

## 特集 魅力的なデザインの実現を支援する技術 Technologies that Support to Realize Attractive Designs

### Summary

Results of technological development conducted at Takenaka Research and Development Institute are implemented in society mainly through the Takenaka Group. Among the Takenaka Group companies, Takenaka Corporation in particular applies its technologies mainly to buildings and landscapes, and develops technologies for planning, design, construction, maintenance, and operation of such buildings and landscapes. Many of these technologies help Takenaka realize its “attractive design,” which is one of our strengths and is recognized by society.

For example, the BCS Award, which is given by the Japan Federation of Construction Contractors, is selected “based on a comprehensive evaluation of architectural project planning, planning and design, construction, environment, and operation and maintenance of buildings. Takenaka Corporation has received a relatively large number of awards as a constructor compared to other general contractors, but the difference is more pronounced when compared Takenaka Corporation as a designer. Prize of Architectural Institute of Japan for Design is an award for “an original work that is recognized as being of an extremely high standard from social, cultural, and environmental perspectives, or an excellent work that suggests the possibility of new architecture and is considered to be a landmark of the times.” In the 10 years from 2014 to 2023, only two awards were given to works by general contractor designers, both by Takenaka Corporation.

In order to continue to provide designs that are recognized by society, there are often technical challenges that is to realize those designs, and Takenaka R&D Institute is conducting these technical challenges day by day. In this special issue, entitled “Technologies that Support to Realize Attractive Designs,” we pick up examples of technological developments that lead to attractive design and introduce them, including examples of their application to actual projects.

The term “attractive design” has a rather vague and broad meaning. For example, a design that incorporates technological development results mainly for the purpose of cost reduction is also attractive from a cost perspective and can therefore be referred as an attractive design. In this special issue, however, we will focus on technologies that contribute to the aesthetic design of the building. The aesthetic design is related to “beauty” among the universal three principles of architecture: “durability,” “utility,” and “beauty.” However, it is extremely rare for technological development to focus solely on “beauty,” and most technological development is conducted with “beauty” in mind while focusing on “durability” and “utility” as the main objectives.

“Durability” is mainly related to structural design. Buildings need to withstand external forces such as earthquakes and wind. However, from the viewpoint of “beauty,” there are demands for slender members, free shapes, and beautiful surfaces when the frame is used without finishing materials. In order to meet these demands, materials, members, and their design methods with high strength and excellent workability are being developed. In this special issue, we focus on wooden structure technology from the viewpoint of structural system, technology to improve the aesthetics of concrete from the viewpoint of materials, and technology to increase the degree of freedom of design (3D printer) in terms of rational design, manufacturing, and construction methods.

“Utility” is mainly related to the environmental design. Environment here refers to indoor and outdoor environments, and aims to be comfortable and pleasant. As a function of a building, it is desirable to make air, temperature, brightness, sound, vibration, etc. comfortable indoors. While many of the factors that disturb these factors occur inside the building, many of them also occur outside the building, which is difficult to control the source of these factors. The design of exterior walls has become increasingly important in recent years because it has a significant impact on energy and CO<sub>2</sub> reduction. In addition, from the viewpoint of “beauty,” exterior walls have a direct meaning as façades. For this reason, this special issue focuses on the technologies that support façade design. Next, the outdoor environment is the outdoor space that includes both inside and

outside of the construction site, which is continuous with the building. Since the outdoor space greatly affects the function (and thus the value) of a building, it is essential to design the building including (or considering) the outdoor space. The importance of landscape design has been widely recognized from the viewpoint of biodiversity in recent years. This special issue also discusses the technologies that support landscape design.

**Keywords:** attractive design, wooden structure, aesthetic concrete, 3D printer, facade design, landscape design

## 1 はじめに Introduction

山本 雅史 Masashi Yamamoto\*1

竹中技術研究所を中心に行われる技術開発の成果の多くは竹中グループを通して社会実装される。竹中グループの中で特に竹中工務店においては技術の適用先が主に建物およびランドスケープであり、その企画、設計、施工、維持管理、運用に関する技術が開発されている。筆者は竹中工務店の強みの1つとして「魅力的なデザイン」があると考えている。

例えば、一社)日本建設業連合会が表彰を行うBCS賞<sup>1,1)</sup>は、「建築の事業企画、計画・設計、施工、環境及び建築物の運用・維持管理等に関する総合評価に基づいて」選考が行われるが、2013年度から2022年度までの10年間ににおける受賞数の累積値はFig. 1.1の通りである(筆者調べ)。Fig. 1.1(a)は設計者としての受賞数、Fig. 1.1(b)は施工者としての受賞数をまとめたもので、大手のゼネコン4社(A~D社)と竹中工務店を比較して示す。竹中工務店は他社ゼネコンと比較して施工者としても比較的多く受賞しているが、設計者としての比較において差が顕著である。また、一社)日本建築学会の日本建築学会賞(作品)<sup>1,2)</sup>は「社会的、文化的、環境的見地からも極めて高い水準が認められる独創的なもの、あるいは新たな建築の可能性を示唆するもので、時代を画すると目される優れた作品」を表彰するものであるが、2014年度から2023年度までの10年間でゼネコンの設計者による作品が表彰されたのは2件のみ(筆者調べ)であり、ともに竹中工務店によるものである。

このように社会に認められるデザインを提供しつづけるためには、そのデザインを実現するために乗り越えるべき技術的課題がある場合が多く、竹中技術研究所ではこれらの技術的課題に日々取り組んでいる。今回の特集はタイトルを「魅力的なデザインの実現を支援する技術」とし、魅力的なデザインにつながる技術開発事例をピックアップし、実プロジェクトへの適用例も含めて紹介を行う。

魅力的なデザインという言葉はかなり曖昧かつ広い意味を持つ。例えば、主にコストダウンを目的とした技術開発成果を取り入れたデザインもコスト面では魅力的なため魅力的なデザインといえなくはない。ただし、本特集では、意匠的なデザインに寄与する技術を対象とする。意匠的なデザインとは建築の三原則とされる「強」「用」「美」のうち「美」に関するものであり、魅力的とはそれに愛着を持つ、誇れるということである。ただし、「美」だけを目的とした技術開発は極めてまれであり、「強」や「用」を主目的としつつ「美」を意識した技術開発が行われている。

「強」は主に構造に関するものである。建築物は地震や風などの外力に耐える必要があるが、その時に「美」の観点から、部材をスレンダーにしたい、自由な形状にしたい、躯体表しの場合は表面を美しくしたい、等の要望がある。これらに応えるため、高強度で施工性に優れた、材料、部材およびそれらの設計法が開発される。本特集ではその中で、構造形式の面から木質構造デザイン技術[2章]、材料の面からコンクリートの美観デザインを支える技術[3章]、合理的設計・製造・施工法の面からデザインの自由度を高める3Dプリンター活用技術[4章]について取り上げる。

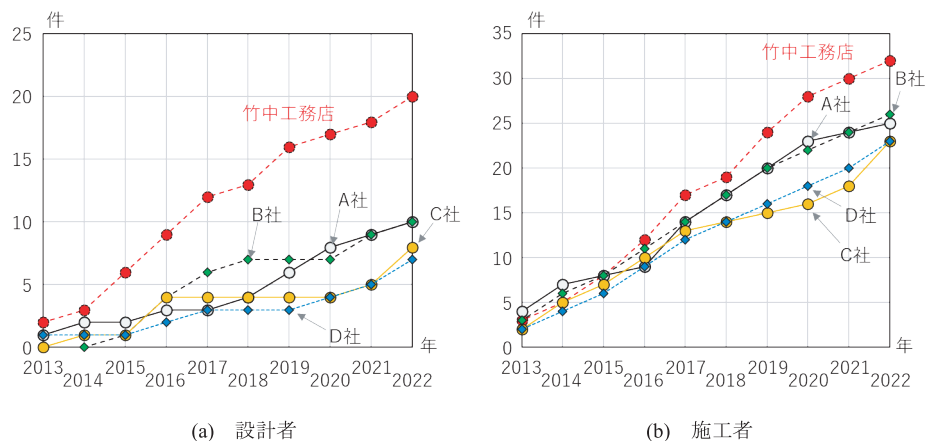


Fig. 1.1 BCS賞の累積受賞数  
Cumulative number of BCS awards received

\*1 技術研究所 リサーチフェロー 博士(工学) Research Fellow, Research & Development Institute, Dr. Eng.

「用」は主に環境に関するものである。ここでいう環境は屋内環境や屋外環境を意味し、快適、心地いいを目指すものである。建築物の機能として、屋内においては、空気、温度、明るさ、音、振動などを快適なものにすることが望まれる。これらを乱す要因は建築物の内部で発生するものも多い一方、建築物の外部で発生するものが多く、更には発生源を制御することが難しいため、この対処は基本的に屋根を含む外壁で行うことになる。外壁の設計は省エネルギーや省CO<sub>2</sub>に大きな影響を与えるため、近年ますます重要になっている。また、「美」の観点から、外壁はファサードとして直接的な意味を持つ。このため、本特集ではファサードデザインを支える技術〔5章〕について取り上げる。

次に屋外環境についてであるが、建築物はそれ単独で存在するのではなく、建築物に連続する敷地内外を含めた屋外空間がある。その屋外空間は建物の機能（ひいては価値）に大きく影響を与えるため、屋外空間を含めて（または考慮して）デザインすることが必須である。このランドスケープデザインの重要性が近年生物多様性の観点からも広く認識されはじめている。本特集でもランドスケープデザインを支える技術〔6章〕について取り上げる。

以上、本特集では魅力的なデザインの実現を支援する技術として下記の5つをピックアップして紹介を行う。

- ・木質構造デザイン技術〔2章〕
- ・コンクリートの美観デザインを支える技術〔3章〕
- ・デザインの自由度を高める3Dプリンター活用技術〔4章〕
- ・ファサードデザインを支える技術〔5章〕
- ・ランドスケープデザインを支える技術〔6章〕

上記の技術の他にも様々な、魅力的なデザインの実現を支援する技術がある。これらを適切に適用することで竹中工務店が提供する建物およびランドスケープをその所有者、使用者をはじめとするステークホルダーの方々が魅力あるものととらえ、建物等に愛着を持つ、保有することが誇れると感じていただけるようにしたい。その結果、建物を末永く使っていただくことで環境問題に大きく貢献し、ひいてはステークホルダーの方々の企業価値を高めることができると考える。

## 参考文献

- 1.1) 一社) 日本建設業連合会HP： <https://www.nikkenren.com/kenchiku/bcs/>, 2023年8月1日閲覧
- 1.2) 一社) 日本建築学会HP： <https://www.aij.or.jp/prize.html>, 2023年8月1日閲覧



## 2 木質構造デザイン技術 Timber Structure Design Technologies

栗原 嵩明 Takaaki Kurihara\*2 梁田 真史 Masafumi Yanada\*3

### 2.1 木造建築の意匠と構造と環境

#### Design, Structure, and Environment of Timber Architecture

建築材料としてみた木材は、構造材としても仕上げ材としても用いられ、比強度が大きいといった構造材料としてのメリットも持ちながら、外観、肌触り、質感といった意匠的な魅力も併せ持つ。木造建築のデザインについて考えるとき、この両方の特徴をいかに生かすかが重要なポイントとなる。

ここで、なぜ木材が意匠上好まれるのかを考えてみたい。まずは木材の色、年輪や木目によるグラデーションやパターンが視覚的に、木材の熱伝達率や固さが触覚的に心地よいと感じられ、これらを総合して「あたたかみ」「ぬくもり」「やわらかさ」「やさしさ」というような感覚をもたらすと考えられる。それに加えて、木材が家具や食器をはじめとする生活の道具として身近に触れる素材であるということや、日本人にとっては木材が現しで用いられる伝統建築が木造建築の代表格として記憶に焼き付いていることも理由の一つであろう。これら感覚や印象について科学的手法を用いて分析した例として木質化された建築物が与える心理的影響に関する研究<sup>21)</sup>もあり、木質化された空間では緊張-不安のような陰性気分を低下させる可能性が指摘されている。

ところで、近年建築における木材活用、特に木造建築が注目を集めており、これまでにない大規模、高層の木造建築が建設されている。これは脱炭素社会の実現や国内林業活性化といった社会課題に対する解決策として建築物での木材活用が推進され、法制度の整備や技術革新が進んだ結果であろう。木材は樹木が成長する過程で光合成により大気中の二酸化炭素を固定して作られた材料である。木材は建築物の中に二酸化炭素を貯蔵し、伐採後の土地に再植林することでさらに二酸化炭素が固定されることから脱炭素社会の実現に貢献する建築材料であると考えられている。また、森林の保全や地域経済の活性化などの観点から国内林業の振興を図るうえで、施策のひとつとして木材の建築活用が推進されてきた。なかでも2010年の木材利用促進法の制定はその代表例であり、2020年の改正によって民間の建築での木材利用についての記述が追加され、木材利用のさらなる加速が期待されている。

このように、木造建築は他構造にはない意匠上の特徴を持ち、建築的な魅力はもちろん社会的にも普及拡大が期待されている。竹中工務店では、森林資源と地域経済の持続可能な好循環を「森林グランドサイクル (Fig. 2.1)」と名付け<sup>22)</sup>、都市部でより多くの建物を木造化・木質化することで木材の需要を高め、日本の森林・林業・地域を活性化する活動を進めている。

木造の普及を進める上で注力すべき分野はこれまで木造化されてこなかった大規模建築、高層建築、混構造建築であると考えられる。他構造で占められていたこの分野において木造建築を普及させるためには、木材の質感と特性を生かしたデザインと構造を両立し、新しい建築の魅力をアピールする必要がある。当社では構造性能の向上とともに木造建築の魅力向上を大きな課題ととらえ、木材の「現し」を可能とする構造技術を多く開発しており、本章ではそれらの技術を紹介する。2.2節では新たなデザインを実現する木造技術として「燃エンウッド」および鉄骨造・RC造建物の耐震要素に木材を活用する「KiPLUS」シリーズについて解説する。2.3節では、現しで使える耐震改修技術として「T-FoRest」シリーズを、2.4節ではこれからの木造技術について解説する。



Fig. 2.1 森林グランドサイクル  
Forestry Grand Cycle

### 2.2 新たなデザインを実現する木造技術

#### Timber Structure Technologies Developed for New Building Design

近年見られるようになった中高層の木造建築を実現するうえで、最大の課題は火災時の安全性の確保であった。都市部で大規模な建築物を建てる場合、その建物は火災時に倒壊しない耐火建築物にしなければならないが、2000年の建築基準法の改正は、木造建物であっても必要な性能を満たせば耐火建築物として扱うことを可能とした。こ

\*2 技術研究所 主任研究員 Chief Researcher, Research & Development Institute

\*3 技術研究所 研究主任 Senior Researcher, Research & Development Institute

れにより、木造耐火建築物の実現への道が開け、都市部で大規模な木造建築を建てることが可能になった。竹中工務店ではこの法改正に対応し、耐火木造部材「燃エンウッド」(柱・梁)を開発し、2013年にプロジェクトに初適用した。燃エンウッドはFig. 2.2に示すように従来の石膏ボードなどを用いた被覆型の耐火木造と異なる燃え止まり型と呼ばれる方式を採用し、火災時に建物が倒壊しない耐火性能を得るとともに、「現し」を可能としている。

開発当初、燃エンウッドは大阪木材仲買会館 (Photo 2.1) のように3から4階建ての中低層建築に適用されたが、2018年以降は耐火性能の向上を図ったことでパークウッド高森 (2019年、10階)、FLATS WOODS木場 (Photo 2.2, 2020年、12階)、HULIC & New GINZA 8 (Photo 2.3, 2021年、12階) のように、より高層の建築物にも適用範囲が広がった。現在ではN計画 (2025年竣工予定、17階、Fig. 2.3) のような超高層建築までも計画されている。

さらに燃エンウッド柱の拡張として開発されたのが「円形燃エンウッド柱」である。これは、円形断面の荷重支持部に燃え代層および燃え止まり層を巻き付けた燃エンウッド柱であり、従来の角形断面の柱とは異なる表情を建築空間に与えることができる。FLATS WOODS 木場ではこの円形燃エンウッド柱を採用し (Photo 2.2)、丸みのある柱が柔らかな空間を生んでいる。

