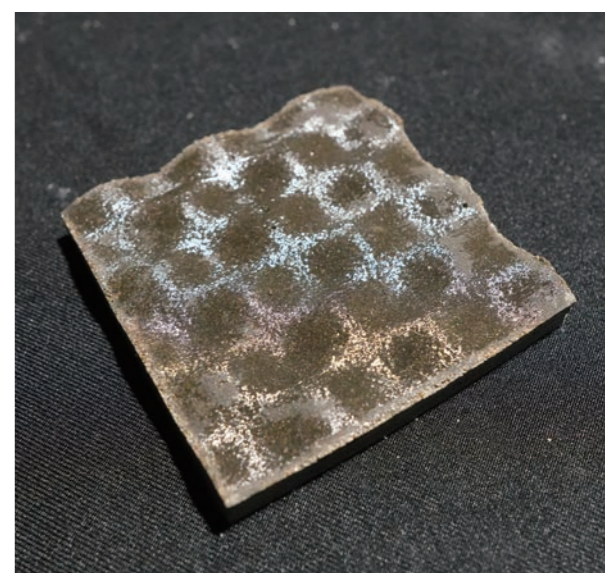
Sample5: 0.1mm Pitch



Sample6: 0.2mm Pitch

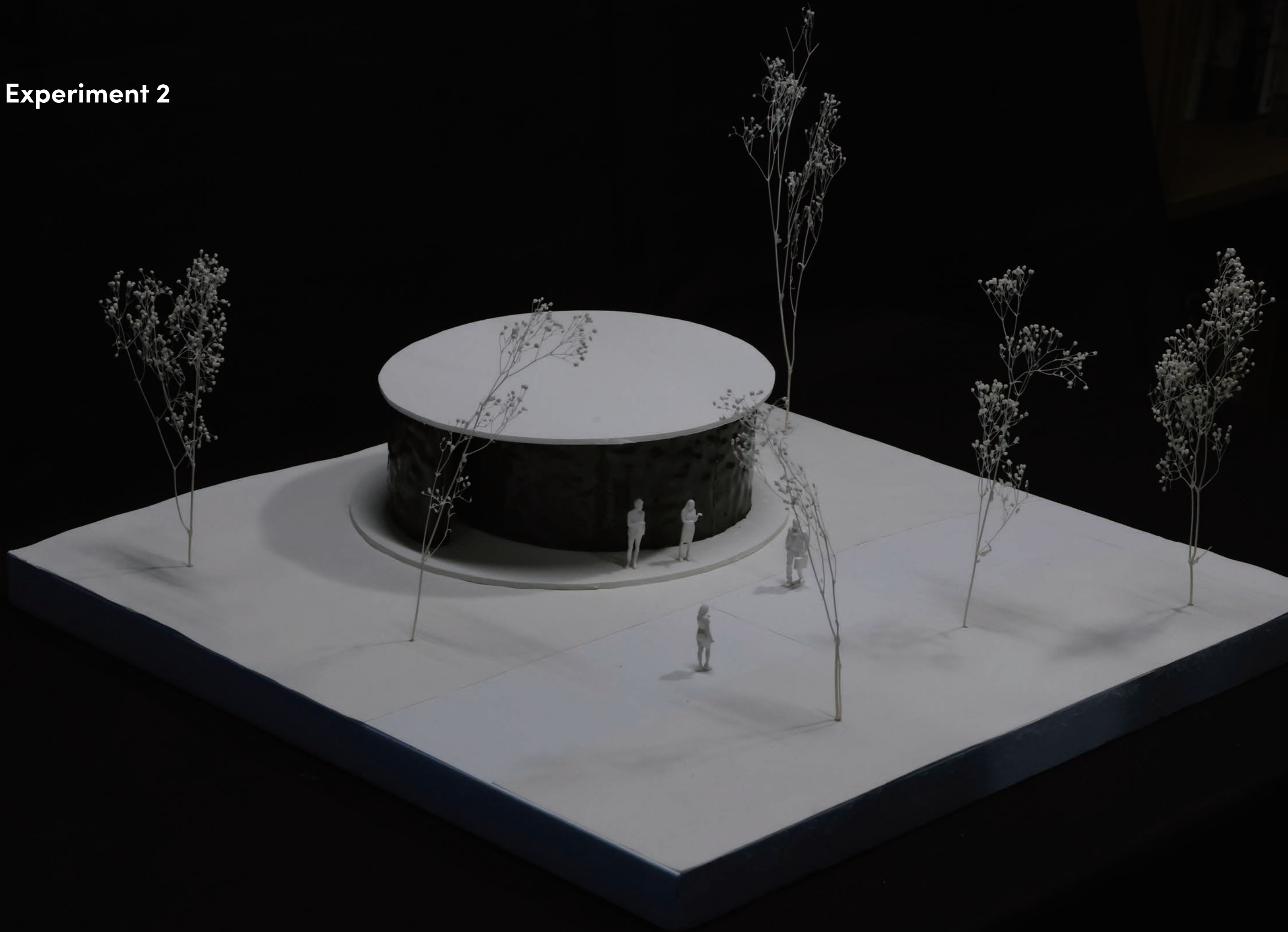


Sample7: 0.4mm Pitch



Sample8: Fuzzy skin(0.2mm Pitch)

Experiment 2



Concept

本造形実験では、建築模型の試作を通じて、本形質を有する造形が建築として構成された際に、空間や景観にどのような印象を与えるかを確認した。本建築模型では、屋外において意匠的な表面形質が有効に機能する場面を想定し、公衆トイレをケーススタディとして選定した。公衆トイレは、公共空間における視認性の担保されない閉鎖空間として防犯上の重点箇所として位置付けられてきた。本形質や建築表現の鏡面による注視性質が、当該建築への関心を引き立てることで、防犯作用が見出されることを意図している。

このような設計意図は、以下のような先行研究・事例に基づいている。建物や都市空間などの物理的環境を制御することで犯罪抑止を図る「防犯環境設計 (CPTED)」では、住民と犯罪者の意識と行動に影響を及ぼして間接的に犯罪を減少させるアプローチとして、被害対象へ住民の目が自然と行き届くような環境を整備する「監視性 (surveillability)」を取り上げている。[27] これに関連して、歩行者の視点に立った先行研究では、人通りや周囲からの視線が感じられる環境が、心理的安心感の獲得に寄与することが指摘されている。[28] また、犯罪者に自身の犯罪行為を阻害した要件をアンケート調査した研究では、住民の目や人通りの存在が、自身の行為が察知される可能性を高め、犯罪行為を実行することへの抑制要因として作用したことが示されている。[29]

また公衆トイレに意匠性を取り入れた事例として、「誰もが快適に利用できる公共トイレを」をコンセプトに、東京都渋谷区内の公衆トイレ 17 カ所を意匠的な建築によるアートトイレとして刷新した「The Tokyo Toilet」プロジェクトが挙げられる。本事業は、最新設備の導入やバリアフリー化、衛生的なメンテナンス体制の整備を含むものであるが、事業に参画した日本財団が 6 カ所のトイレを対象におこなった利用実態調査によれば、事業実施後には、これまで公衆トイレの利用を避けていた女性利用者が調査対象のすべての箇所において大幅に増加していたことが確認された。また、意匠性が人の目を集めることを念頭に、安心して利用できるようになったとする利用者の声も報告されている。[30][31]