燃エンウッド柱・梁の開発により大規模木造建築の実現が可能となったものの、標準的な接合方法を採用した燃エンウッド柱・梁は構造的には地震や風による水平力に対する評価方法が確立されていないため、耐震要素としては使用することができない。このことは、建物において木造化可能な部分が水平力を負担しない柱・梁に限定され、大規模木造建築のデザインの多様化を妨げると考えられる。大規模木造建築を広く普及させるためには、木造技術の更なる開発を進めることで建物における木造化可能な部分を増やし、多様な建築デザインを実現することが必要不可欠であった。

こうした背景のもと、木質材料による耐震要素として開発されたのが「KiPLUS WALL (キプラスウォール)」である。KiPLUS WALLは、地震や風による水平力に抵抗する役割を担う耐震壁としてCLT (Cross Laminated Timber,

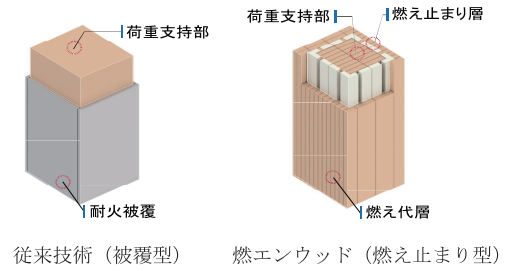


Fig. 2.2 耐火木造部材の種類  
Types of fire-resistant wooden member

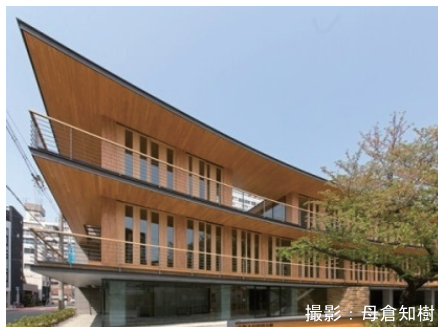


Photo 2.1 大阪木材仲買会館  
Osaka Timber Association Building

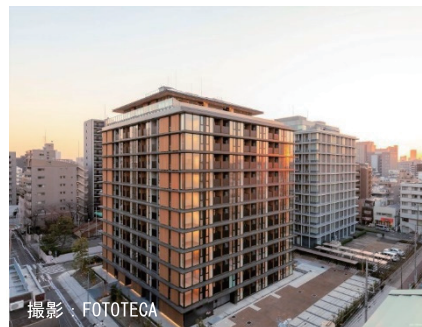


Photo 2.2 FLATS WOODS 木場 (左: 外観 右: 円形燃エンウッド柱)  
FLATS WOODS Kiba (Exterior and Round-shaped Moeno-Wood column)

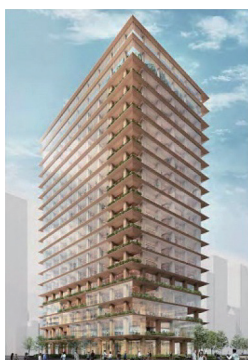


Fig. 2.3 N計画  
N project

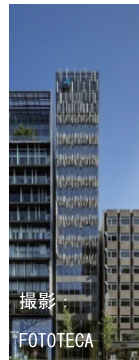


Photo 2.3 HULIC & New GINZA 8 (左: 外観 右: CLT合成床)  
(Exterior and CLT composite slab)



直交集成板)を新築のRC造および鉄骨造建物において使用するものである。

RC造建物に適用する場合は、上下辺を凹凸形状(コッター)に加工したCLTパネルをRC骨組に組み込んで一体化する。上下辺のコッターがRC骨組と嵌合することで接合金物を用いることなくせん断力を伝達可能な機構となっており、RC骨組の変形能力を損なうことなく剛性・耐力を高めることができる。

鉄骨造建物に適用する場合は、CLTパネルと鉄骨梁をせん断金物で接合し、CLT両側にタイバーを配置する。地震時にはせん断金物でせん断力を伝達するとともに、CLTの圧縮ストラットと引張側タイバーによってトラスを形成することで変動軸力を処理する(Fig. 2.4)。

RC造、鉄骨造のいずれに適用した場合も、CLTは建物重量を支える役割を担わないため耐火被覆無しで使うことができ、現しの木による温もりのある空間を創出することが可能である。これまでに兵庫県林業会館(Photo 2.4, 2019年, 5階, 鉄骨造)、タクマビル新館(Photo 2.5, 2020年, 6階, 鉄骨造)、プライド神田駿河台(Photo 2.6, 2021年, 14階, RC造)、FOREST GATEWAY CHUO(2021年, 6階, RC造)などで取り入れられている。

また、燃エンウッドを拡張するラインナップとして開発されたのが「燃エンウッドCLT耐力壁」(Fig. 2.5)である。燃エンウッドCLT耐力壁は、CLTの荷重支持部と、柱・梁の燃エンウッドと同様に燃え止まり層および燃え代層を有する耐火部材である。2時間耐火性能を有しており、水平力への抵抗と建物重量の支持の両方が可能である(2020年に2時間耐火の耐力壁として国土交通大臣認定を取得)。これにより、柱を用いることなくCLTのみで建物を支持することが可能となる上、CLT表面を耐火被覆で覆わない木現し仕上げとすることができる。警固竹友寮(Photo 2.7, 2023年, 5階)ではこの燃エンウッドCLT耐力壁を採用し、RCフラットスラブと組み合わせることで開放的な木質空間を実現している。

柱・梁・壁に加えて、床の木造化技術も実現されている。CLTとRCスラブを組み合わせた技術である「CLT合成床」は、CLT上にRCスラブを打設したものであり、CLTとRCの境界面にシアキーを配置することでCLTとRCスラブの一体性を高め、RCスラブの剛性を増大させている。CLTはRCスラブの型枠および天井の仕上げ材としての役割も担っており、床の構造性能を向上させながら施工性・意匠性にも配慮した合理的な技術である。本技術はHULIC & New GINZA8(Photo 2.3, 2021年, 12階)で採用されている。

ここで示した木造技術は純粋な木造建築ではなく、

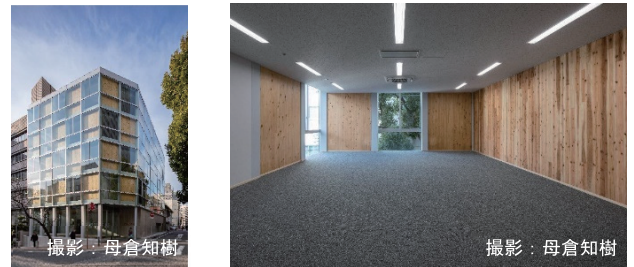


Photo 2.4 兵庫県林業会館 (左:外観 右:内観)  
Hyogo prefectural forestry hall (exterior and interior)

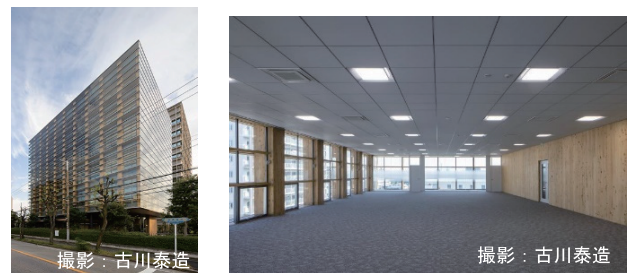


Photo 2.5 タクマビル新館 (左:外観 右:内観)  
Takuma new building (exterior and interior)

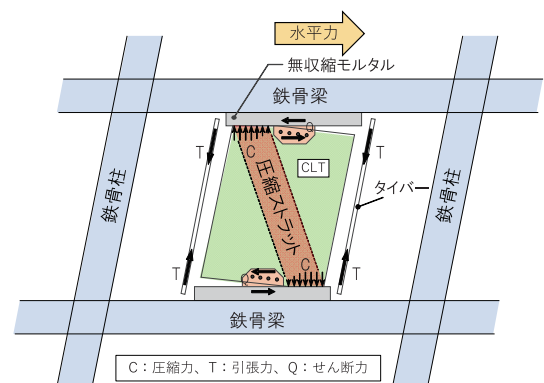


Fig. 2.4 KiPLUS WALL 鉄骨造に適用した場合のイメージ  
image of KiPLUS WALL for steel structure



Photo 2.6 プライド神田駿河台 (左:外観 右:内観)  
Proud Kandasurugadai (exterior and interior)



Photo 2.7 警固竹友寮  
Kego Chikuyuryo

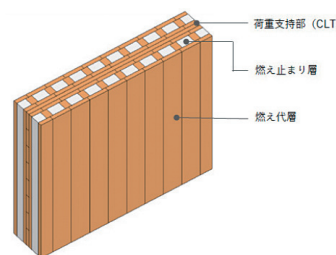


Fig. 2.5 燃エンウッドCLT耐力壁  
Moenwood load bearing wall

鉄骨造やRC造と併用することを前提としている。これは経済性や構造合理性のためでもあるが、より多くの建物に木造を取り込むことで木造に触れる機会を増やすことが、今後の木造技術や木造デザインの発展に寄与すると考えられるからである。

## 2.3 現しで使える耐震改修技術

### Exposed Timber Technologies for Seismic Retrofitting

木材の活用は新築建物に限られたものではない。木質材料を用いた既存RC造建物の耐震改修技術として「T-FoRest」シリーズを展開している。従来工法では既存建物内にRC耐震壁を構築したり、鉄骨のブレースを取り付けていたが、本技術では、耐震壁やブレースに木質材料を使用することで補強部材そのものに意匠性を持たせることができる。

T-FoRestシリーズは、木質の耐震壁であるT-FoRest Wall (Fig. 2.6), 集成材をブレースに用いるT-FoRest Light (Fig. 2.7), 蝶形のCLTブロックを壁状に積むT-FoRest エストンブロック (Photo 2.8) の3種類の工法がある。

T-FoRest Wallは、エポキシ樹脂系接着剤を用いて木質パネルを既存柱・梁に取り付ける工法で、木質パネルにはLVL (Laminated Veneer Lumber, 単板積層材) とCLTの2種類の木質材料が使用できる。LVLは鉛直方向の剛性が高いため地震時には接着界面に強い摩擦力が生じ耐力の向上が見込めるメリットがある一方、CLTは自然な板目を得られるため意匠上の理由で選択されることも多い。本工法の耐力は接着部に接するコンクリート母材のせん断耐力が上限を決めており、同じ厚さのRC壁を構築する既存工法と比較すると耐力はやや劣るか同等程度であるが、剛性は低い。このため一般的なRC耐震要素と比較して最大耐力がより大きな変形角まで発揮されないが、補強可能な場所が少ないケースでは偏心率の増大を防ぎながら補強を行うことも可能である。T-FoRest Lightはブレースである利点を生かし開口や人の通行がある場所にも適用が可能である。本工法はFig. 2.6に示すようにブレース端部に設置したバネを用いてプレストレスをかけ既存躯体に圧着することで圧縮ブレースとして用いる施工を簡易化した工法と、PC鋼棒を内蔵し圧縮引張両方に効果を発揮する工法の二つがあり、補強計画や必要性能に応じて選択することができる。T-FoRest エストンブロックは蝶形のブロック形状を積み上げて耐震壁を構築する工法である。ブロック同士のかみ合いを利用してせん断力を伝達するため構造性能の向上に寄与するだけでなく、意匠面の特徴にもなっている。またブロックが現しとなる面に様々な加工を施すことで立体感のある表現が可能となっている。一つ一つのブロックは10kg以下と非常に軽量であり、施工効率化に大きく寄与している。

T-FoRestシリーズに共通する特徴は、木材の意匠性を生かせるだけでなく、施工時のメリットが大きいことである。いずれの工法も既存躯体へのアンカー工事を無くし、低騒音・低振動かつ短工期で施工が可能で、建物を使用しながらの耐震補強に適する。また、木材の比重が軽いことから、搬入時、施工時の重機の使用の削減が可能である。施工条件に制限の大きい耐震改修工事において、木材を活用することで施工性の向上とデザインを両立させることが可能となった。

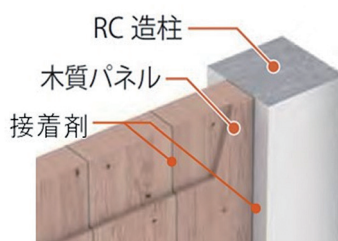


Fig. 2.6 T-FoRest Wallのディテール  
Detail of T-FoRest Wall

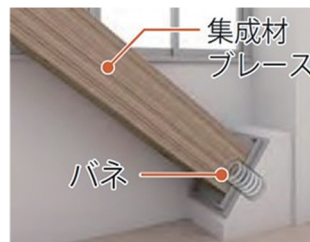


Fig. 2.7 T-FoRest Lightのディテール  
Detail of T-FoRest Light

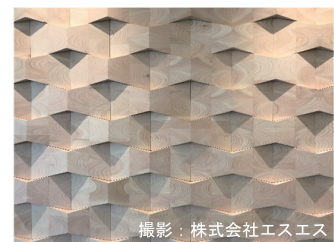


Photo 2.8 T-FoRest エストンブロックの立体表現  
Stereoscopic expression by T-FoRest  
ESTONE blocks

## 2.4 これからの木造技術

### Future Timber Technologies

木造建築が普及し市場が拡大する中で、今後はより大規模化・高層化を可能にする技術や、より意匠性の優れた技術が求められることが考えられる。本節では、これからの木造建築市場のニーズを見据えて現在開発が進められている技術について述べる。

木造建物の大規模化・高層化をさらに推進する技術として現在開発を進めているのが「新耐火木構造システム」である。これまで大規模木造建築に使用されてきた木造の柱・梁は建物の自重を支える役割を担うのみで、地震や



風による水平力に対する抵抗力は評価せず、併存するRCまたは鉄骨架構に水平力を負担させる設計とするのが一般的だった。これに対し新耐火木構造システムでは、建物自重を鉄骨部材が支持し、水平力への抵抗要素として集成材を積極的に使用する。このシステムは、建物自重を支持する鉄骨柱・梁を集成材からなる外殻架構で被覆したもので、外殻集成材架構の柱梁接合部に方杖を配置することで木造部分に水平力を負担させるものである。また、この外殻架構は鉄骨の耐火被覆としての役割も担っている。

新耐火木構造システムでは鉄骨架構が建物自重を負担するため、従来の耐火木造建築に比べて大スパン化が可能であり、大規模かつ自由度の高い建築空間の計画が可能である。また、木造建物を高層化した場合、経年により集成材柱に発生する大きなクリープ変形により、クリープ変形後の建物骨組みの応力状態の想定やクリープ変形を考慮した仕上げ材納まりの調整といった設計上の配慮が必要となるが、本システムでは建物重量を鉄骨で支持するためクリープ変形が発生せず、こうした設計上の配慮が不要になるという利点もある。このように、新耐火木構造システムは木造建築の高層化・大規模化のニーズに応えるものであり、中高層建物の実プロジェクトへの適用を目指している。

意匠性に優れた技術としては、木に特有の力学性状である「めり込み」を活用した「木架構用ガラス耐震壁」の開発が進められている。

木は異方性材料であり、作用する力の方向と木の繊維の方向の関係に応じて発揮される強度・剛性が異なるという特性がある。繊維に直交する方向に力が作用した場合には、剛性は低いものの高い変形性能を示す「めり込み」と呼ばれる性状を示す。めり込みは鉄やコンクリートには見られない木特有の性状であるが、これを活用した技術が「木架構用ガラス耐震壁」である。これは木造の柱梁フレームに透過性のあるガラスを耐震壁として組み込むもので、地震時にはこのガラスが水平力に抵抗するが、周囲の木部材のめり込み特性を利用し、木架構にガラスをめり込ませることでガラスの損傷を抑えながら耐震性能を確保することを狙った技術である。

木架構に組み込むことのできる従来の耐震要素は、合板やCLTあるいはブレースといったものであり、木造建物の耐震性能を向上させることは建物の中に閉塞された空間を作ることと対になっていた。これに対し、透明耐震壁は透過性のある耐震要素というユニークな技術であり、建築空間を閉塞することなく耐震性能を向上させることができ、新たな木造建築のデザインの可能性を広げるものである。

このように、既存の技術や考え方に捉われずに、これからの木造建築に求められるものを見据えながら技術開発を進めており、木造建築のデザインの発展に貢献することが期待される。

## 2.5 本章のおわりに

### Conclusion of This Section

現在、非住宅分野における木造建築はかつてないほど注目を集め、急成長している分野である。一方で木造は他構造の技術と比較すると発展途上で、接合部の高剛性・高耐力化やクリープ変形への対策方法の確立といった多くの技術的課題が残されている。現状を一過性のブームに終わらせず、今後さらなる木造建築の発展と普及を目指すためには、建築材料として鉄やコンクリートを代替するのではなく、木材の意匠性と、材料特性を生かした構造合理性を高度に両立させ、従来の建築にはないスケール感やオーダー感を持つ新しい建築空間の提案が期待される。また、建物としての価値を高めるために、木質化された空間が人間に与える心理的・身体的影響や脱炭素社会への貢献度を定量的に評価する手法を確立することも重要である。こうした木造建築を実現するためには設計技術と構造技術および耐火技術のより一層の進化が不可欠である。本稿で紹介した技術を洗練させるとともに新たな技術を開発することによって、多様な建築デザインと豊かな建築文化を育て、さらにはカーボンニュートラル社会の実現に貢献していきたい。

## 参考文献

- 2.1) 宮崎 賢一, 西田 恵, 森 一晃, 瀬戸 洋子, 石川 敦雄, 菅原 努, 吉岡 有美, 石本 明子:「都市型木造医療施設における室内環境が利用者に与える効果調査 その1 非木質空間と木質空間における利用者の心理比較」, 日本建築学会大会, 2017年7月
- 2.2) 木のイノベーションで森とまちの未来をつくる <https://www.takenaka.co.jp/enviro/feature/02/>

### 3 コンクリートの美観デザインを支える技術 Technologies Supporting Aesthetic Design of Concrete

井上 和政 Kazumasa Inoue\*4 松下 哲郎 Tetsuro Matsushita\*4

近年、鉄筋コンクリート造系（以下、RC造系）建築物に使用されるコンクリートには、地震などに抵抗する構造体としての強度や剛性等の構造材料としての性能だけでなく、建物種類によっては最終の仕上げ（フィニッシング）材料としての、または仕上げ材料の直接の下地としての仕上がり品質が要求されるようになってきている。例えば、化粧打放し仕上げ建物では、豆板や未充填部、コールドジョイント等の施工時に発生しやすい不具合がないこと、建物の供用期間においては、ひび割れが少ないこと若しくはないことが要求される。また、塗装仕上げや漆喰・珪藻土仕上げ等の仕上げがある建物の場合にも、仕上げ材料の直接の下地として、化粧打放し仕上げとはほぼ同様の品質が要求される場合がある。そしていずれの場合も、長期間の供用に対して中性化による鉄筋腐食等の耐久性に関連する劣化が生じないことが重要となる。また、現場打ちのコンクリート建物だけでなく、プレキャスト部材等の工場製品も含めて、意匠性の観点からコンクリート表面の仕上がり品質やその色調・光沢度の制御が要求されることがある。そして、これらの仕上がり品質や要求性能が確実に発現されるためには、各種仕上げ等の高い熟練の技能を十分発揮させる施工管理能力による確実な施工が重要で、確実な施工によってはじめて所要の設計性能が発揮されることになる。

ここでは、当社建物の魅力あるデザインの実現をより高度に支えるために開発しているコンクリート技術として、無収縮タイプコンクリート（ファインリード）<sup>3,1)</sup> とECMカラーコンクリートについて紹介する。

#### 3.1 無収縮タイプコンクリート（ファインリード） Non Drying Shrinkage Type Concrete (FINELEAD)

近年の環境問題対応や品質に対するより厳しい要求に対応するため、コンクリートには様々な特性や付加価値が求められるようになってきている。特にRC造系の建物では、より長く建物が使用されるように、建物の耐久性だけでなく、耐久性にも影響を及ぼす一要因の美観についても高い品質が求められるようになってきている。特に化粧打放し仕上げ等のRC造系の建物を魅力ある美しいデザインとして実現していくためには、地震等に抵抗する構造体としての強度や剛性、耐久性等の基本性能・品質の確保だけでなく、その表面の出来栄等にも高い品質等が要求される。コンクリートの表面に生じやすい不具合としては、①豆板・未充填部・コールドジョイント等の施工時に発生するものと、②乾燥収縮等によるひび割れ、③中性化等の耐久性の劣化に起因した腐食鉄筋の錆汁汚れ等の長期供用期間中に発生するものがある。これらをできる限り抑制することで、当社の高いデザインを技術でより高度に実現することが可能となる。高いデザイン性を有する建物の基盤となるコンクリート表面を実現するため、既開発の低収縮コンクリート技術<sup>3,2)</sup> をより高度化した、高スランプ仕様と高流動仕様の2種類の無収縮タイプコンクリート（ファインリード）を開発・適用し、曲面壁や杉板本実化粧打放し壁等の高い意匠性の建物を高品質で実現している<sup>3,3), 3,4)</sup>。ファインリードは、高スランプ～高流動による良好な施工性と、見かけの無収縮性能による極めて高いひび割れ抵抗性能、中性化抵抗性向上による高耐久化性能を有しており、①～③を極力低減・抑制する効果が期待できる。ファインリードは、Fig. 3.1に示すように石灰碎石の利用と経済性を考慮した新規化学混和剤によりコンクリートの乾燥収縮率を300μ程度以下にまで極力小さくし、かつ併用する膨張材による初期膨張率によりこれをキャンセルすることで、見かけ無収縮な挙動を実現したコンクリートである。現在までに高スランプ仕様<sup>3,1)</sup>

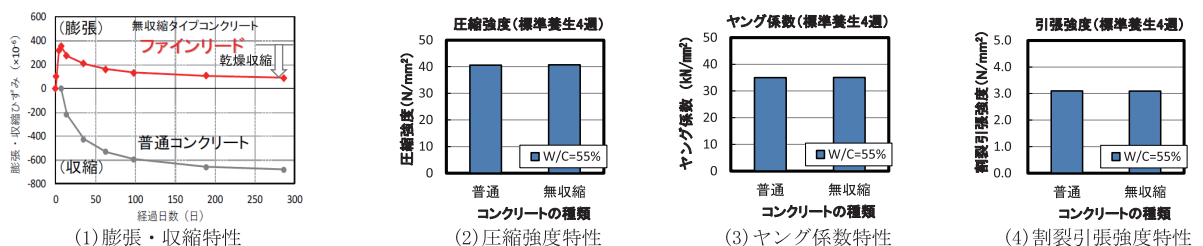


Fig. 3.1 ファインリードの基礎物性  
Properties of FINELEAD

\*4 技術研究所 主席研究員 博士(工学) Senior Chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.

のファインリードSとスランプフローの性能を付与した高流動仕様<sup>3,5)</sup>のファインリードFが開発され、いずれも実用化されている。圧縮・引張強度やヤング係数が同一水セメント比の普通コンクリートと同等なため、構造設計を再度行うことなく、普通コンクリートに置き換えて使用することが可能になっている。これらのコンクリートは、見かけの無収縮挙動により、柱や梁などの厚い部材から拘束される壁の場合でも引張応力がほとんど発生せず、仮に発生しても $0.5 \sim 0.7 \text{ N/mm}^2$ 程度と極僅かであるため、ひび割れ発生応力の予想ライン ( $0.7 \text{ ft} = 2.5 \text{ N/mm}^2$  強程度) に対して数倍程度の余裕度がある (Fig. 3.2参照)。このため無開口壁等の一般部だけでなく、応力集中する開口部まわりの収縮ひび割れを低減・抑制する効果が期待できる。更に、ファインリードSやファインリードFは、その見かけの無収縮性の実現による炭酸ガス等の透気係数の低減など<sup>3,4)</sup>の付加的な効果として、Fig. 3.3に示すように、同一強度の普通コンクリートに比べて中性化の進行がかなり遅くなる傾向を示す。最近の研究によれば、中性化の進行を示す中性化速度係数が、普通コンクリートの0.7倍程度以下 (例えばFig. 3.3の(1)で $1.232/2.282 = 0.54$ 倍, (2)で0.60倍, (3)で0.67倍) となるため、中性化に関する√則による寿命換算では、普通コンクリートの2倍以上の寿命が期待できる。このため、中性化が鉄筋位置まで進行し鉄筋の発錆が開始する時期を大幅に遅らせる効果が期待できる。これにより、無収縮挙動によるひび割れ抑制効果とも併せて、鉄筋腐食に起因した錆汁の発生によるコンクリート表面の汚れ等の発生も大幅に遅らせることができる。

また、各種ファインリードは以下の各性能を有しているため施工性が高く、より確実な施工の実現に対しても貢献可能となっている。高スランプ仕様のファインリードSでは、同一スランプの普通コンクリートに対してフレッシュ時の粘性が若干小さいため、振動締固めの作業を容易にすると同時に、その作業量を軽減できる特性を有している。また高流動仕様のファインリードFでは、スランプフロー45cm以上の高流動・自己充填性を有しているため、その高い自己充填性と骨材等に対する高い材料分離抵抗性によって、豆板や未充填部等の施工時の不具合の発生を大幅に抑制する。振動締固め作業の大幅な軽減効果と併せて、建物のより確実な施工による品質確保に貢献可能となっている。

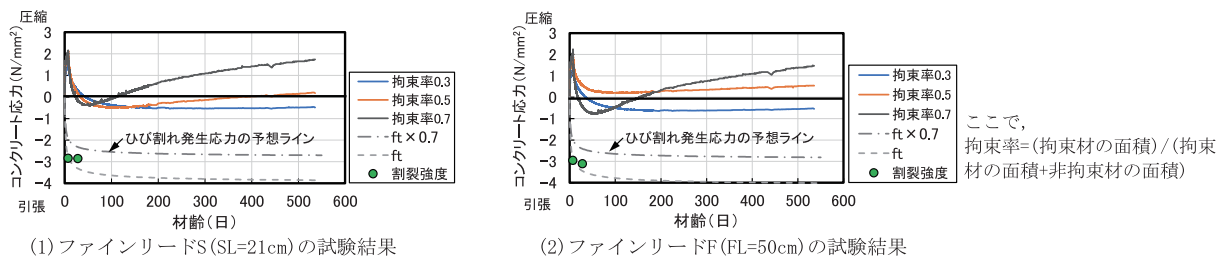


Fig. 3.2 ファインリードによる各種拘束条件下での発生応力の試験結果<sup>3,5)</sup>

Test results of generated stress under various restraint conditions with FINELEAD

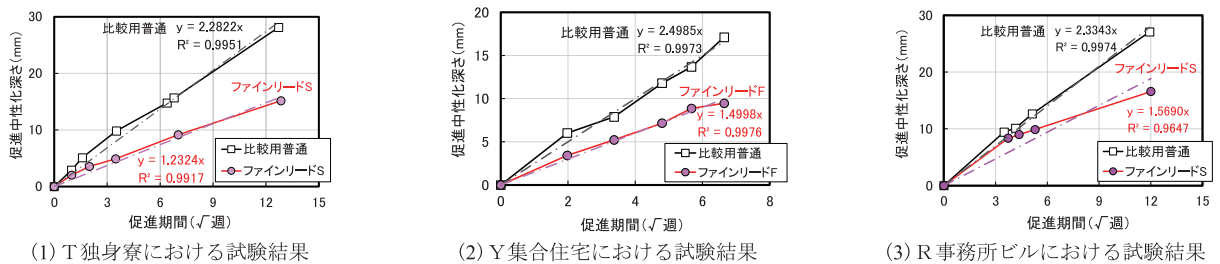


Fig. 3.3 各種ファインリード適用建物の中性化抵抗性向上効果 (試験練り時結果)<sup>3,1), 3,3), 3,4)</sup>

Effect of improving the carbonation resistance of buildings to which various FINELEAD are applied

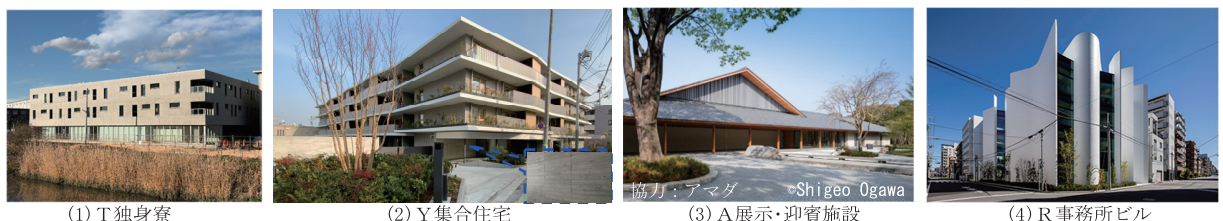


Photo 3.1 ファインリードを適用した建物の例<sup>3,1), 3,3), 3,4)</sup>  
Examples of buildings with FINELEAD applied



各種のファインリードは、Photo 3.1の(1)～(4)に示すように、日本コンクリート工学会やfibの作品賞、グッドデザイン賞等の各賞を受賞した当社設計・施工の作品に広く適用されている。高スランプ仕様のファインリードSは、Photo 3.1(1)に示すように化粧打放し仕上げのT独身寮に、また高流動仕様のファインリードF<sup>(3,4), 3.5)</sup>は、(2)に示す杉板本実化粧打放し仕上げのY集合住宅のエントランス部分等に適用され、いずれも高い意匠性のRC部材を有する建物を実現している。更にファインリードSは、化粧打放し仕上げの建物だけでなく、Photo 3.1の(3)～(4)に示すように漆喰・珪藻土仕上げのA展示・迎賓施設や塗装仕上げのR事務所ビルにも適用され、意匠性の高い建物の実現に貢献している。

### 3.2 ECMカラーコンクリート Colored Concrete with ECM Cement

建築で使用されるコンクリートは、一般的に表面に仕上げ材料があることが多いが、近年、建築主・設計者から意匠性の高い打放しコンクリートのニーズも増えてきており、カラーコンクリートはコンクリート構造物の魅力的なデザインの実現を支援する技術である。カラーコンクリートは、コンクリートに微粉末の無機顔料を混ぜることにより、コンクリートそのものに色をつけたコンクリートであり、当社の設計・施工物件でもこれまで数件適用実績がある。コンクリートに様々な色を着色する場合に問題となるのが、普通セメント自体の灰色により、発色性が低下することである。その問題を解決するためホワイトセメントを用いる方法もあるが、大臣認定が必要となり適用可能プラントが少ないことや経済性の問題などにより採用が難しいのが現状である。

そのような中で、鉄鋼製造の副産物である高炉スラグ微粉末を60～70%程度、普通ポルトランドセメントを30%程度含有し、高炉セメントC種のJIS規格に適合するECM (Energy CO<sub>2</sub> Minimum) セメントを使用したECMカラーコンクリートを開発し適用を進めている。ECMセメントは、環境性能と基本性能(施工性、強度、耐久性)の両立を図ることをコンセプトに開発されており、CO<sub>2</sub>排出量の多い普通ポルトランドセメントの使用量を減ずることにより普通ポルトランドセメントに比べて約60～70%のCO<sub>2</sub>排出量が削減でき、JIS規格内で石膏を最適量添加しており、以下のような材料の特徴を持つ<sup>3,6)</sup>。①水和熱が小さく部材内の温度上昇を抑制できる。(Fig. 3.4) ②高炉セメントに比べ強度発現性が改善している。(Fig. 3.5) ③収縮ひずみを低減できる。(Fig. 3.6) ④塩化物や酸などに対する抵抗性が高い。これらの特徴を活かして、これまで東京・大阪を中心に耐圧盤・基礎や場所打ち杭など地下構造物に数多く適用され、また、現在検討を進めているカーボンネガティブコンクリートの開発<sup>3,7)</sup>においても中核をなす材料である。