また、本建築模型の作成において、本形質を付与する構造体は実際にコンクリートを用いて制作した。スケールは異なるものの、型枠の構造やその脱型手順、コンクリート打設の過程が実施工と等しく、そのプロセスを追体験するものとして機能する。[32] 本造形では打設後に撤去する一般的な型枠プロセスによって制作したが、実施工においては同様の造形を埋没型枠を用いた手法によって実装できる。

Process

設計した建築物は二つの弧状の壁体によって構成される。建築模型は 1/50 のスケールとし、公衆トイレという場面設定から周辺に 4m 幅の道路や樹木、利用者などを配置した。型枠は、造形物の形状を規定する 3DP 型枠とそれを固定する木材フレームの二種類に分けて設計した。二つの壁体は同一の形状であり、型枠も洗浄を経て繰り返し使用したが、型枠の損傷や造形物の荒れなどは観察されず、問題なく造形が行えた。

建築模型の観察においては、通常のライティングに加え、街灯を想定した複数の光源によるライティングも実施している。

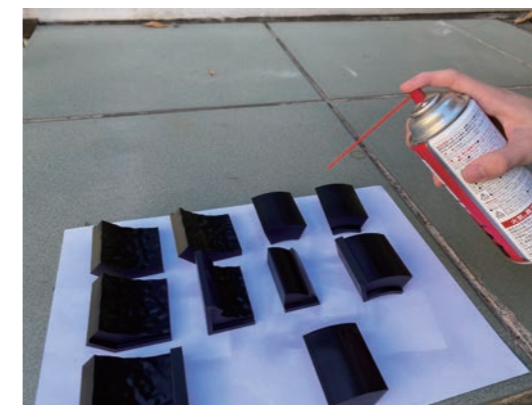
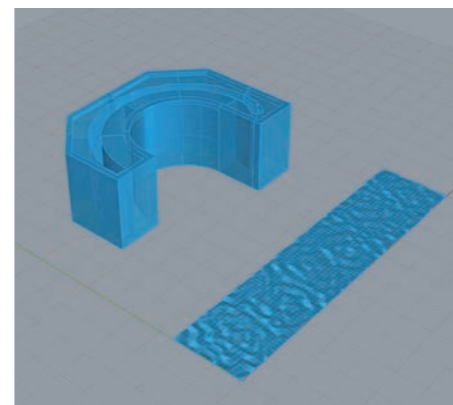


fig. 32-1,2,3 設計モデル及び作業工程の様子



fig. 33 Caustics 現象の視認性が高まるように編集を施した写真

Observation

光沢斑紋を付与した本建築模型は、次ページの写真のような空間や景観を創出する。また左の図が示すように表面反射による Caustics も観察された。一方で、こうした景観を意図的に制御することの難しさも明らかとなった。光源条件や視点の位置など複数の要因が相互に関与する現象であり、その結果として立ち上がる景観は、偶発性に大きく依存するものである。



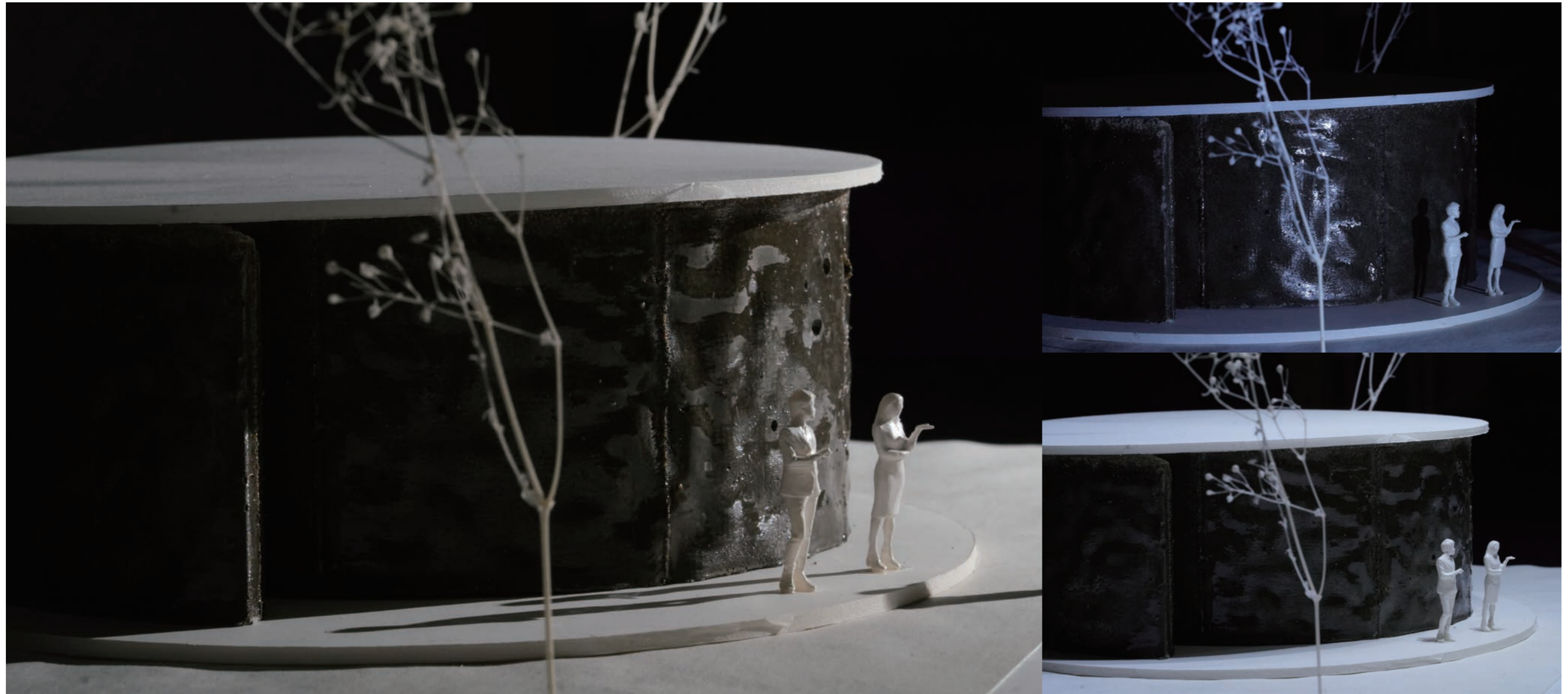


fig. 34 同一画角にて、ライティングを変更したもの



Experiment 3

Concept

本造形実験では、実際の建築 3DP に用いられるスケールに近い大型機材を用いた試作を行う。光学的形質は、微細反射の計算負荷や実素材のムラなどの不安定要素から数値的なシミュレーションが難しく、またその現象はスケールに正しく比例しない。本実験は、卓上機スケールにおいて確認された視覚像が、実施工に近い造形条件においても成立するかを検証するものである。特に、これまでの検討から、本形質の発現には積層痕に起因する表面の凹凸形状が関与していることが示唆されており、この関係性が実寸に近いスケールにおいても保持されるかを検証した。

造形は、第一の検討で用いた「0.4mm ピッチの egg crate surface」モデルを基準とし、積層ピッチの変化量に対応させながら、形状を保持したままスケールを変動させた。

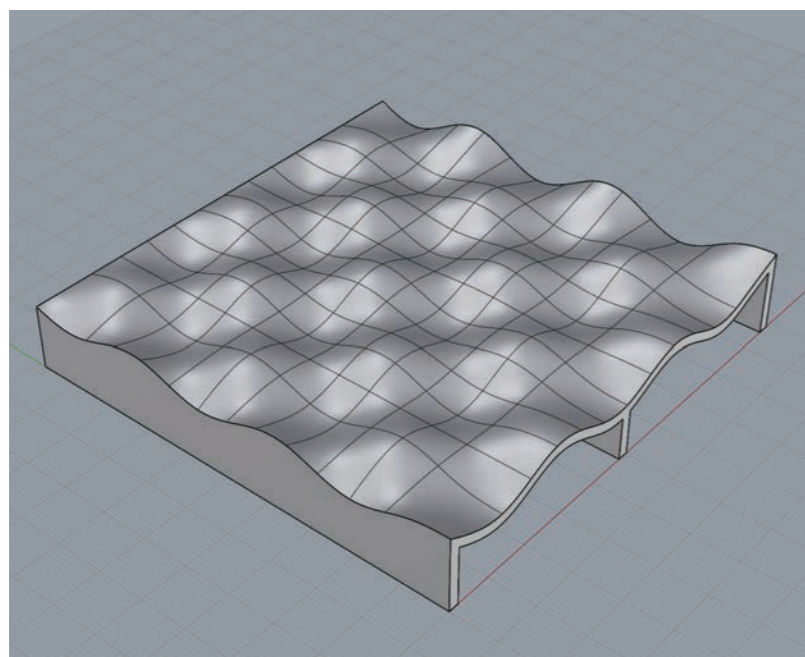


fig. 35 設計モデル

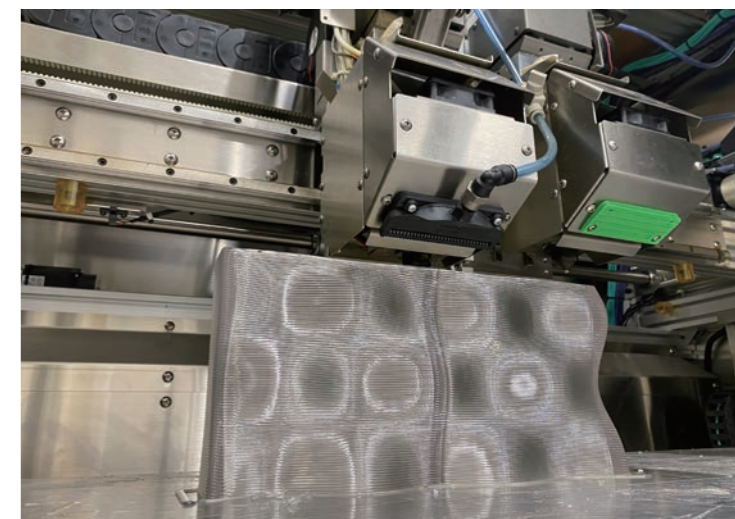


fig. 36-1,2,3,4 作業工程の様子

Process

型枠の印刷には、エス・ラボ株式会社が開発したペレット式の家具スケール 3DP の「ArchiFab IRORI(GEM550D)」を用いた。[33] 4mm 径のノズルを用いて 2mm ピッチで積層し、また材料にはペレット状の PETG を用いた。使用したモデルは第一の検討で用いた「0.4mm ピッチの egg crate surface」モデルを基準としたもので、積層ピッチが 0.4mm から 2mm に変化することに合わせて、全体のスケールを 5 倍とした。高さ方向を一部トリムするかたちで造形面のサイズを 350*290(mm)としている。また、以降の造形工程は第一の検討

と変わらないものである。

型枠脱型については、小さいスケールの試作と比較して固着傾向が観察されたものの、これは、小槌によって振動を与え固着面に空気を流入させることで解消された。総じて、比較的容易に取り外すことができた。

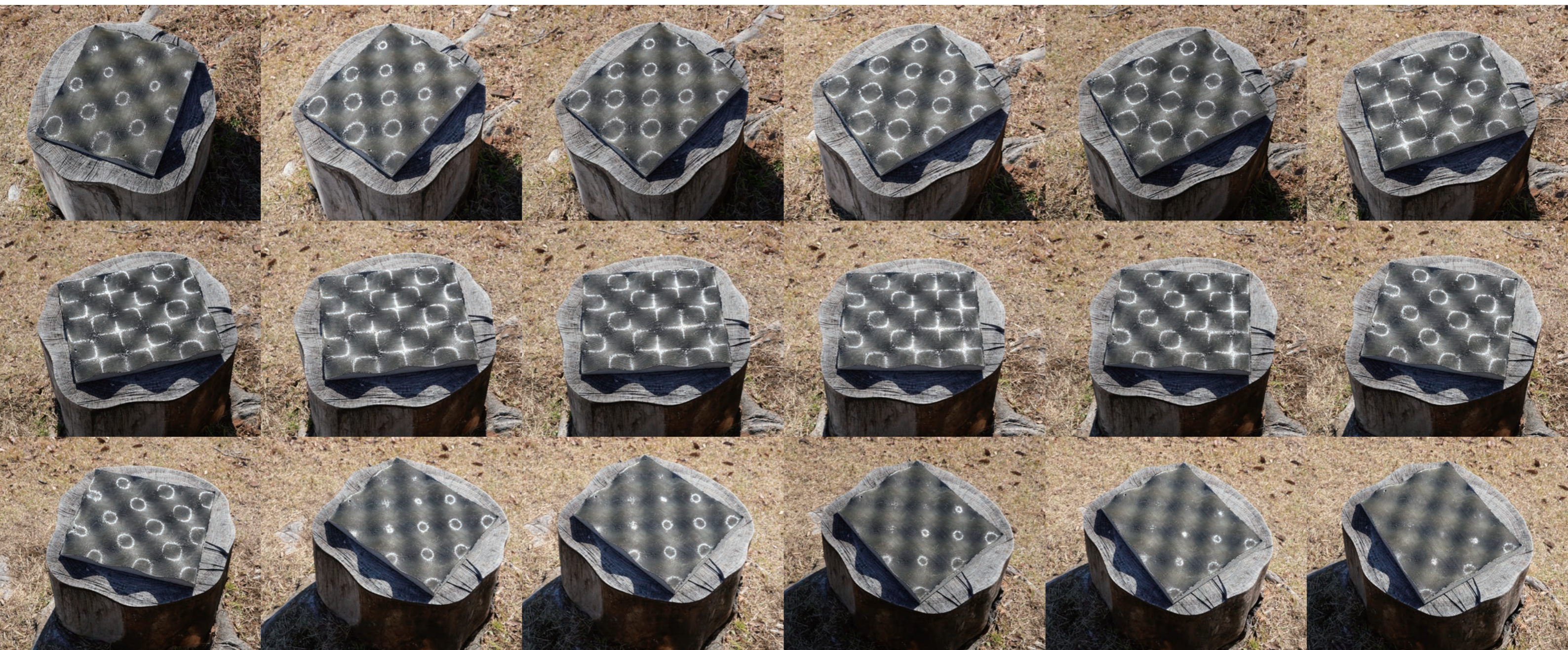
また、新たに観察された現象として、樹脂コーティング前の湿っている状態のコンクリートパネルにおいても、光沢の発現が確認された。一方で、この性質はパネルの乾燥の進行とともに失われた。