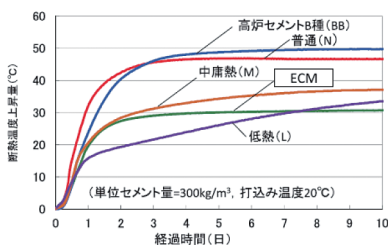


Fig. 3.4 断熱温度上昇量測定の一例<sup>3,6)</sup>  
Adiabatic temperature rise amount

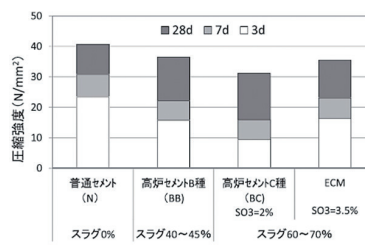


Fig. 3.5 圧縮強度特性の一例<sup>3,6)</sup>  
Property of compressive strength

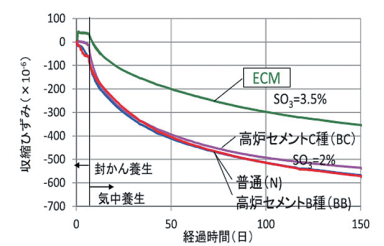


Fig. 3.6 収縮特性の一例<sup>3,6)</sup>  
Shrinkage property

ECMセメントは白色の高炉スラグ微粉末を60～70%含むことから普通セメントと比較して発色性が高く、ECMコンクリートの技術認証を取得していること、JIS範囲内のセメントで適用可能プラントが多いこと、かつホワイトセメントを用いたコンクリートと比較して経済性も向上するなどのメリットがある。つまり、ECMセメントを使用したECMカラーコンクリートは、環境性能と基本性能を両立した意匠性と汎用性と経済性を兼ね備えたカラーコンクリートが実現できる。ECMセメントの発色性は、Fig. 3.7に示すように全体的な傾向として普通セメントより高くホワイトセメントより低い傾向ではあるが、ホワイトセメントと同等の発色性を示す色もあり、建築主、設計者の様々な色のニーズに対して対応が可能である。また、ECMセメントに無機顔料を添加した場合の圧縮強度、静弾性係数の試験結果をFig. 3.8に示すが、セメント外割りで無機顔料を添加することで強度特性が変化しないことを確認している。

プラントでの試験練りに時に製作したECMカラーコンクリートのテストピースをPhoto 3.2に、ECMカラーコンクリートの適用例の一例をPhoto 3.3に示す。これまで数件の適用実績があり、適用に際しては、プラントでの試験練りで調合を検討し、特殊なコンクリート施工となるため、実機プラントを用いた試験施工を行い、最適な調合や施工方法

	白	黒	赤	青	黄	緑	茶
ホワイト							
ECM							
普通							

Fig. 3.7 ECMセメントの発色性能（顔料2%添加）  
Color development performance of ECM cement

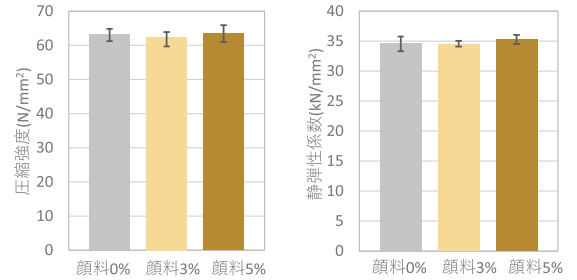


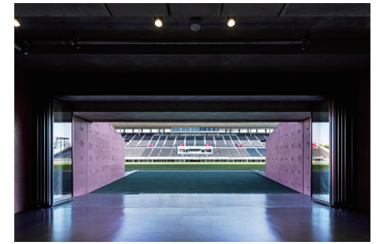
Fig. 3.8 顔料を入れた場合の強度特性  
Property of compressive strength when pigment is added



Photo 3.2 プラントでの試験練り状況  
Test mixing at ready-mixed concrete plant



Photo 3.3 ECM カラーコンクリートの適用例  
Application example of colored concrete with ECM cement



撮影者「エスエス大阪支店 津田 裕之」

を選定している。また、ECMカラーコンクリートは、ECMコンクリートに無機顔料を現地で入れることから、事前に確認申請機関と協議の上、受入れ試験のタイミングを荷下ろし時と無機顔料投入後として、品質確認を行っている。

### 3.3 本章のおわりに

#### Conclusion of This Section

当社の魅力あるデザインの実現を支えるコンクリート技術として、建物の収縮ひび割れを大幅に低減・抑制することで美観向上に貢献する無収縮タイプコンクリート（ファインリード）と、コンクリートの色調制御を高いレベルで実現して美観向上を実現するECMカラーコンクリートを紹介した。今後は、これらの技術を魅力ある品質としてその展開を進めながら、設計者のより高い要求にもこたえられるように更なる技術の高度化等を進める予定である。また、コンクリートに対する要求は、時代背景などによっても常に変化し複雑化する。そのため、将来により多様化すると予想される設計者の要求にも対応できるよう、様々な性能・品質に関する基礎的な研究開発を継続しながら、その応用・展開が可能となるように技術開発も同時に推進させて、更なる魅力的な性能・品質を実現していく予定である。

### 参考文献

- 井上和政, 本間大輔, 小川亜希子他: ハイブリッド高性能AE減水剤と膨張材を併用した無収縮タイプコンクリートの開発と適用, 日本建築学会技術報告集, Vol.27, No.65, pp.30-35, 2021年2月
- 井上和政, 岩清水隆, 齊藤和秀他: ハイブリッド高性能AE減水剤を用いた低収縮コンクリートの開発と建築物への適用によるひび割れ低減効果の検証, 日本建築学会技術報告集, Vol.16, No.34, pp.849-854, 2010年10月
- 佐藤敏之, 井上和政, 本間大輔他: 無収縮タイプコンクリートの曲面壁への適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.117-118, 2020年9月
- 井上和政, 本間大輔, 小川亜希子他: 新規一液型高性能AE減水剤を用いた高流動低収縮コンクリートの開発 (その17.杉板本実化粧打放し壁への適用), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp.519-520, 2023年9月
- 井上和政, 小川亜希子, 佐藤敏之他: 新規ハイブリッド高性能AE減水剤を用いた高流動・超低収縮コンクリートの開発と適用, 日本建築学会技術報告集, Vol.29, No.72, pp.609-614, 2023年6月
- 辻大二郎: 低炭素型コンクリート「ECMコンクリート」, 竹中技術研究報告, No.73, pp.5-6, 2017
- 取違剛, 森泰一郎, 小島正朗: 革新的カーボンネガティブコンクリートの材料・施工技術及び品質評価技術の開発—CUCO-Carbon Utilized COConcrete—, コンクリート工学, Vol.61, No.6, pp.520-527, 2023.6

## 4 デザインの自由度を高める3Dプリンター活用技術 Technology Using 3D Printer that Enhance Design Flexibility

太田 義弘 Yoshihiro Ota\*5

### 4.1 技術概要

#### Overview

建築の歴史において、意匠及び構造のデザインは、材料及び施工の技術の進展とともに新たな形を具現化し、新たな形を具現化しようとするデザインの挑戦によって材料及び製作の技術の進展を促したと言える。3Dプリンターは、従来必要だった型を用いることなく形状造形を可能とする材料の技術及びそれを活用した施工の技術を大きく進展させるものとして位置づけられ、デザインにおける新たな挑戦へと導くものと考えられる。

建築業界における3Dプリンターは、従来の生産プロセスを革新する新たな部材等の製造技術として語られることが多い。モルタル系3Dプリンターによるローコスト・少人数の住宅の構築はその1つの事例<sup>4.1)</sup>と考える。しかし一方で、様々な条件に対する最適化といったコンピューティショナルな設計技術とそれによって設計された複雑で従来の施工技術では手間のかかる形状を3Dプリンターによるフレキシブルかつ高精度の施工技術をデジタルでつなげ、優れた建築空間や造形創出への挑戦も行われている。我々はこの3Dプリンターを使った新たな建築空間や造形創出に着目して、トポロジー最適化を用いた設計と樹脂と金属を材料とした3Dプリンターを使った2つの新たな取組を実施した。ここで、トポロジー最適化は設計する空間にどのように材料を配置すれば最適な構造となるのかを計算する方法である。設計する空間・荷重条件・拘束条件などの複数の制約条件下において、期待する性能指標を最大化する配置を計算することである。トポロジー最適化自体は以前より利用されてきた手法であるが、建築分野においては普及してこなかった。設計した形状をそのまま具現化する3Dプリンターの出現により、トポロジー最適化によってされた形状を実現する可能性が大きく広がった。以下にその具体的な事例の概要を示す。

### 4.2 集成材による大屋根を実現する鋼製接合部

#### Steel Joint that Create a Large Roof with Timber

木構造は、脱炭素や人に安らぎを与える建築構造として近年脚光を浴びている。木構造における課題はその材料が有する強度異方性により、複数の方向からの力を伝達する接合部の性能確保にある。この課題を解決するとともに自由な形態の大屋根を実現することを目的に、木部材の接合部を金属3Dプリンターによって製造することを考える。適用イメージをFig. 4.1に示す。金属3Dプリンターの造形方式はエネルギー源・熱源（レーザー、電子ビーム等）、元の材料の状態（パウダー、ワイヤ）、材料の供給方式（パウダーベッド、ワイヤ供給等）によって分類される<sup>4.1)</sup>。今回の3Dプリンティング技術はアーク溶接方式（WAAM：Wire and Arc-based Additive Manufacturingの略、ワイヤとアーク溶接を用いた金属積層造形技術）を採用した。アーク溶接方式は、材料の単価がパウダー方式に比べて非常に安く、プリンティング速度も優れる方法である。

この木部材の接合部に関しては、このアーク溶接方式を用いて内部を中空にしてその中空部にはモルタルを充填することとした。これは中空部にモルタルを充填することで溶接する絶対量を減らして、プリンティングに要する時間とコストを削減することを狙いとしている。溶接ワイヤには、強度と耐食性に優れた二相ステンレス鋼の溶接に用いる製品を使用した。

接合部は、様々な角度からの異なる断面の部材が複数取りつ



Fig. 4.1 適用イメージ  
Application image

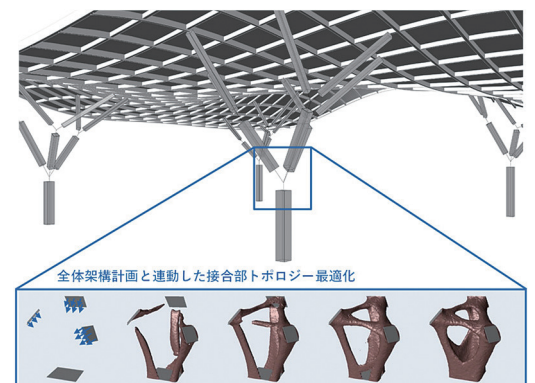


Fig. 4.2 トポロジー最適化  
Topology optimization

\*5 技術本部 技術戦略部 シニアチーフエキスパート 博士(工学) Senior Chief Expert, Technology Strategy, Technology Division, Dr. Eng.



くことに対応できることを想定して、接合部に用いる金属材料の最小化を目的にトポロジー最適化を用いて3Dプリンティングが可能な接合部形状が自動的に生成される設計プロセスとなっている（Fig. 4.2）。複数の木部材からの接合部への断面力及び接合部の拘束条件に対して、必要な耐力を満たしつつ接合部の使用する材料が最も少なくなる形状を導き出すことになる。今回、4つの木造部材が取りつく接合部を試作した（Photo 4.1）。

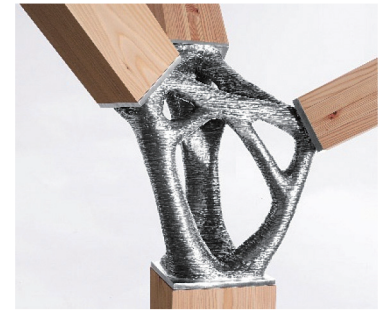


Photo 4.1 接合部  
Joint by 3D printing

#### 4.3 樹脂系3Dプリンターによる静岡営業所サイン Sign at Shizuoka Office by Resin 3D Printer

当社の静岡営業所のサインは、樹脂系3Dプリンターによって製作された（Photo 4.2）。このサインは炭素繊維強化プラスチックによる3次元格子（Photo 4.3）に発泡樹脂を充填して、ガラス繊維強化コンクリートやしっくいなどで表面を仕上げる技術によって製作された。

そのプロセスを以下に示す。

##### (1) 大まかな形態の設定

当社からのスケッチ図（Fig. 4.3）を基に、3Dプリンターを使って製品を作るメーカーとディスカッションを行い、形状のイメージを設定した。

##### (2) 材料の最小量化を目的とした形状の設定

炭素繊維強化プラスチックによる3次元格子の材料の量を削減しつつサインの耐力を確保することを目的に、形状の詳細や支持条件を変えながらトポロジー最適化を実施した（Fig. 4.4）。

##### (3) 構造解析による最終形態の決定

トポロジー最適化したモデルのデータを用いて、各材料の強度を入力し3次元格子の大きさ、長さや節点の位置及び基礎に埋め込む大きさなどを検討し、詳細な形態を決定した（Fig. 4.5）。

##### (4) 3Dプリンターによる印刷

3Dプリンターによる印刷を行った（Photo 4.3）。製品検査は、現地及びオンラインにより3次元格子の太さや節点の状態などの確認を行った。

##### (5) 現地における設置

製品を日本に移送し、3次元格子の底板の部分をコンクリート基礎部に打ち込み、設置を行った（Photo 4.4）。

今回のサインにおいては、デザインの根幹をなす3次元格子の形態が、3Dプリンターを使って製品を作るメーカーが通常製作するものより複雑になった。そのため、



Photo 4.2 静岡営業所サイン  
Sign at Shizuoka office

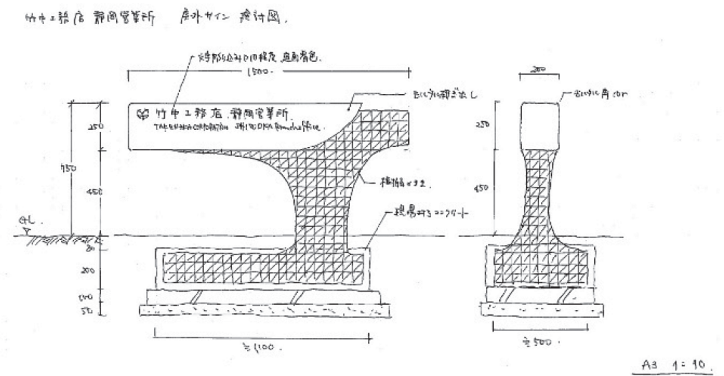


Fig. 4.3 サインスケッチ  
Sketch of the sign

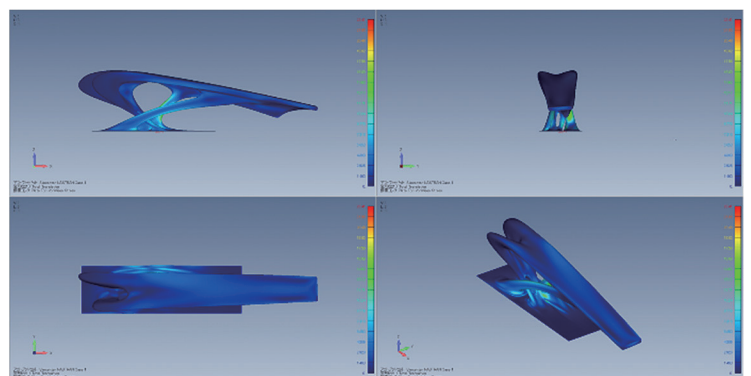


Fig. 4.4 トポロジー最適化  
Topology optimization

最終形態の決定や3Dプリンターによる印刷の段階で、当社と3Dプリンターを使って製品を作るメーカーがしっかりコミュニケーションを取ることによって完成に至った。



Fig. 4.5 最終形態設定  
Final configuration

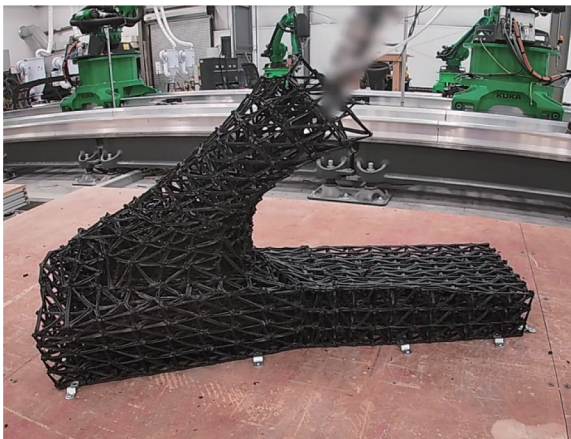


Photo 4.3 3Dプリンターによる印刷 (米国)  
Printing by 3D printer (USA)