Observation

光沢斑紋形質は、実施工に近い造形条件下において、より強く発現することが確認された。とりわけ、スケールを拡張した本試作では本形質がもたらす視覚効果が一層顕著に現れており、これらの試作を通じて明らかとなった視覚効果を以下に整理する。

動的な視覚効果

光沢斑紋の視覚像は、光源、物質表面、鑑賞者といった複数の要素の位置関係によって立ち上がるものである。鑑賞者の視点移動に伴い、この光の像は連続的に変化し続ける。



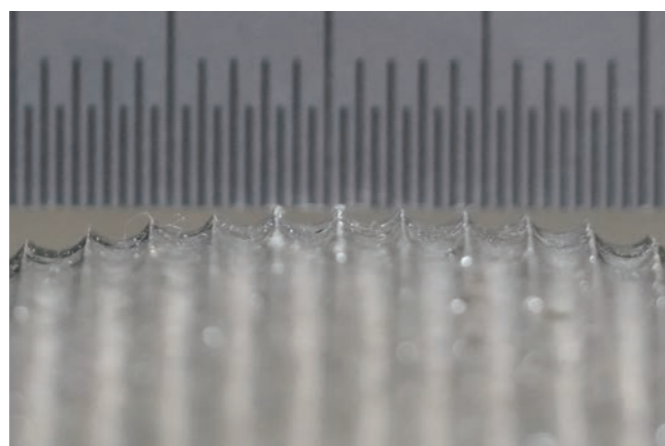
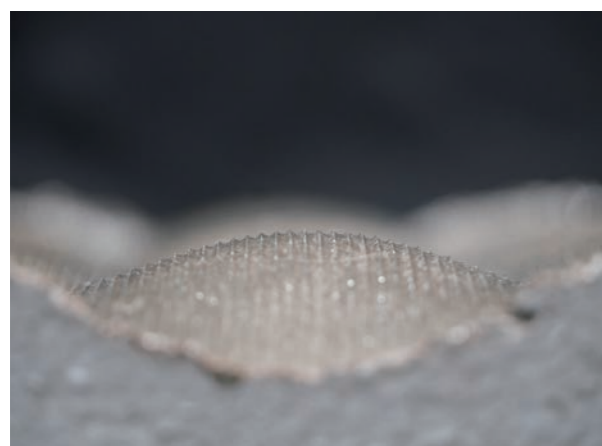


fig. 38-1,2,3
2mm ピッチの積層痕（メモリは0.5mm/個）

積層痕による光の像

光の粒や帯、斑として知覚される光沢斑紋は、その細部に目を向けると、積層痕の溝に沿って伸びる線状の反射光の集合像であることがわかる。3DP 型枠の微細な表面形状が転写された本パネルには、積層痕を反転したものとして凹曲面が形成されており、光の像はその中心に集まった様に観察される。

光源に対応する複数の反射光像

光源との位置関係によって生じる光沢斑紋は、光源の移動に伴いその視覚像を変化させる。この連続的な変化は、任意の光源配置に対して、それぞれ固有の視覚像が対応して存在することを意味している。この関係性は独立しており、複数の光源が異なる配置をとった場合でも干渉せず、それぞれの視覚像が“同時”に現れる。実際に赤色と白色の二つの光源を用いた観察では、それぞれに対応する視覚像が別々の像として発現している。