Photo 4.4 現地での設置状況  
Installation status on site

#### 4.4 本章のおわりに

##### Conclusion of This Section

2つの事例を通して、3Dプリンターが材料や製作の技術を大きく進展させ、デザインにおける新たな挑戦へと導く可能性について示した。トポロジー最適化を用いた設計と、樹脂と金属を材料とした3Dプリンターを使った従来に無い方法で曲面を用いた自由な造形に対して材料と施工の効率化を図るものである。建築における3Dプリンターのものづくりは、まだ始まったばかりである。今後、ニーズの多様化とそれに対するマス・カスタマイゼーションといった中で、コストや品質管理等の課題をクリアしながら、様々な3Dプリンターの活用に関して考えていきたい。建物の部材製作にとどまらず新たな空間創出として、最新の大型3Dプリント技術と手づくりの融合により、みんなでつくる建築。使い終わったら解体され廃棄されるのではなく、分解されて土に還り、最後は森になるというSeeds Paper Pavilionといった<sup>4,3)</sup> 今後のサステナブルな社会を実現に向けての取組も行っている。本原稿の執筆にあたり、名古屋支店設計部小杉嘉文氏、大阪本店設計部大須賀史郎氏、技術研究所木下拓也氏には資料のご提供等のご協力をいただきました。この場でお礼申し上げます。

#### 参考文献

- 4.1) 例えば、服部 立, 小林 直明, 3Dプリンターによる仮設住宅の設計 パラメトリックデザインを活用した住空間の提供, 日本大学理工学部 学術講演会 2021.
- 4.2) 例えば、京極 秀樹, 池庄司 敏孝, 日刊工業新聞社, 図解 金属3D積層造形のきそ, 2017.10
- 4.3) 山崎 篤史, 大石 幸奈, Seeds Paper Pavilion「未来都市の種となる仮設建築とは」GA JAPAN 175, 2022.3



## 5 ファサードデザインを支える技術 Technologies Supporting Facade Design

菊池 卓郎 Takuro Kikuchi\*6 佐藤 恭章 Yasuaki Sato\*7 和田 一樹 Kazuki Wada\*8

### 5.1 ファサードが担う役割 Roles of the Facade

ファサードは建築の顔であり魅力的な意匠に欠かせない構成要素であり、その審美性の高い建築外皮とそれが形成する室内環境、ひいてはその環境にいる人の快適性などの体験価値を両立することが求められる。屋外から侵入するものを遮断するフィルターとしての役割を期待される一方で、室内に屋外環境を取り入れる役割も担う。それにより建物の運用エネルギーを下げ、かつ快適な室内環境を形成する。この役割を担うために、断熱や日射の遮蔽（遮熱）、通風、昼光利用、眺望、遮音、気密性、結露防止などの機能を総合的に考慮しひとつのシステムとしてファサードをデザインすることが要求される。特に快適性と省エネルギー性の観点で、遮熱、断熱および通風などの温熱環境に関わる機能と、昼光利用や眺望性などの光・視環境に関わる機能は重視される。

眺望性や採光性能を維持するためにガラスを広く採用しながらも、日射や貫流による熱の侵入を防ぐために、複数のファサードシステムが考案されている。底や屋外ルーバーは室内に入射して冷房負荷となる日射をガラスの外側で遮蔽することで、室内のブラインドよりもはるかに高い遮熱性能を持つ<sup>5.1)</sup>。ガラスの外側に配置したブラインドのさらに外側にもう一枚のガラスを設け、その二枚のガラスの空気層を通風して排熱するものをエアフローウィンドウ・ダブルスキンと呼ぶ。すっきりとした外観を提供し、ブラインドを風雨から守りながら屋外ルーバーに近い遮熱性能とそれ以上の断熱性能を得ている<sup>5.2)</sup>。ダブルスキンと比べて、室内側のガラスの断熱性能を高める代わりに通風機構を排除したものをクロズドキャビティファサードと呼ぶ。遮熱性能を維持しながらより高い断熱性能を発揮する<sup>5.3)</sup>。

我々は、こういったファサードの機能を提供するハードウェア技術<sup>5.2), 5.3)</sup>、機能を事前に予測し最適に設計するソフトウェア技術<sup>5.1), 5.4)</sup> および機能の価値を定量する評価技術<sup>5.5), 5.6)</sup> を研究開発してきた。

近年、脱炭素社会実現の要請とウェルネスへの関心が高まる中、新しい役割がファサードに要求されている。これまで一般的非住宅建築物は暖房負荷よりも冷房負荷が大きかったため、日射遮蔽性能が重視されてきたが、建物の省エネルギー化が進み建物内部での発熱が減った結果、暖房負荷が増加し改めて断熱性能の重要性が見直されている<sup>5.3)</sup>。また、執務者が自ら環境を変えられることは、執務者の自己効力感やワークエンゲージメント（仕事に積極的に向かい活力を得ている状態。以下、WEn）を高め生き生きと働くことができる効果を生む可能性が指摘されている<sup>5.7), 5.8)</sup>。ファサードに備わる開閉可能な窓を自ら操作したり、窓際空間の環境の不均一さを取って抑制し過ぎずに建物内に多様な環境を形成させ、使い方に応じた場所の選択などができるワークスタイルを提案する試みが進む。次節ではこれらの新しい潮流に取り組んだ建物事例を通して当社のファサードデザインを支える技術を紹介する（Fig. 5.1）。

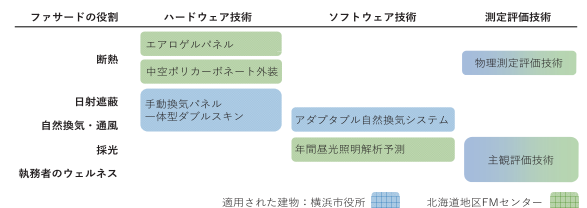


Fig. 5.1 次節で紹介する技術の位置づけ  
Positioning of the technologies presented in the next section

### 5.2 ファサードデザインを支える当社の技術の事例 Examples of Our Technologies behind Facade Design

#### 5.2.1 横浜役所における事例

本プロジェクトは、SDGs未来都市横浜として持続可能な大都市モデルの確立、ひいては全世界的課題である脱炭素化の早期実現のフラッグシップとなるべき市役所を実現するため、建築・構造・設備の高度な技術を融合した都市型の超高層ランドマークのあり方を追求した（Photo 5.1）。建物の適正な配置・プランニングや高性能外皮により負荷を抑え、安定した室内環境を構築した上で、必要最小限のエネルギーを効率的に使い、空間を整える建築・設備計画を



Photo 5.1 建物外観（撮影：小川重雄）  
Exterior view of the building

\*6 技術研究所 主任研究員 博士(学術) Chief Researcher, Research & Development Institute, Ph.D.  
\*7 技術研究所 研究主任 博士(工学) Senior Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.  
\*8 技術研究所 環境・社会研究部 社会システムグループ長 Group Leader, Research & Development Institute

行った。超高層ビルにおいて手動の自然換気を計画し、日常的には省エネルギー性と快適性を向上させ、非常時にも普段通りに手で操作できる換気設備とした。この手動式自然換気は、自己効力感による心理的な満足度の向上にも貢献し、一つの機能が日常・非常時のどちらにおいても無駄なく有効に使用されることを目指した。

そこで開発されたのが、外装デザインと調和する手動自然換気パネル一体型ダブルスキンカーテンウォールと、執務者の参加を促すアダプタブル自然換気システムである。

手動式自然換気パネルを組み込んだコンパクトダブルスキンカーテンウォールは、日射をダブルスキンカーテンウォール内部の電動ブラインドで遮蔽し、そこで発生した熱で温められたキャビティ内の空気を上部のスリットから排出する (Fig. 5.2)。熱貫流率U値はフレームを含めても $2.3\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、日射熱取得率は $0.04\sim0.05$ と高い断熱性能と日射遮蔽性能を持つ。また縦ラインの外装デザインを強調するアルミパネルの内部に自然換気口を組み込むことで (Fig. 5.2)、ガラリを見せないすっきりとした外観を実現した。フロアあたり約80カ所、建物全体で約2000カ所配置し、執務者が周囲に気兼ねせずに自ら外の空気を取り入れて環境を調節できるように配慮した。

アダプタブル自然換気システムは、この手動自然換気パネルの利用を促進し執務者の環境適応をサポートするシステムである。自然換気による効果をリアルタイムで把握するため、高密度に壁面差圧を計測し、中央監視により換気風量計算を行う。全ての換気パネルにRFIDタグを設置し、換気パネルの開閉状態を監視する手法を開発、導入した (Fig. 5.3)。この開閉状態のデータはクラウドBEMSで管理され、フロア毎、方位毎の利用率 (開いている換気パネル/全換気パネル) に変換して中央監視に取り込む。それらの情報を中央監視画面に可視化して、省エネ効果計算にも使用する。執務者からよく見える位置にランプ (表示灯) を配置し、外気が自然換気に適した時を光と音で執務者へ知らせる。パネル開閉状態も表示し閉め忘れ防止にも役立てる。

クラウドBEMSのデータを分析することで、執務者が自ら外気を取り入れて快適さを得、また省エネルギー行動に参加する実態が明らかになりつつある。壁面方位別・階別の差圧と換気パネル利用率の1分毎の時間変化を見れば (例えば2020/10/19～10/26のデータを示したFig. 5.4)、表示ランプの点灯時に一斉に換気パネルが利用され、またどの時間帯にどの階のどの壁面の換気パネルがよく利用されているかが見て取れる。竣工後から1.5年間の換気パネル利用率の推移からは、季節によって、主に季節風の風向による影響で増減するが、平均して利用率は約10～35% (200～700カ所) を維持し、換気パネルが執務者に積極的に利用されていることがうかがえた。また表示ランプが点灯しない夏季・冬季にも平均2～4% (40～80カ所) の利用率が見られたことは、短時間、少数ではあるが執務者が外気を取り入れる行為を中間期以外にも求めていることを示唆している<sup>5.8)</sup>。さらなる継続調査は超高層建物における手動換気の設計に有益となろう。

執務者の転居前後の自己効力感の変化を捉えるためにアンケート評価を行った。換気パネルについて「機能に満足している」と回答

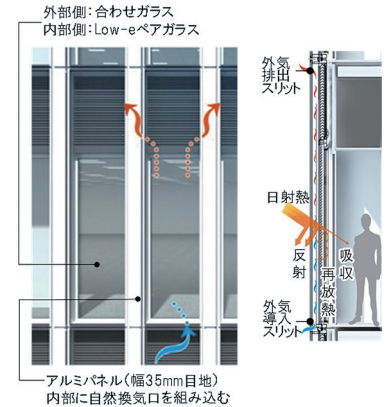


Fig. 5.2 手動自然換気パネル一体型ダブルスキン  
Double skin with integrated operable natural ventilation panel

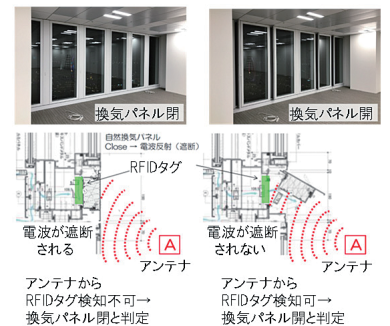


Fig. 5.3 RFIDによる開閉検知  
RFID open/close detection

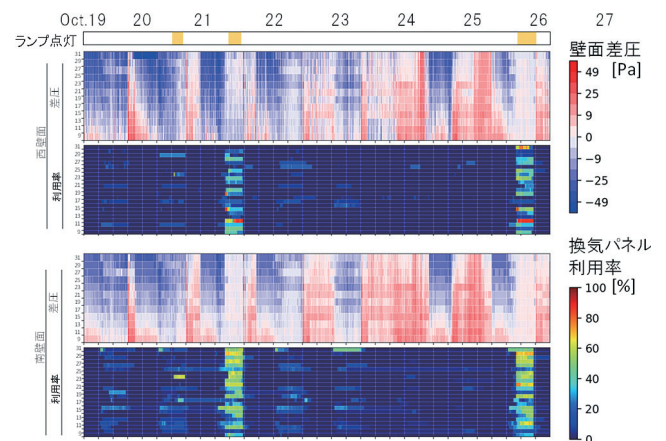
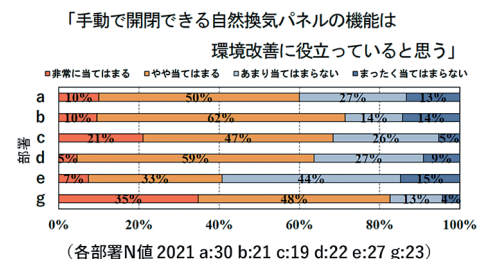


Fig. 5.4 各階・各壁面の換気パネル利用率と差圧の時間変化  
Time series of ventilation panel usage and differential pressure at each floor and wall



(各部署N値 2021 a:30 b:21 c:19 d:22 e:27 g:23)  
Fig. 5.5 手動換気パネルに関するアンケート結果  
Questionnaire results on ventilation panels



した人は3～7割程度と調査対象の部署（部署a～e, g）ではばらつきがみられたが、「環境改善に役立つ」と考えている人はe以外の部署で6割以上いることが分かった（Fig. 5.5）。この結果は、換気パネルの運用方法の改善によってさらなる満足度向上が見込めることを示唆する<sup>5,9)</sup>。また夏季、中間期、冬季のすべての季節で温熱環境満足度と自己効力感に正の相関がみられ（データ示さず）、自己効力感の本建物に移動する以前に入居していた旧市庁舎でアンケートを実施したときよりも点数が高かった（一例としてFig. 5.6）<sup>5,9)</sup>。開発したファサードおよびアダプタブル自然換気システムが自己効力感の上昇へどの程度寄与したかさらなる研究を必要とする。

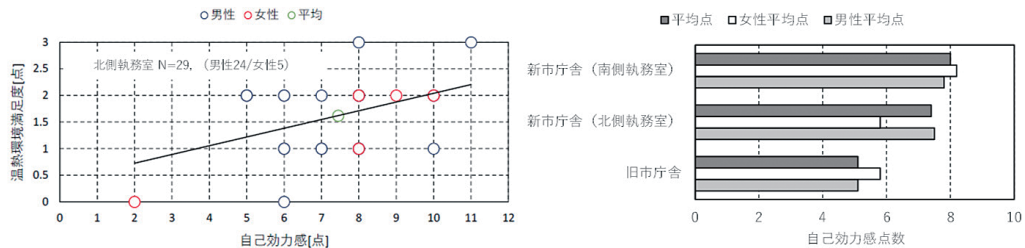


Fig. 5.6 自己効力感と温熱環境満足度（中間期）  
Self-efficacy and thermal environment satisfaction (mid-seasons)

### 5.2.2 竹中工務店北海道地区FMセンターにおける事例

本建物は亜寒帯湿潤気候地域である北海道札幌市の住宅街に立地するZEB Ready化を目指した小規模オフィスである。コアワークを行う執務スペースを2階の建物中心に据え、それを囲うように共創スペース、ミーティングテラスといった場を配置した（Fig. 5.7）。またこの配置は執務スペースと外部環境との間に中間領域を形成する温熱入れ子構造となっており、執務スペースにおいては厳しい自然の影響を受けにくい空間、共創スペース等についてはファサードを介して自然の影響を受けやすい空間といった質の異なる場を創っている。執務者は仕事内容や気分に応じて自由に働く席を選ぶだけでなく、温熱・光環境も選ぶことができることを目指した。ファサードは、障子のように日中の自然光を拡散させ室内に心地よいやわらかな光を取り込み、夜は室内の明かりが外部へ滲み出し雪洞（ぼんぼり）のようにほんのり光ることで、住宅街に相応しい落ち着いた表情を意図した（Photo 5.2）。一方で亜寒帯湿潤気候であることに加えZEB Readyを目指した内部発熱の低い設備仕様であることから、暖房需要が大きいことが予測されたためファサードに高い断熱性能が要求された。そこで新しい素材を用いた2つのファサード部材が導入された。



Photo 5.2 建物外観（南西から見る）  
Building exterior (viewed from the southwest)

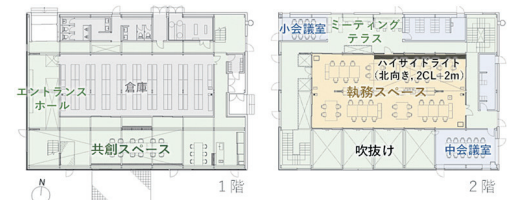


Fig. 5.7 執務スペースと共創スペースなどの配置  
Arrangement of office space and co-creation space, etc.