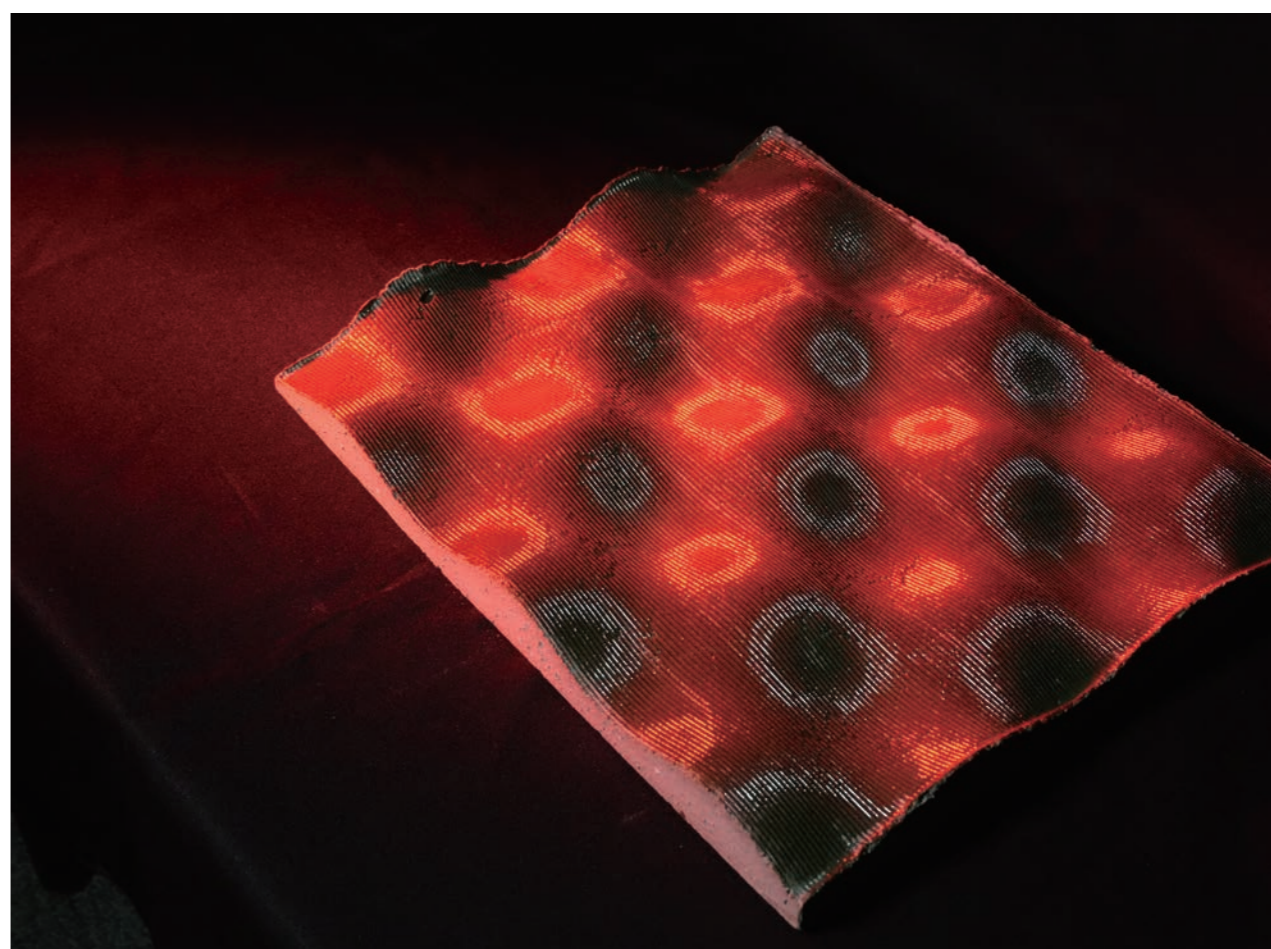
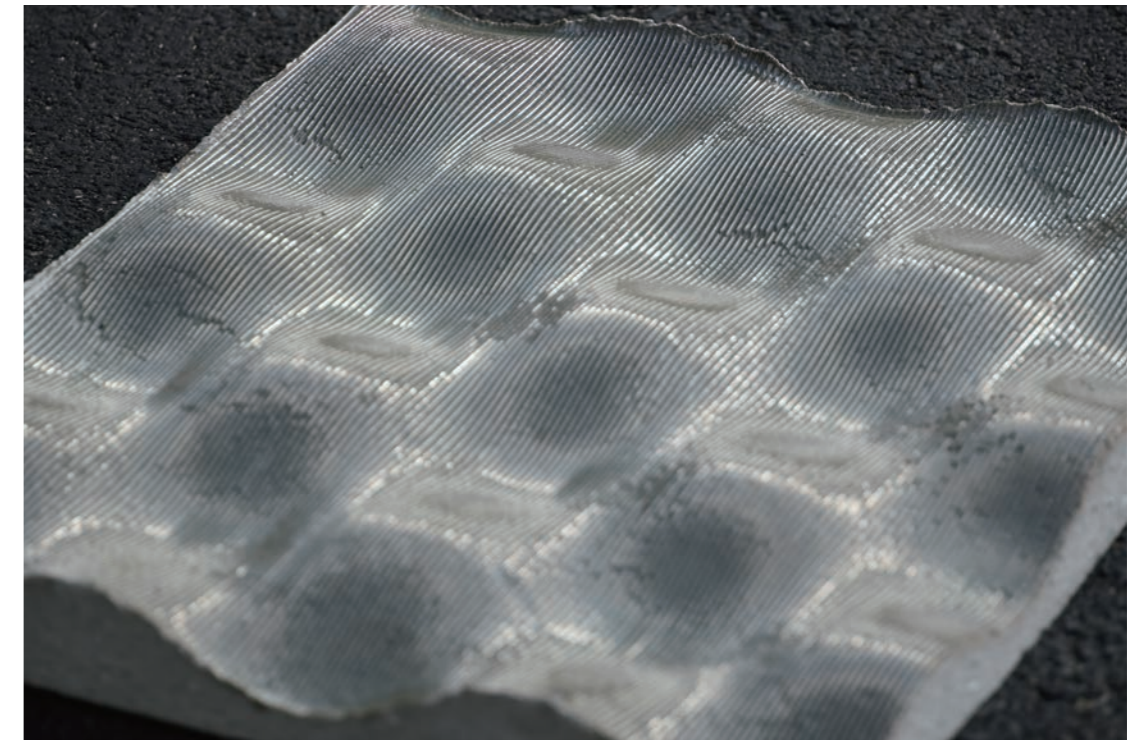


fig. 39-1,2 赤色と白色光源による視覚像とその撮影の様子



5.1 造形実験を通じて獲得された知見の整理

本章では、これまでの事例整理や試作実験とその観察を踏まえて、光沢斑紋形質とその応用可能性について検討する。ここで三種類の造形プロトタイピングを通じて、獲得された知見を整理する。

Experiment1

モデル毎・造形条件毎に現れる、光沢斑紋形質による視覚像の把握

鏡面反射性質や水面反射のアナロジーといった、建築表現との接続可能性

Experiment2

本形質の空間構成としての寄与

Caustics 現象の発現

実施プロセスとの整合性

Experiment3

実施工スケール（ピッチ）での形質発現

光沢斑紋形質の発現メカニズム

動的な視覚効果

積層痕がもたらす光の像

光源に対応する複数の反射光像

以上を踏まえて、特筆すべき知見について考察と展望を述べる。

5.2 光沢斑紋の把握

三種類の試作実験を通じ、3DP 型枠を用いて光沢斑紋をコンクリート造形に発現させる制作プロセスとその視覚像の様子について、一定程度整理をした。特に Experiment1 では、積層ピッチや Fuzzy skin といった微細な表面凹凸が、より陰影を強調させる設計変数として機能することが示された。また Experiment3 では、本形質が実施工スケールにおいても発現されることが確認された。これは、光沢斑紋を実際の建築表現として検討する意義と可能性を支持するものである。

5.3 水面反射のアナロジー

既存の建築表現との比較を踏まえて、コンクリート表面に濡れたような質感が付与されたことと、斑状あるいは帯状に光沢が現れることによって、水面反射を想起させるアナロジーが成立した。これは、3DP 造形が成立させる光沢斑紋という形質が、型枠行為を媒介としてコンクリートという素材へと拡張された結果として見出されたものである。

5.4 積層痕による新たな価値創出

積層痕はこれまで、造形時に生じるノイズとして、仕上げ精度を低下させる要因とみなされ、制御の対象とされてきた。しかし本研究で扱った光沢斑紋形質を付与する製作プロセスにおいては、積層痕が光を集束させ、陰影を強調するという視覚効果を促進する機構として働くことが確認された。本研究は、積層痕に抑制すべきノイズとしてではなく、視覚的価値を生成する設計要素としての新たな側面を位置づけるものである。

また Experiment 3 では、凸の弧が連続する断面形状をもつ積層痕が転写されることにより、コンクリート表面に凹曲面が形成されることが確認さ

そして何よりも、本研究において無視し得ないのは、光沢斑紋が立ち上げる視覚像に対して、観察者である私自身が思わず惹きつけられてしまうような感覚を覚えたという事実である。ただただ単純に魅力的な光景を創出したこと、かつそれを一定の再現性をもって立ち上げられるように知見を整理したことが、本研究の成果である。そしてこの主観的感覚は、一次情報として応用研究を検討する一因にも寄与するだろう。

本研究で行った試作実験では、その全てで 3DP によって型枠を製作し形状を転写させる手法を用いていた。今後の展望として、本形質およびそれに伴う視覚効果が、部材そのものを 3DP によって直接造形する手法においても成立するかを検討することが挙げられる。このセメント系材料を用いた施工領域は、その技術整備が整うものであり、また最も実施工を刷新しうる領域である。

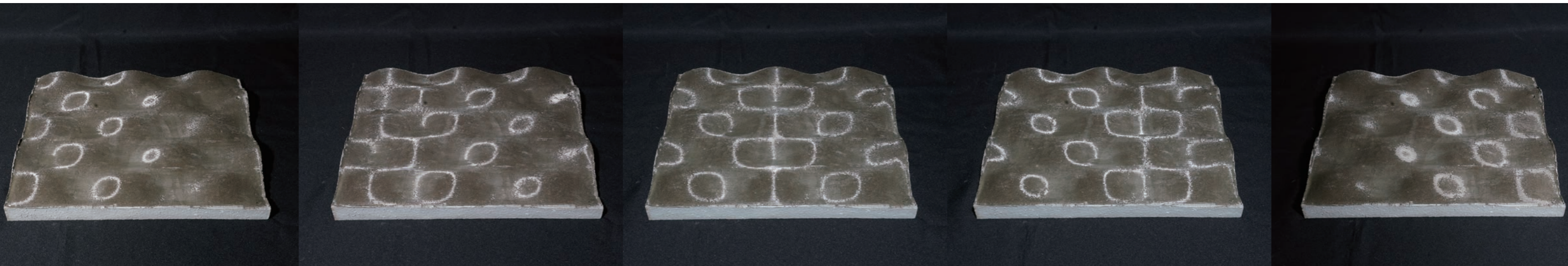
れた。一般に凹曲面は中心方向への集光効果を有するとされており、本造形実験においても、凹曲面の中央に光の像が集まる様子が観察された。一方で、光沢斑紋という形質自体は、形状を反転させていない 3DP 造形物においても確認されていることから、その発現は厳密には凹曲面の形成そのものではなく、積層痕に由来する溝の存在に起因すると考えられる。以上を踏まえると、本実験で形成された凹曲面は、その陰影や視覚効果を強調するものとして機能することが示唆される。これはより光学的な検証を要する問いであり、今後の検討事項として考えられるものである。

5.5 本研究の限界 / 終わりに

本研究では、建築 3DP の技術的成熟と社会実装の進展を背景に、建築表現を生み出さうる新たな固有特性として光沢斑紋を取り上げ、その発現と応用可能性について探索的に検討してきた。1.3 の研究目的で示したように、構造性能や施工合理性の検証には立ち入らず、あくまで表面に発現する光学的形質の記述と検討を対象としてきた。しかし、本研究では、本形質が建築においてどのような価値を生み出さうるのかについて、現時点では明瞭な定義を行えておらず、その検討は主観的な観察にとどまっている。光沢斑紋という形質は、まだ定性・定量的な評価指標が十分に確立できていない段階にあり、本研究では既存事例との類似比較や試作の提示といった記述的整理を通じて、

本形質を建築表現の文脈において位置づけることを試みた。例えば、建築模型の検討の中で取り上げた防犯環境設計への寄与についても、本研究ではコンセプトの導出概念にとどまっている。

今後は、その価値貢献先をより具体的に設定した上で、定性・定量評価による効果検証へと議論を展開していく必要がある。また本研究でおこなった造形実験も限定的なものであり、その視覚効果や表現活用についても、探求の余地は十二分に存在する。加えて、より詳細な光学的な原理解明もこの形質の議論を促進させるものである。本研究が基礎的検討として、建築 3DP 施工への応用に向けた、技術的検証や表現開拓の一助となれば、これ以上ない幸せである。



Reference

全て 2026/01/20 参照

Text

[1] 丸屋剛, 石田哲也. “3D プリンティングの技術開発の現状と展望”. コンクリート工学, 2021, vol. 59, no. 2, p. 173-180. https://doi.org/10.3151/coj.59.2_173

[2] 国土交通省. “i-Construction 2.0～建設現場のオートメーション化～”. 公開 2024/04/16. https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/content/001738240.pdf ; https://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08_hh_001085.html

[3] 荒井将来, 田中浩也, 湯浅亮平. “反射・透過・屈折の光学的効果を生み出す, 大型 3D プリンティングに向けたテクスチャ設計”. Conference on 4D and Functional Fabrication 2022, OP-33, 2022.

[4] 三井化学工業. “三井化学、3D プリンティングを活用した 意匠性コンクリート製法を共同開発”. 公開 2024/03/11. https://jp.mitsuichemicals.com/content/dam/mitsuichemicals/sites/mci/documents/release/2024/240311.pdf ; https://jp.mitsuichemicals.com/jp/release/2024/2024_0311/index.htm

[5] 小倉大季, 山本伸也, 田中初太郎, 中島忠大. “3D プリンティング技術の建築構造部材への適用”. コンクリート工学, 2024, vol. 62, no. 6, p. 527–533. (清水建設 (株))

[6] 坂上肇, 大川悠奈, 北村勇斗, 木村達治, 鈴木貴博, 山形龍一. “建設用 3D プリンターによる建築物「3dpod™」の設計と施工”. 大林組技術研究所報, 2023, No. 87. https://www.obayashi.co.jp/technology/shoho/087/2023_087_17.pdf

[7] 株式会社 Polyuse. “Polyuse、約 200 件以上※の施工実績をもとに、建設用 3D プリンタに関する技術指針策定に貢献”. 公開 2025/09/09. https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000028.000049711.html

[8] 3D プリンター対応検討委員会. “建設用 3D プリンターを利用した建築物に関する規制の在り方について”. 国土交通省, 公開 2024/08. https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/content/001759989.pdf

[9] 清水建設, “建設用 3D プリンティング技術”, (n.d.), https://www.shimz.co.jp/company/about/sit/topics/topics08/

[10] 知念司泰. “MEX-3DP の固有性に即したカタチの再認識 - プロダクトデザインにおけるバケモノ性の現出 -”. 慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科 修士論文, 2025. https://fab.sfc.keio.ac.jp/paper/files/2024_MoriyasuChinen.pdf

[11] 竹中工務店. “森になる建築 Foresting Architecture”. (n.d.). https://foresting-architecture.jp/

[12] 奥山晃平. “世界最大の生分解性 3D プリント、「森になる建築」を本物の森へ”. 日経 XTECH, 公開 2025/12/25. (有料記事)

[13] Aki Hamada Architects. “Gorge 土地の峡谷”. 2025. https://aki-hamada.com/projects/gorge/

[14] OSO/ 小野寺匠吾建築設計事務所. “2025 EXPO Osaka Signature Pavilion”. 2025. https://shogoonodera.com/2025-EXPO-Osaka-Signature-Pavilion

[15] OSO Research. “figjam of OSO Research”. (n.d.). https://www.figma.com/board/4lxPSNxr5NMQ75YkkPMetK/OSO-Research

[16] VOID. “島の蜃気楼”. 2025. https://void.jp.net/works/shimano_shinkiro

[17] ND3M. “島の小さな蜃気楼 / Mirage Bench”. 2025. https://nd3m.io/mirage-bench/

[18] 甲子化学工業. “HOTABENCH”. 2025. https://koushi-chem.co.jp/hotabench/

[19] 清水建設. “建設用 3D プリンティング技術”. (n.d.). https://www.shimz.co.jp/company/about/sit/topics/topics08/

[20] 川西利昌, 中西弘郎, 矢口浩一, 榎本真規, 加藤学, 藤江幸王, 小倉篤久, 和田直己. “サングリッタの魅力に関する研究”. 日本沿岸域学会論文集, 1999, vol. 11, no. 1, p. 95-102. https://doi.org/10.57296/jacszgakkai.11.1_95

[21] 熊澤貴之, 濱井克. “夜間水辺景観における街路照明の水面反射が心理的印象に与える影響”. 日本建築学会計画系論文集, 2024, vol. 89, no. 817, p. 511-518. https://doi.org/10.3130/aija.89.511

[22] 使用材料詳細：家庭化学工業株式会社. “防水セメント”. https://www.kateikagaku.co.jp/products/items_page/p_4905488033068.html ブレニー技研有限公司. “二液式エポキシ樹脂 GM-1508”. https://blennyshop.myshopify.com/collections/all

[23] 使用ソフトウェア：Rhinoceros (Version 8.25.25328.11002). Robert McNeel & Associates, 2025.