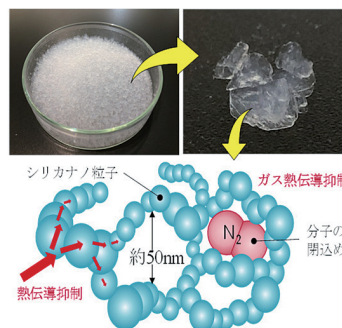


Fig. 5.8 エアロゲルの概要  
Outline of Aerogel

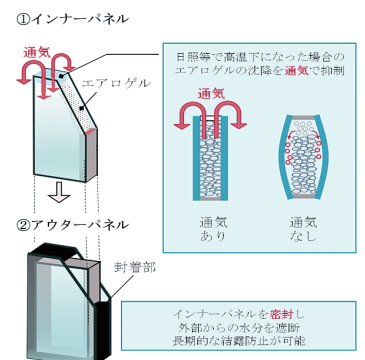


Fig. 5.9 エアロゲルパネルの構成概念  
Construction concept of Aerogel panel

一つは、エアロゲルを使った外装パネルである。エアロゲルとは一般的にゲルに含まれる溶媒を超臨界乾燥法等によってゲル中の溶質の構造を維持したまま溶媒を取り除いて得られる多孔質な物質の総称で、地球上で最も軽くて断熱性の高い固体として知られている。形態は数 $\mu\text{m}$ ～数mmの粒子状または厚さ十数mmの板状に大別できる。このエアロゲルは、数nm～数十nmの球状のシリカが結合したPearl-necklaceと呼

ばれるクラスター構造を持ち、クラスターにより形成される開放空隙は50nm程度で、90vol%以上を空気が占める。この構造に、空気分子（窒素など）が閉じ込められることで、気体の熱伝導が抑制され、さらに熱伝導経路が複雑になって熱伝導率は小さくなる<sup>5,10)</sup>（Fig. 5.8）。また、可視光の波長よりクラスター構造が小さいことでレイリー

散乱を生じ、わずかに青みがかった半透明である。

新しく開発したエアロゲルパネルは、粉体のエアロゲルを2枚の透明な板材（ポリカーボネートやガラス等）の間に充填してパネル状にしたインナーパネル<sup>5.11)</sup>をアウターパネルとなる2枚の板ガラス間に内挿し、封着部で密閉する構成をもつ（Fig. 5.9）。この構成によってエアロゲル層を周辺の温度変化の影響を受けずに垂直に保持しつつ<sup>5.12)</sup>、従来の複層ガラス同等の耐久性<sup>5.13)</sup>を確保できる。

ここで、JIS A 4710に従った断熱性試験により、エアロゲルパネル（Fig. 5.9に示す900mm角×厚40mm、中央の熱貫流率の計算値 $0.81\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ である）の熱貫流率を測定すると $1.22\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ であった。一方で、トリプルガラス（900mm角×厚36mm、最外層は共にLow-Eガラス4mm、空気層12mm×2層）の熱貫流率の計算値はガラス中央で $0.93\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、封着部を含むガラスシステム全体の熱貫流率は $1.39\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ であり、エアロゲルパネルの断熱性はトリプルガラスに比べて優れていた。この断熱性能をほぼ維持したまま、エアロゲルと白色粒子を混合して拡散透過光を変化させ、可視光透過率を約10～70%としたパネルをハイサイドライトに設置した（Photo 5.3）。このように、エアロゲルパネルはやわらかく自然光を取り込む従来の障子の特徴を持ちつつ、従来の障子にはない高断熱性を有する“現代版の障子”として建築の意匠性に豊かさを与える技術になると考えられる。

もう一つは、中空ポリカーボネート外装（以下、中空PC外装）である（Fig. 5.10）。中空PC外装は空気層を持つことにより断熱しつつ、昼光利用と冬期の日射熱取得（ダイレクトゲイン）を可能とする。熱貫流率 $1.21\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、可視光（全光線）透過率40%の性能を持つ。南と西の外壁として導入され（Photo 5.2）、外壁に隣接する共創スペース・エントランスホールの床材に熱容量の大きいPC平板を採用することで日射熱を蓄熱した。これにより室内温熱環境の安定化を図った。フレームレス化したため、ガラスを利用する場合には生じる金属製フレームによる熱損失もない。本建物にて熱的な性能の測定評価を行った<sup>5.13)</sup>。中空PC外装の内側にて測定した日射、熱流束および共創スペースの室内温度からは、日射により共創スペースの室内温度は日中 $20^\circ\text{C}$ 前後に保たれていたことがわかった。また、夜間の測定データより中空PC外装の熱貫流率は $1.27\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ と算出でき、設計と同等の高い断熱性能であることも確認できた。

自然光はまぶし過ぎず適切な明るさを得るための最適設計が要求される。そこでこれらの新しいファサード部材の導入にあたっては、設計時に予測解析技術を利用した設計仕様への落とし込みと、竣工後の測定評価およびPOE（入居後評価）が行われた。年間昼光解析によって<sup>5.13)</sup>、執務スペース北東側は昼光利用が期待できないことが予測され（Fig. 5.11 a）、執務スペースにハイサイドライトを設ける（Fig. 5.11 b）ことを決定した。（なお、1階と2階の結果を重ねて表示するため、2階の吹抜け部分（Fig. 5.7）に1階の結果を示す）。また、南面と西面が中空PC外装による大面積の昼光光源となるため（Photo 5.2）、共創スペースで不快なまぶしさが生じうることがグレア指標から解析予測されたが、一方で執務スペースから南面、西面を見た場合は、まぶしさが生じないことを予測した。執務者が自由に座席選択をできまぶしさを回避することができる設計コンセプトであることから積極的な昼光利用を優先し、必要に応じてカーテンで執務者が調整できる設えとした。竣工後には測定・アンケート評価を行った<sup>5.13)</sup>。執務者に平面図を提示し直近2週間を思い返させ、質問①「自然光が入ってきていると思うエリア」および質問②「自然光が心地よいと思うエリア」を任意の数の円で囲むことで回答させた（Fig. 5.12）。室内の約500mm 格子間隔の

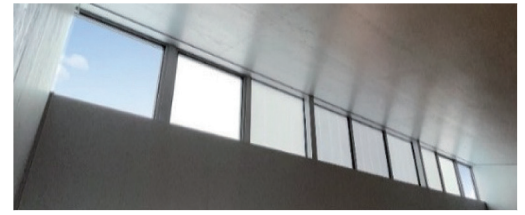


Photo 5.3 ハイサイドライトへの設置状況  
Installation on Top light

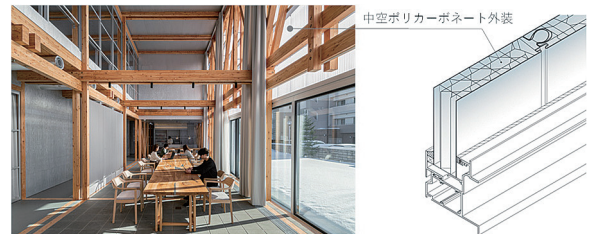


Fig. 5.10 共創スペースから見た中空PC外装と断面図  
Hollow PC envelope seen from the co-creation space and cross-sectional view of it

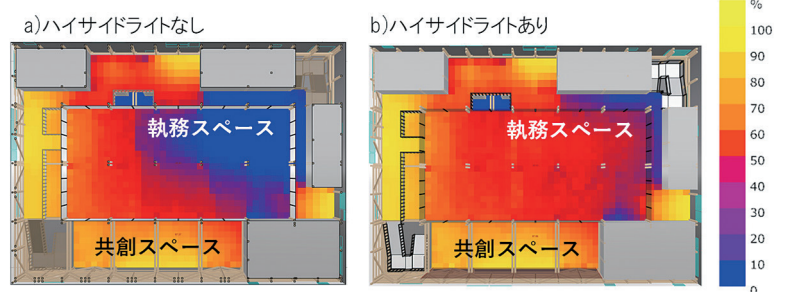


Fig. 5.11 年間昼光指標 $\text{DA}_{300\text{lx}}$ で予測評価されたハイサイドライトの効果  
Effectiveness of high sidelight predicted and evaluated with annual daylight index  $\text{DA}_{300\text{lx}}$



地点について、円で囲まれた回数を計数し全回答者数で除した値を申告率とした。この空間分布は、執務者の昼光利用に対する認知と好意を可視化していると言える。心地よさの申告率が高かったのは、共創スペースの中央や執務スペースの南側だった。昼光照度が大きいことに加えて、共創スペースは多くの人が利用できるため申告されやすいことが一因と考えられるが、加えて空間の印象や眺望の良さ、その場所の使われ方など昼光照度や利用頻度以外の要因も影響した可能性がある。申告率は、照度実測によって算出されるいくつかの昼光指標と比較的高い相関を示した（一例としてFig. 5.13）。この結果は、設計時に予測された昼光指標などから、執務者が自然光を心地よいと思う空間を予測し最適にファサード設計できる可能性を示唆する。また共創スペース等の諸室の環境満足度とWEnの関係や、諸室の利用頻度とWEnの関係に注目しアンケート調査を行った<sup>5.14)</sup>。WEnの尺度の一つであるUtrecht Work Engagement Scale<sup>5.15)</sup>は環境満足度との相関はあまり見られなかったが、共創スペースの利用頻度と正の相関が見られた（Fig. 5.14）。共創スペースの利用頻度増加がWEn向上へ寄与する可能性は今後より深い検証が期待される。

以上の評価から、新しいファサードが高い省エネルギー性を持ちながら、多様な室内環境の形成に貢献し、その環境を自ら選択する働き方を含めた設計計画が室内環境に対する心地よさやWEnに貢献する可能性が示唆された。

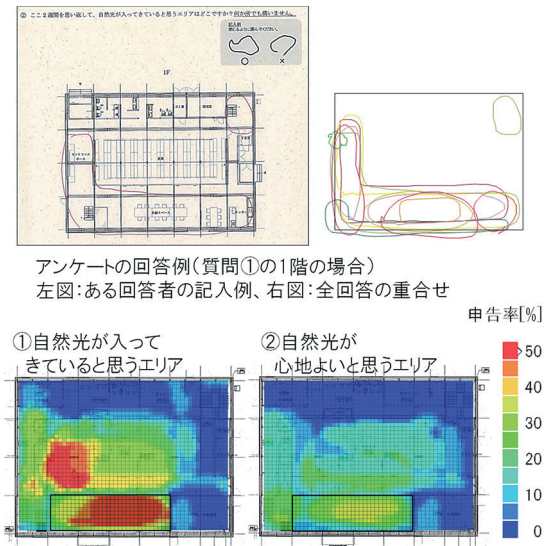


Fig. 5.12 昼光に対する認知と好意の申告率の空間分布  
Spatial distribution of vote rates of recognition and preference for daylight

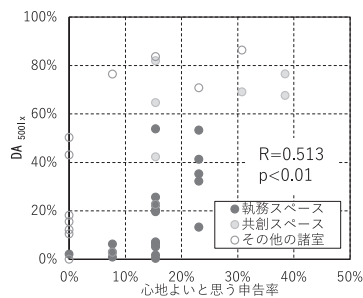


Fig. 5.13 各測定点における $DA_{500lx}$ と昼光の「心地よさ」申告率の関係  
Correlation between  $DA_{500lx}$  and daylight comfort vote at each measurement point

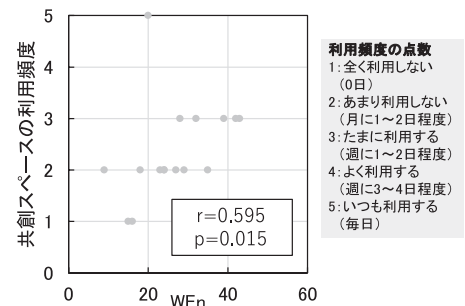


Fig. 5.14 Utrecht Work Engagement Scaleと共創スペースの利用頻度の関係  
Correlation between Utrecht Work Engagement Scale and frequency of use of co-creation spaces

### 5.3 本章のわりに

#### Conclusion of This Section

本章では、そのまちに住む人々が誇れる・愛着を持てる魅力的な外観を提供するようデザインされたファサード事例を取り上げ、意匠性を担保するだけでなく脱炭素社会の実現と執務者のウェルネスの貢献に取り組んだいくつかの研究・開発を紹介した。魅力的なファサードに一つの正解はなく、まちの景観や気候に適応したデザインを必要とする。今後もデザインの要請に応えるハードウェア・ソフトウェア・評価技術の発展に貢献していきたい。

### 参考文献

- 5.1) 例えば, Kikuchi, T., Boda, H.: “Louver arrangement studies for huge light court using annual simulation of daylight and solar radiation”, Lux Pacifica 2013, 2013.3
- 5.2) 例えば, 左勝旭, 和田一樹, 田中規敏, 堀慶朗, 直井康二ら: 「ダブルスキンファサードによる日射遮蔽と室内自然通風の一体的な計画と実施 第1,2報」, 空気調和・衛生工学会大会学術講演文集, 2012
- 5.3) 例えば, 菊池卓郎, 和田一樹, 笠井香澄, 堀慶朗, 菅野康史ら: 「内部発熱の低い建物に適したファサードシステムの研究 (その1~3)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2016.8

- 5.4) 例えば, 菊池卓郎, 井川憲男:「All Sky Model-Lを導入した昼光照明計算プログラムの性能検証」, 日本建築学会環境系論文集, 73巻, 629号, 865-871, 2008
- 5.5) 例えば, 和田一樹, 樋口祥明:「通気層を有する外壁の年間熱特性に関する研究」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 13-14, 2007.7
- 5.6) 花里真道ら:「オフィス環境はワーク・エンゲイジメント, 健康, 行動にどのように影響を及ぼすか? その13:自席における自然要素とワーク・エンゲイジメントとの横断分析」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019.9
- 5.7) 恩賀彩子, 野部達夫:「室内温熱環境に係わる執務者からのクレーム発生構造の解析」, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 429-432, 2008
- 5.8) 高橋幹雄, 田辺新一, 野崎尚子, 高橋祐樹, 和田一樹, 中川純ら:「執務空間におけるActive Designがワークスタイルに与える影響に関する研究 (その1~17)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2017-2023
- 5.9) 左勝旭, 高橋好美, 渡邊啓生, 菊池卓郎, 野部達夫, 山崎里奈, 荻野洸希ら:「SDGs未来都市における市長舎のZEB実現に関する研究 第1~17報」, 空気調和・衛生工学会大会学術講演文集, 2019-2022
- 5.10) R. Baetens, B.P. Jelle, A. Gustavsen, Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review, Energy and Buildings 43 (2011) 761-769.
- 5.11) E. Belloni, C. Buratti, F. Merli, E. Moretti, T. Ihara. Thermal-energy and lighting performance of aerogel glazings with hollow silica: Field experimental study and dynamic simulations. Energy & Buildings 243 (2021) 110999.
- 5.12) 大庭慶義, 井原健史, 山本正人, 杉田敬太郎, 儀部真二, 中島奈央子:「シリカエアロゲルを用いた外装システムに関する研究 その2 ゲル層の沈降について」, 日本建築学会大会学術講演集 (東海), 2021.9
- 5.13) T. Ihara, B.P. Jelle, T. Gao, A. Gustavsen, Aerogel granule aging driven by moisture and solar radiation, Energy and Buildings 103 (2015) 238-248.
- 5.14) 川幡祥太, 菊田弘輝, 常岡優吾, 菊池卓郎, 宮川慈子ら:「亜寒帯湿潤気候下における地域脱炭素化に向けた小規模オフィスの計画と評価 第1~8報」, 空気調和・衛生工学会大会学術講演文集, 2022-2023
- 5.15) ワークエンゲイジメント (UWES) 慶応義塾大学総合政策学部島津明人研究室, <https://hp3.jp/tool/uwes> (参照2021.10.24)