[24] Daoru Wang. “Rhino Grasshopper Tutorial | Industrial Design | Parametric Vase”. YouTube, 公開 2023/11/02. [https://youtu.be/MzDwjAEmavU](https://www.google.com/search?q=https://youtu.be/MzDwjAEmavU&authuser=1)

[25] hopific. “Mathematical Formulas in Grasshopper – A Beginner’s Guide”. 公開 2023/10/16. https://hopific.com/mathematical-formulas-in-grasshopper/

[26] Kuranz, C.C., Drake, R.P., Donajowski, T.L. et al. “Assessing Mix Layer Amplitude in 3D Decelerating Interface Experiments”. *Astrophys Space Sci*, 2007, 307, 115–119. https://doi.org/10.1007/s10509-006-9255-0

[27] 樋村恭一. “安全・安心な施設, まちづくり – 防犯環境設計の視点から”. 公共建築, 2006, vol. 48, no. 3, p. 31–34.

[28] 田中賢, 南部世紀夫, 高瀬大樹, 樋野公宏. “周辺環境の客観的指標による犯罪不安感の推定手法の提案：夜間の大学キャンパスを対象として”. 日本建築学会計画系論文集, 2022, vol. 87, no. 792, p. 329–336.

[29] 原田豊, 島田貴仁, 齊藤知範, 雨宮護, 菊池城治. “犯罪者の視点から見た防犯環境設計の有効性の検討：全国の被収容者を対象とした質問紙調査報告”. 都市計画報告集, 2009, vol. 8, no. 2, p. 76–79.

[30] 岡野民, 永禮賢. The Tokyo Toilet. TOTO 出版, 2023.

[31] 日本財団. “THE TOKYO TOILET”. (n.d.). https://www.nippon-foundation.or.jp/what/projects/thetokyotoilet ; https://www.nippon-foundation.or.jp/wp-content/uploads/2024/08/wha_pro_the_03.pdf

[32] 平瀬有人. 模型で考える：素材が導く建築デザイン. 彰国社, 2025.

[33] エス・ラボ株式会社. “製品情報 ベレット式 3D プリンタ”. (n.d.). https://slab.jp/products/300/

本研究では、研究過程や執筆過程において、その多くの作業に生成 AI ツールを活用しています。特に執筆過程においては、論点整理や文章表現の検索ツール、及び日本語校正ツールとして活用しており、その作業貢献は極めて大きいものであったと振り返ります。

論文に記載した文章は、最終的にその全てにおいて筆者自身による複数回の推敲及び複数人の第三者による推敲を経ています。また、参照した情報源についても筆者自身の知識によらないものについては、記載した参考文献の通りに事実確認を行っています。

“Standing on the shoulders of giants” 本研究にお力添えいただいた全ての知見に厚く感謝を申し上げます。

Reference

全て 2026/01/20 参照

Figure

fig. 1
KRAUS GRUPPE, “Baufeld 5 | Größtes 3D-Druck-Gebäude in Europa”, (n.d.), <https://www.kraus-heidelberg.de/referenzen/3d-druck/>
Source: 同上

fig. 3
荒井将来, 田中浩也, 湯浅亮平. “反射・透過・屈折の光学的効果を生み出す, 大型 3D プリンティングに向けたテクスチャ設計”. Conference on 4D and Functional Fabrication 2022, OP-33, 2022.
Source: 田中浩也氏による提供資料, 2025.

fig. 5-1, 5-2
三井化学工業, “三井化学、3D プリンティングを活用した 意匠性コンクリート製法を共同開発”, 公開 2024/03/11, <https://jp.mitsuichemicals.com/content/dam/mitsuichemicals/sites/mci/documents/release/2024/240311.pdf>; https://jp.mitsuichemicals.com/jp/release/2024/2024_0311/index.htm
Source: 同上

fig. 6, fig. 12-1, 12-2
“いのちめぐる冒険 (2025 EXPO Osaka Signature Pavilion)”. 設計: OSO/小野寺匠吾建築設計事務所, 竣工: 2025.
Source:
(fig. 6, fig. 12-1) OSO/ 小野寺匠吾建築設計事務所, “Works - 2025 EXPO Osaka Signature Pavilion”, 2025, <https://shogoonodera.com/2025-EXPO-Osaka-Signature-Pavilion>
(fig. 12-2) TECTURE MAG, “海水 100%利用のコンクリートでつくられた「いのちめぐる冒険」、沖縄県内の村立中学校へ転用”, 公開 2025/11/19, <https://mag.tecture.jp/feature/20251119-139057/> (OSO/ 小野寺匠吾建築設計事務所による提供写真を一般公開する記事より取得)

fig. 7-1, 7-2, 7-3
小倉大季, 山本伸也, 田中初太郎, 中島忠大. “3D プリンティング技術の建築構造部材への適用”. コンクリート工学. 2024, vol. 62, no. 6, p. 527–533. (清水建設 (株))
Source: 同上

fig. 8-1, 8-2, 8-3, 8-4
坂上肇, 大川悠奈, 北村勇斗, 木村達治, 鈴木貴博, 山形龍一. “建設用 3D プリンターによる建築物「3dpod™」の設計と施工”. 大林組技術研究所報. 2023, No.87. https://www.obayashi.co.jp/technology/shoho/087/2023_087_17.pdf
Source:
(fig. 8-1, 8-2) TECTURE MAG, “大林組技術研究所に 3D プリンタ実証棟〈3dpod™〉が完成”, 公開 2023/06/05, <https://mag.tecture.jp/business/20230605-89733/> (提供: 大林組、撮影: 繁田 諭による提供写真を一般公開する記事より取得)
(fig. 8-3, 8-4) 上記論文より

fig. 9, fig. 17-2
清水建設, “建設用 3D プリンティング技術”, (n.d.), <https://www.shimz.co.jp/company/about/sit/topics/topics08/>
Source: 同上

fig. 10-1, 10-2, 10-3
“森になる建築”. 代表企業: 株式会社竹中工務店, 竣工: 2025.
Source: 竹中工務店, “森になる建築 Foresting Architecture”, (n.d.), <https://foresting-architecture.jp/>

fig. 11-1, 11-2, 11-3, 11-4
“Gorge”. 設計: Aki Hamada Architects, 2025.
Source: Aki Hamada Architects, “Gorge 土地の峡谷”, 2025, <https://aki-hamada.com/projects/gorge/>

fig. 13-1, 13-2, 13-3, 13-4
OSO Research, “figjam of OSO Research”, (n.d.), <https://www.figma.com/board/4lxPSNxr5NMQ75YkkPMetK/OSO-Research?node-id=0-1&p=f&t=4AeOmZja725QPvcH-0>
Source: 同上

fig. 14-1, 14-2, fig. 15
“島の蜃気楼 (トイレ)”. 設計: PONDEDGE + farm + NOD, 3DP 設計協力 / 製造: VOID+ND3M, 2025.
Source:
(fig. 14-1, 14-2) ND3M, “島の小さな蜃気楼 / Mirage Bench”, 2025, <https://nd3m.io/mirage-bench/>
(fig. 15) VOID, “島の蜃気楼”, 2025, https://void.jp.net/works/shimano_shinkiro

fig. 16
甲子化学工業, “HOTABENCH”, 2025, <https://koushi-chem.co.jp/hotabench/>
Source: 同上

fig. 17-1
TECTURE, “EXPO SAUNA ‘TAIYO TSUBOMI’ 事例写真”, (n.d.), 2025, <https://www.tecture.jp/projects/6973>
Source: 同上

fig. 20
じゅんぺー (@junpay2012). “よく通った西ゲートの夕日。万博会場のデザイン…”. X, 2025/10/6, <https://x.com/junpay2012/status/1975163911872614885>
Source: 同上

fig. 22
James Gurney, “Caustic Reflections”, Gurney Journey, 公開 2010/07/21, <https://gurneyjourney.blogspot.com/2010/07/caustic-reflections.html>
Source: 同上

fig. 24-1, 24-2
“長野県立美術館 東山魁夷館”. 設計: 谷口吉生, 竣工: 1990.
Source:
(fig. 24-1) 長野県立美術館, “東山魁夷館”, (n.d.), https://nagano.art.museum/higashiyama_kaii_gallery
(fig. 24-2) 古里正, “#120 長野県立美術館を観て”, 古里設計, 公開 2022/06/30, <https://www.frst.co.jp/blog/> 長野県立美術館を観て /

fig. 25-1, 25-2
“静岡県富士山世界遺産センター”. 設計: 坂茂建築設計, 竣工: 2017.
Source: Casa BRUTUS, 撮影: Hiroyuki Hirai, “坂茂建築設計が手がけた、世界遺産・富士山を守り継ぐための施設。”, 公開 2018/02/15, <https://casabrutus.com/categories/architecture/67999>

fig. 26-1, 26-2, 26-3
“ルーヴル・ランス”. 設計: 妹島和世 + 西沢立衛 / SANAA, Co-Concepteurs: Tim Culbert + Celia Imrey / IMREY CULBERT, Catherine Mosbach. 竣工: 2012.
Source:
(fig. 26-1, 26-3) Architectura Viva, “Museo Louvre-Lens”, (n.d.), <https://arquitecturaviva.com/works/museo-louvre-lens-8>
(fig. 26-2) Musée du Louvre-Lens, “Architecture et parc”, (n.d.), <https://www.louvreens.fr/le-louvre-lens/architecture-et-parc/>

fig. 27-1, 27-2, 27-3
“LOUIS VUITTON GINZA NAMIKI”. 設計: 青木淳建築計画事務所, LOUIS VUITTON MALLETTIER, エイチアンドエイ, 清水建設. 竣工: 2021.
Source:
(fig. 27-1, 27-2) architecturephoto, “【シリーズ・色彩にまつわる設計手法】第 5 回 青木淳 インタビュー・前編「場所の記憶を表現した“水の柱”」”, architecturephoto.net, 2021/10/29, <https://architecturephoto.net/129965/>
(fig. 27-3) Neoplus Sixten Inc., “ルイ・ヴィトン 銀座並木通り店”, Japan-Architects Magazine, 公開 2021/03/17, <https://japan-architects.com/ja/architecture-news/shang-ye-shi-she/louis-vuitton-ginza-namiki>

fig. 28
“null²”. 設計: NOIZ, 竣工: 2025.
Source: NOIZ, “null²”, noiz architects, 2025, <https://noizarchitects.com/projects/1142/>

fig. 29
“ビルバオ・グッゲンハイム美術館”. 設計: フランク・O. ゲーリー, 竣工: 1997.
Source: Casa BRUTUS, “ビルバオ・グッゲンハイム美術館”, Casa BRUTUS, (n.d.), <https://casabrutus.com/data/architectures/303714>

Acknowledgment

本研究を進めるにあたり、多くの方々から多大なるご指導とご支援を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

Digital Archi 株式会社の松岡様には、試作実験や引用事例の検討に際し、さまざまな助言をいただきました。なかでも、「この現象を魅力的に語る」という本論文の方向性を決断するにあたって、松岡様からの助言は大きな支えとなりました。本研究を形にする上で、多大なるご協力を賜りましたことに、心より御礼申し上げます。

本論文の執筆ならびに研究活動全般にわたりご指導を賜りました田中浩也教授へ、厚く感謝申し上げます。私個人の興味や関心に基づいた研究であったため、ご指導いただいた内容を十分に実現できない場面も多く、また卒業論文のテーマ策定にも時間を要し、多くのご負担をおかけしてしまいました。そのような状況においても、終始親身にご指導くださり、誠にありがとうございました。その結果として、自身が納得できる卒業論文を完成させることができました。

また、この二年間の研究室での活動を通じて、多様な視座や考え方を学ばせていただきました。研究室や授業を契機として、それまで全くバックグラウンドを持たなかった「デザイン」に挑戦する機会を数多く与えていただきました。卒業後は、関係があるようなないような、そんな領域に進みます。多くの学びの機会を賜りましたことに、重ねて御礼申し上げます。この経験は、私の人生にとって大きな糧となりました。最高の財産です。

また、日頃より研究活動を共にしてきた研究室の皆様には、議論や助言、実験・制作を通じて多くの刺激と学びをいただきました。この研究室で過ごした二年間の思考と対話の時間は、私にとって多くの成長をもたらした、代え難い経験です。現在の自分があるのも、ひとえに皆様のおかげです。

本研究の着想や構想、ならびに制作の過程においても、研究室の皆様には多大なるご協力をいただきました。特に、制作に関して助言をいただいたワンさん、谷口さん、制作を手伝ってくれた河合くん、写真撮影にご協力いただいた高橋さん、白石さんには、直接的なご支援を賜りました。ここに改めて感謝申し上げます。

卒論ゼミにおいて多くの議論を交わした同期の皆さんや大学院生の皆様、また日頃から研究の相談に乗ってくれた後輩の皆さんにも、深く感謝いたします。書き始めるとキリがないですね笑。

最後に、これまで私の学生生活を温かく支えてくださったすべての方々に、心から感謝を表します。数多くの出会いと学びの機会を、ありがとうございました。

私の強さは、母から学んだものです。ここまで共に歩んでこられたことを、心から光栄に思います。ありがとうございます。これからはどうか安心して、健康を第一にご自愛ください。今後とも、どうぞよろしくお願いいたします。