## 6 ランドスケープデザインを支える技術 Technologies Supporting Landscape Design

三輪 隆 Takashi Miwa<sup>\*9</sup> 北野 雅人 Masato Kitano<sup>\*11</sup> 佐野 祐士 Yuji Sano<sup>\*12</sup>  
土屋 直也 Naoya Tsuchiya<sup>\*10</sup> 槌尾 健 Takeshi Tsuchio<sup>\*13</sup> 小島 倫直 Michinao Kojima<sup>\*11</sup>  
向井 一洋 Kazuhiro Mukai<sup>\*13</sup> 鈴木 康平 Kohei Suzuki<sup>\*14</sup>

### 6.1 これからのランドスケープへのニーズ Future Needs for Landscapes

ランドスケープは一般に景観や風景と訳されるが、広義には地域社会を意味し、自然と人の関係性などの社会・文化的な側面も含む概念でもある。そして、それをデザインする行為がランドスケープデザインである。その定義は、狭義には都市におけるオープンスペースや広場・公園などの公共空間のデザインを意味することが多いが、一方で、環境、建築、土木、その他工学、社会学、芸術などの要素を取り入れて、様々なスケールの環境（屋外・屋内）のハードとソフトの両面をデザインする行為でもあり、それを支える技術の対象領域は広範である。近年では、1990年代後半に提唱された景観都市論であるランドスケープ・アーバニズムが、都市における人間活動も含めた広義の生態系の理解に基づき現代都市の複雑な課題を解決することを目的として掲げ、ニューヨークのハイラインのような都市の課題解決や価値創造の好事例を世界各地で次々と生み出した。それらの取り組みがブラウンフィールドの再生や不動産価値向上などに有効であることが示され、以降ランドスケープが創造する価値への期待が高まり続けている。

また一方で、ランドスケープは豊かな自然や生物多様性を支える基盤でもある。そして、私たちの社会経済活動は自然や生物多様性によって支えられている。自然が私たちにもたらす恵みを生態系サービスというが、自然を劣化させると生態系サービスが得られなくなり、都市やビジネスの持続可能性も低下する。世界各地の自然を劣化させないためには、各国で保護された土地の面積を現在より大幅に増大させる必要があることが国際合意され、自然の劣化を止める手段としての土地利用の重要性が明確になった。その合意とは、2022年12月に開催された国連生物多様性条約第15回締約国会議（COP15）における、生物多様性の新たな世界目標となる「昆明・モントリオール生物多様性枠組」（GBF）と、2030年までの行動目標「昆明・モントリオール2030年目標」の採択を意味し、2030年までに自然の損失を止めて反転させる「ネイチャーポジティブ」の達成を目指して23の行動目標（ターゲット）が策定された。23の行動目標には、「陸域・淡水域・海水域の30%を保全する（30by30）」（目標3）や「生態系調整機能・サービスを自然ベースまたは生態系ベースのアプローチにより維持、回復、強化する（NbS,EbA）」（目標11）などの土地利用に関連する目標が少なくとも6つは含まれており、ネイチャーポジティブ達成に向けてのランドスケープ的アプローチの重要性が際立つ結果となった。

また、同枠組で注目されるのが、大企業や金融機関に対して自然関連情報開示の要請が盛り込まれたことだ。大企業や金融機関が、生物多様性に関するリスク、依存度、影響を定期的に監視・評価し、透明性を持って開示するよう求められることとなった。企業の土地利用や調達などの事業活動における生物多様性への影響・依存・リスクなどの開示に関する国際的なイニシアティブによる指針作りが進んでいる。その一つである企業のサステナビリティ情報の開示に関する国際基準を作成する国際サステナビリティ基準審議会（ISSB）でも、気候変動に続く次の基準策定対象の一つとして生物多様性に取り組むことになった。国内でも2023年3月期以降、有価証券報告書でサステナビリティ情報を開示することが義務付けられた。その中で、全ての企業が開示しなければならない必須項目となった人的資本情報のほか、気候変動や生物多様性、人権などのサステナビリティ情報のうち、企業が自社にとって重要と判断した項目について記載することが必要となった。その結果、企業が自然関連の情報開示をする際に、生物多様性の保全に貢献する土地利用に取り組んでいることを客観的に示すことができる自然共生サイト認定や緑地認証などへの関心が高まっている。

企業が生物多様性保全に資する土地利用を推進する目的として、これまでは社会貢献的な側面が中心であったが、

\*9 技術研究所 リサーチフェロー Research Fellow, Research & Development Institute  
\*10 技術研究所 主任研究員 博士(工学) Chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.  
\*11 技術研究所 主任研究員 Chief Researcher, Research & Development Institute  
\*12 技術研究所 研究員 博士(人間情報学) Researcher, Research & Development Institute, Dr. Hum. Info.  
\*13 技術研究所 研究員 Researcher, Research & Development Institute  
\*14 設計本部 シニアチーフデザイナー Senior Chief Designer, Design Division Head Office



上述のような背景から生物多様性保全が脱炭素と並ぶ経営上の重要課題になり、その結果自然重視型の土地利用を推進する機運が急速に高まっている。

現代のランドスケープに対するニーズは上で述べたように多様であるが、共通するのは自然の多機能性を巧みに活かし複雑な都市の社会課題を統合的に解決し価値創造することである。そして、それを実現するために、特定の地域や空間において、土地・空間計画をベースに、多様な人間活動と自然環境を総合的に取り扱い、解決策を導き出すデザイン手法が求められており、当社ではそれらのランドスケープデザインを支える技術の開発に取り組んでいる。本章の6.2以降では、これら当社で開発したランドスケープデザインを支える技術を6.2計画技術、6.3環境シミュレーション技術、6.4対策技術、6.5運用技術に大別し、取り組みを紹介する。Table 6.1に4つの技術区分とランドスケープが発揮すべき5つの効果（環境、経済、社会、防災・減災、健康）との関係性のマトリクス上に本章で紹介する個別技術を配置し、ランドスケープデザインの全体像に対する各技術の位置付けを示す。ランドスケープの実現に関する建築・土木・環境工学などの既存の設計・施工手法に加え、これら当社独自の取り組みを加えることでプロジェクトの課題解決を支援し、建物等の魅力向上に貢献したいと考えている。

Table 6.1 ランドスケープデザインを支える当社開発技術の位置付け  
Positioning of technologies supporting landscape design

ランドスケープが 発揮すべき5つの効果	6.2 計画技術	6.3 シミュレーション技術	6.4 対策技術	6.5 運用支援技術
環境	・ 6.2.1 GIコンセプトブック ・ 6.2.2 鳥類を指標とした 緑地計画支援技術	・ 6.3.1 風・熱環境解析技術 ・ 6.3.2 樹木配置の最適化	・ 6.4.2 ハニカムグリーン ・ 6.4.3 Vertical Forest ・ 6.4.4 半自然草原の再生	・ 6.5.2 ソトコミ
経済	・ 6.2.1 GIコンセプトブック			・ 6.5.1 バイオフィリック デザイン ・ 6.5.2 ソトコミ
社会	・ 6.2.1 GIコンセプトブック		・ 6.4.2 ハニカムグリーン	・ 6.5.1 バイオフィリック デザイン ・ 6.5.2 ソトコミ
防災・減災	・ 6.2.1 GIコンセプトブック		・ 6.4.1 レインスケープ ・ 6.4.2 ハニカムグリーン	
健康	・ 6.2.1 GIコンセプトブック	・ 6.3.2 樹木配置の最適化		・ 6.5.1 バイオフィリック デザイン ・ 6.5.2 ソトコミ

注) 表中の6.2、6.2.1は、本章で紹介する項、節の番号に対応している。

## 6.2 計画技術

### Planning Technologies

6.2では、これからのランドスケープの計画を支える当社独自の技術を示す。6.1で述べたように、ランドスケープは豊かな自然や生物多様性を支える基盤であり、私たちの社会経済活動は自然からの提供される生態系サービスにより支えられている。これに対し当社では、後述するグリーンインフラの概念をランドスケープの計画に取り入れて、自然を賢く活かして持続可能な社会を実現するための取り組みや対応事例をグリーンインフラコンセプトブックとして取りまとめた。また、建築計画の立案時には周辺環境影響の評価が重要となることから、建築計画立案時に活用する当社独自技術「鳥類を指標とした緑地計画支援技術」について紹介する。

### 6.2.1 グリーンインフラコンセプトブック

グリーンインフラ（以下、GIという）は、自然から提供されるサービスに注目した新しい概念であり、自然に備わっている多面的な機能に着目し、それらの多様な活用方法を生み出すことで、様々な価値を創出し、持続可能な社会を実現しようとする考え方であり、6.1で述べたランドスケープへのニーズに応える最も有力な手段である。自然環境保全を目的とするのではなく、自然を課題解決の手段として捉え、



Fig. 6.1 GIコンセプトブックで提示された  
TAKENAKAのGIが有する5つの効果  
5 effects of TAKENAKA's GI described  
in the Green Infrastructure Concept Book

巧みに利用することで価値を生み出そうとする考え方でもあり、このような取り組みこそが結果として劣化し続けている生物多様性の保全にも寄与しうるものと期待されている。

近年、わが国では、人口減少、自然災害の頻発、自然環境の劣化、インフラの老朽化、財政制約、地域経済の停滞など、様々な社会課題が山積している。「グリーンインフラコンセプトブック (Fig. 6.1)」は、そのような社会課題を解決するために、自然を賢く活かして持続可能な社会を実現する当社の取り組みと決意を、ステークホルダーに伝えることを目的に発行された。

同コンセプトブックは、当社のこれまでの自然共生への取り組み、当社独自のGIのコンセプト、ソリューションの特長、提供する価値、取り組み事例などを紹介したもので、当社がめざすGIは、自然が有する環境、経済、社会、防災・減災、健康の5つの効果のうち、2つ以上の複合的なねらいを有する多目的な解決策であるとし、自然を活かして魅力的な都市を創造する取り組みの価値を伝えるツールとして活用されている。

## 6.2.2 鳥類を指標とした緑地計画支援技術

鳥類を指標とした緑地計画支援技術とは、都市の生物多様性の指標となる鳥類に着目し<sup>6.1), 6.2)</sup>、鳥類の生息データから各種の生息確率をモデリングし、周辺環境等を踏まえた適切な目標種選定と、その目標種が選好する環境の作りこみを支援する技術である<sup>6.3), 6.4)</sup>。

計画のフローとしては、まずはマルチスペクトル衛星画像を利用した緑被率の抽出によって、計画地周辺におけるコア緑地（生物のソースとなる大規模緑地）を推定し（Fig. 6.2）、当社のデータベースや文献調査を踏まえて計画地においてベースとなる鳥類相を把握する。プロジェクトにおける具体的な高木層および低木層の面積・植被率や周辺の緑被率等の説明変数から種ごとの生息確率を推定して（Fig. 6.3はアオジの生息確率と低木層植被率の関係）、今回の計画で誘致可能な目標種を選定する。その上で、目標種が選好する景観作りや樹種選定を行う、という手順で実施する。

本技術は、新柏クリニックやウィズ原宿、代々木参宮橋テラス、竹中育英会学生寮等にて活用されている。また竹中技術研究所内の調の森 SHI-RA-BEでは設置後のモニタリングも長期的に行われており、事前に設定した景観ごとの目標種の9割近くが飛来していることが確認されている。

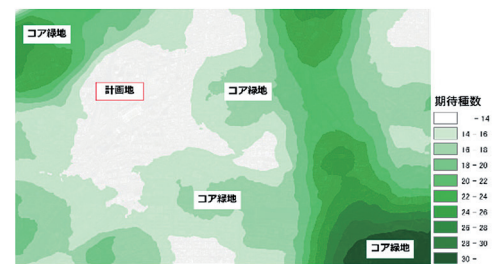


Fig. 6.2 鳥類の生息ポテンシャルマップ  
A potential map of bird habitat

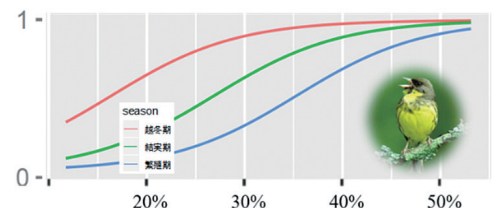


Fig. 6.3 アオジの生息確率と低木層植被率の関係  
Relationship between probability of occurrence of Black-faced Bunting and shrub cover

## 6.3 環境シミュレーション技術

### Environmental Simulation Technologies

6.3では、ランドスケープ計画時の環境シミュレーション技術を示す。屋外都市空間の風・熱環境の評価は、安全で快適な空間を設計する上で重要であり、当社では都市と建築スケールの両方を評価できる高精度な風・熱環境解析技術を保有しており、多くのプロジェクトに適用している。また、環境シミュレーションでの当社の新たな取り組みとして、緑地計画における光・温度・植物の成長・緑陰効果など複数の環境要因を同時に評価できる樹木配置の最適化ツールを開発し、適用を開始している。

### 6.3.1 風・熱環境解析技術

屋外空間の熱環境設計においてヒートアイランド現象を緩和する大気熱負荷の低減策や、心地よさを感じる快適空間をつくるなど都市と建築スケールの両面での検討が必要



Fig. 6.4 街区の風・熱環境改善の事例  
Analysis of thermal environment around buildings



となる。本技術は、BIM、GISデータを活用し建物形状や構成材料、樹木の配置等を詳細に再現し、建築から街区スケールに至るまで高精度に風と熱環境を解析するため、ビル風やヒートアイランド対策の効果検証、温熱快適性の評価が可能である<sup>6.5)</sup>。Fig. 6.4に、夏季に高温となる街区を対象に、熱環境を改善した例を示す。改善前の敷地（赤枠内）は、建物が密集するため風通しが悪く気温が高い。改善策として、建物形状を工夫し広場を設け風の通り道并确保、高木による緑陰を形成、保水性舗装や芝による地表の改変を計画している。改善後は、広場や周辺歩道において風通しが良くなり（図中矢印で風向風速の大きさを表示）高温となる熱だまりを解消している。地表や建物表面の温度分布をみると（右下図）、緑化や地表改変により日射による温度上昇が抑制されている。風の流れや温度分布をビジュアルに可視化することで対策効果を定量的に把握できる。

### 6.3.2 樹木配置の最適化

緑地のデザインにおいては、熱・光・風環境の緩和や良好な景観の創出といった、多面的な効果を持つ樹木の活用が重要となるが、植樹や維持管理にはコストを要するため、最小限の樹木により最大限の効果を得られるよう樹木を配置することが求められる。当社では、環境シミュレーションと最適化アルゴリズムを組み合わせた、ランドスケープデザインのための樹木配置最適化ツール（Fig. 6.5）を開発し、その活用展開を進めている。

本技術は、竹中技術研究所の改修工事に際し、グリーンインフラと自然共生研究の場として設置された調の森SHI-RA-BEのランドスケープデザインにおいて、環境設計支援技術として適用された。本プロジェクトでは、生態池の周囲に樹木を配置するにあたり、水域における水生生物の生育環境（水温・日射）が年間を通じて良好に維持し得ることを目的に、暑い夏季には樹木により池への日射を抑制して池水温の上昇を抑え、寒い冬季には落葉樹をうまく配置して池への日射を増やし、池水温や水草の増殖に必要な日射量を確保し得る樹木配置案の探索を行い、樹木配置の最適解が最終的な設計案の決定に活用された（一例としてFig. 6.6）。竣工後に水域の生物多様性の事後調査を実施し、設計時に特に重要視していた希少種の水草が繁茂していることを確認した<sup>6.6)</sup>。

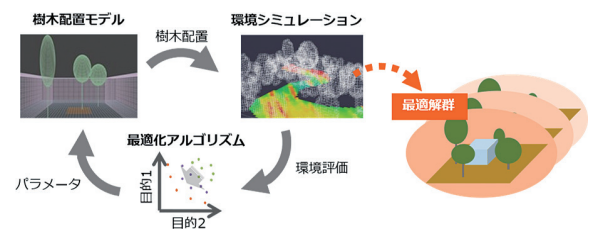


Fig. 6.5 樹木配置最適化のフロー  
Tree arrangement optimization flow

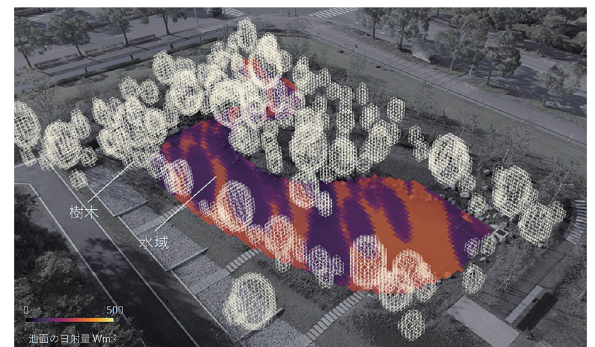


Fig. 6.6 調の森SHI-RA-BEにおける日射量での樹木配置最適化  
Tree arrangement optimization based on solar radiation in SHI-RA-BE forest

## 6.4 対策技術

### Countermeasure Technologies

6.4では、自然の様々な機能を活用して社会課題の解決を目指す当社独自の技術を示す。気候変動の影響により集中豪雨の発生頻度や降雨量が増えており、特に都市部では雨水対策の強化が急務である。これに対し当社では、自然の機能を活用した雨水対策技術や路面緑化技術を開発し、プロジェクト適用を開始している。また、従来は困難であったが、樹木を育成可能な薄層壁面緑化技術を開発し、都市緑化の対象を広げることができた。さらに、1960年以降の土地利用の変化により日本の里山の代表的な景観である草原が急速に減少している問題に対し、当社では生物多様性保全・再生活動の一環として、地域固有種による草原を再生する技術開発にも取り組んでいる。

### 6.4.1 雨水対策（レインスケープ）

近年のゲリラ豪雨頻発を背景に、自治体において緑地やオープンスペース等に雨水貯留浸透機能を付加するニーズが高まっている

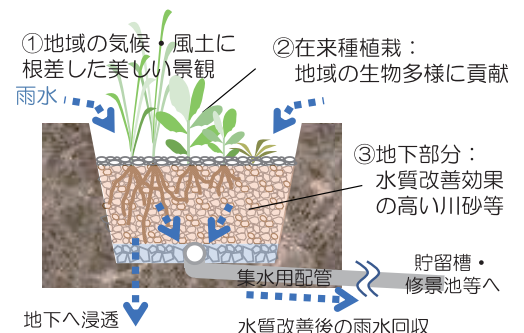


Fig. 6.7 レインスケープの断面構成  
Cross-sectional composition of Rainscape

る。例えば世田谷区では令和4年改定の世田谷区豪雨対策行動計画において、グリーンインフラを含む流域対策の目標として時間あたり10mm相当以上の流出抑制が設定されている。また、雨水貯留・浸透の方法も従来型のコンクリートピットなどのように豪雨時にのみ機能する施設ではなく、緑地帯と雨水貯留・浸透機能を組み合わせたレインガーデンのように、平常時は緑化空間、豪雨時には雨水一時貯留空間として働くグリーンインフラの導入が注目されている。

このニーズに対し当社は2017年よりレインスケープ (Fig. 6.7, Photo 6.1) の開発に着手した。レインスケープとは、平時には良好な景観形成に貢献することに加え、豪雨時に下水道や河川に流出する雨水の量と合流式下水道越流水 (CSO-Combined Sewer Overflow) による汚濁負荷を抑制するなど多面的な価値を発揮するグリーンインフラ技術である。竹中技術研究所内の調の森 SHI-RA-BEに設置したレインスケープでは、運用時の維持管理方法の確立を目的とした雨水浸透能のモニタリングを継続している<sup>6.4)</sup>。これまでの最大値としては、2019年10月の台風21号に伴う千葉県豪雨において、わずか10時間で平年10月の1ヶ月分に相当する219mmの降雨があった際に、集水域の総降水量の約43%に相当する236m<sup>3</sup>を本施設で貯留浸透できることが確認できている。

また、本技術は、新柏クリニックや巴商会新砂水素ステーション、デンソー本社正門整備等のプロジェクトに適用されており、国内における適用実績を増やしつつある。今後、本技術の適用により、LEED (米国グリーンビルディング協会 (USGBC) が開発・運営する、環境に配慮した建物に与えられる認証制度) やSITES (同じくUSGBCが開発・運営する、サステナブルなランドスケープを評価する認証制度) などの認証取得を目指すプロジェクトで、水資源保全や雨水管理の取組として加点要素となることが期待できる。



Photo 6.1 レインスケープの施工事例  
Example of Rainscape installation

#### 6.4.2 路面緑化 (ハニカムグリーン)

近年の気候変動リスクの高まりに伴い、雨水の流出抑制やヒートアイランド現象緩和の需要が高まっている。当社はその対策に効果があるとされる路面緑化技術<sup>6.7)</sup>に着目し、これまで実現が困難であった駐車場や道路部分での芝生緑化を実現するために、ハニカムグリーンを開発した。本技術は新しく開発したハニカム形状の芝生保護材 (Fig. 6.8) を用いることにより、根と茎を守り芝生が踏圧を受けても枯れにくくし、車いすやベビーカーの利用者や子どもの靴やヒールのある靴でも歩きやすい芝生空間を実現したものである。また、芝生・土壌・保護材のユニット化 (Photo 6.2) と、ユニットの敷設による施工方法の採用により、工期や納期の短縮、乗り入れ禁止の養生期間が不要、補修交換の簡素化・低コスト化等の従来技術にない利点を得た。ユーザーが使いやすく、美しいみどり景観を創出し、環境改善機能も長期にわたって発揮されやすい技術として、全国の駐車場や歩道に適用が進んでいる。

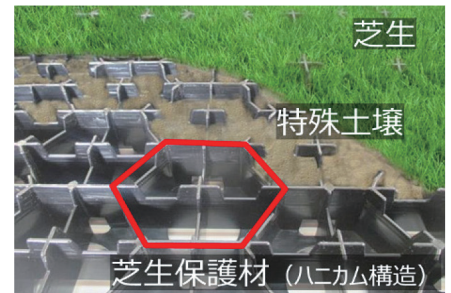


Fig. 6.8 ハニカムグリーン工法の構成  
Composition of developed products



Photo 6.2 芝生・土・保護材のユニット  
Lawn, soil, and protection units

#### 6.4.3 壁面緑化 (Vertical Forest)

建物緑化技術の課題の一つに、植栽基盤の積載に伴う建物への荷重の増加が挙げられる。従来の緑化技術では、植物の地上部の大きさに比例して、地下部の植栽基盤が必要になる。1-2m程度の樹木でも植栽基盤厚は300mmが必要とされ、この荷重は軽量土壌を利用しても240kg/m<sup>2</sup>になり建物の大きな負荷となる。このため建物緑化では樹木を利用した豊かな緑化景観の創出が困難であった。

この課題を解決したのが、樹木植栽可能な薄層植栽基盤の壁面緑化技術 "Vertical Forest" である。本技術は、壁面に沿って20mmという薄層の植栽基盤を設置し、この植栽基盤に対して基盤最上端に点滴灌水チューブを敷設する。そして植物の水分要求に応じてタイマーに水を

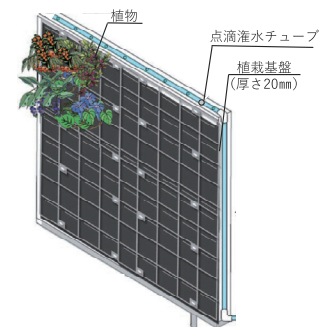


Fig. 6.9 開発した壁面緑化技術の構成  
Composition of the developed wall greening technology



かけ流す。これによって薄層基盤でありながら樹木類も健全生育する軽量な緑化技術（50kg/m<sup>2</sup>）を実現することができた<sup>6.8)</sup> (Fig. 6.9)。竹中技術研究所では、本技術構成を基本とした試験体が10年以上にわたり設置され、豊かな緑化景観を持続可能なことが実証できている。

こうした樹木を用いた建物緑化を可能にすることで、美しい緑化景観に加え、生物多様性に配慮した緑化や園芸活動に活用できる緑化など、緑化の多面的機能を効果的に発揮できる建物緑化を提供することが可能になった。

#### 6.4.4 半自然草原の再生

里山の代表的な景観の一つである草原は1960年代以降の土地利用の変化に伴い著しく減少しており、その保全・再生が社会的な課題となっている。当社は草原の維持管理で発生する刈草を緑化対象地に投入することで、類似の種組成を持つ草原の面積を拡大する、ヨーロッパで牧草地を拓げるのに古くから使われてきたHay transfer<sup>6.9)</sup>と呼ばれる手法に着目し、竹中技術研究所における実証試験（Photo 6.3）で、近隣の自然度の高い草原の刈草を緑化材料に、複数の異なる土壌条件や刈草の投入量・投入方法の施工方法が、成立する草地景観の種組成や緑被の拡大速度に及ぼす影響について研究を行った。全10条件の試験区の植生調査の結果、カワラナデシコやオミナエシ、ワレモコウやタチフウロといった草原性植物（Photo 6.4）が確認され、草原性植物の出現種数や割合、外来種と在来種の比率の観点から自然度の高い草原再生に最も有効と考えられる手法を選定した。その結果を全国の様々なプロジェクトにおいて、草地景観を創出し草原性植物の種数を増加させる生物多様性に配慮した緑地づくりの提案として活用している<sup>6.4)</sup>。



Photo 6.3 実証試験区  
Test area



Photo 6.4 実証試験区で確認された草原性植物の例  
(左：カワラナデシコ、右：オミナエシ)  
Grassland plants identified in the test area  
(Left: *Dianthus superbus* var. *longicalycinus*,  
Right: *Patrinia scabiosifolia*)

### 6.5 運用支援技術

#### Operation Support Technologies

6.5では、自然要素を建物内外の執務空間に取り込んで、オフィスワーカーへの活用を促進し、リフレッシュや自然への愛着を喚起することで業務生産性の向上や偶発的なコミュニケーション機会の増加を期待した取り組みを行っている。当社の運用支援技術として、バイオフィリアデザイン及びソトコミを紹介する。

#### 6.5.1 バイオフィリックデザイン

人は生来、自然に対して愛着を感じる性質（バイオフィリア）をもつという学説<sup>6.10)</sup>に着目し、空間に自然要素を取込むことで、人にとって心地よい空間の提供を目指すのがバイオフィリックデザインである。バイオフィリックデザインでは、光・風・水など自然要素や、木材などの天然建材、自然をモチーフとしたデザインを建築に採り入れる。こうした各種要素の中でも、特に注目されるのが、植物を利用した屋内外の緑化である。近年の緑化技術の進歩により、屋内において低照度耐性がある植物を用いたデザイン性が高い緑化空間（Photo 6.5）や、屋外の建物上において最新緑化技術を活用した豊かな緑化景観の実現が可能になった。緑化によるバイオフィリックデザイン空間を計画する際には、植物種類や健全な植物生育を実現する緑化技術を検討する植栽計画、そして緑化された空間の利用や植栽された植物の活用などを提案する利用計画、それを実際に運用し改善する運用計画の各種計画に配慮することで、高付加価値な空間の提供が可能になる。

こうした緑化空間を利用者に提供することで、利用者の満足度や、

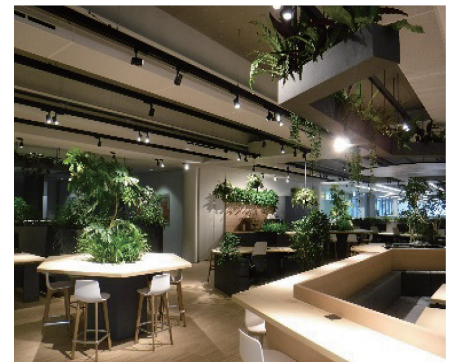


Photo 6.5 屋内の緑化空間事例  
Example of indoor green space

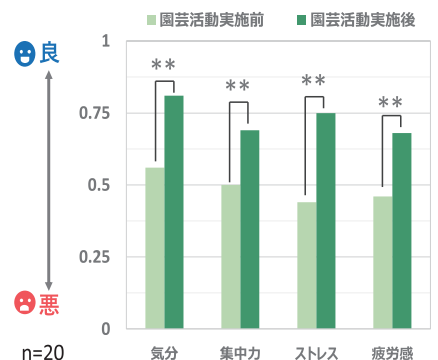


Fig. 6.10 園芸活動体験による状態改善効果  
Effects of horticultural activity experience  
on condition improvement

生産性などの主観的自己効力感が高まることが確認できている<sup>6.11)</sup>。また、屋内外の緑化空間は単に景観として享受するだけでなく、園芸セラピーとして知られるように、人が主体的に緑化空間の植物育成や採集・活用などに関わることで、心身の健康増進などにさらに寄与できる可能性がある。

そこでバイオフィリックデザインのさらなる価値創出を目的に、竹中技術研究所の建物緑化空間で生育した植物を活用して、従業員を対象としたスワッグづくりなどの園芸活動を3ヶ月にわたり提供し、バイオフィリックデザインに主体的に関わることで得られる効果について検証した。その結果、園芸活動を介した他者との交流促進による社会的健康の増進など、利用者の心身の健康や社会的健康などが改善する可能性が示された (Fig. 6.10)<sup>6.12)</sup>。

## 6.5.2 ソトコミ

屋外空間の利活用を促進するためには、先述のバイオフィリックデザインのように、ハード面で屋外空間を計画・整備することに加え、仕事やレジャーなどの日々の生活における活動を屋外空間にも広げるように促すといったソフト面も重要である。当社は、そのソフト面で屋外空間へ利用の幅を広げるソリューションを「ソトコミ」と呼ぶ。屋外を快適に利用できる度合いを示す当社独自の「ソトワーク指数」(Fig. 6.11)をスマートフォンなどから利用者へ知らせることで、屋外空間を利用するワークライフスタイルを支援している。ソトワーク指数は、設置された複合気象センサーから得られた温湿度や日射量、風速などのリアルタイムなデータをもとに、6段階で表される。

ソトコミの実証試験のために、暑熱環境緩和策を施した屋外ワークプレイス (Photo 6.6) を大阪ビジネスパークに位置するオフィスビル (クリスタルタワー) の敷地内に設け、ソトワーク指数を用いたアプリケーションの実用性と屋外空間活用のメリットを検証した<sup>6.13)</sup>。屋外ワークプレイスのソトワーク指数や空席状況、にぎわい度をスマートフォンで利用者に知らせることによる利用頻度の変化や利用時の主観評価を調査した。さらに被験者実験によって、屋外ワークプレイスによる利用者の知的生産性向上効果を確認することができた。

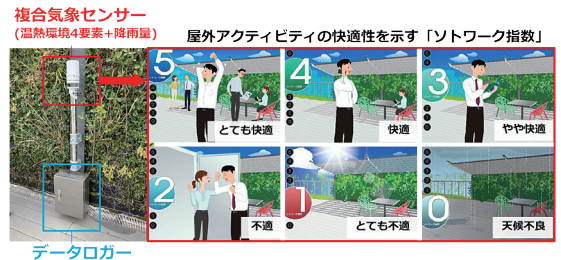


Fig. 6.11 ソトワーク指数の算出と表示例  
Sotowork-index calculation and display examples



Photo 6.6 大阪ビジネスパークにおけるソトコミ実装例  
Example of Sotocomi implementation in Osaka Business Park

## 6.6 適用事例

### Examples of Application

前述の各技術をプロジェクト特性に応じて、計画設計から施工、管理運営の各フェーズで適用することで魅力的なデザインに寄与することができる。ここでは二つの事例を紹介する。

### 6.6.1 WITH HARAJUKU (ウィズ原宿)<sup>6.14)</sup>

WITH HARAJUKUは、明治神宮の杜に面したJR山手線原宿駅前に立地する複合商業施設で、2020年に竣工した。

本プロジェクトでは、表参道と竹下通り・裏原宿の独自の「通りの文化」が混在する地域にふさわしい施設として、敷地の高低差を活かしながら、施設を貫通する歩廊動線「パサージュ」とセットバックした「屋外テラス」からなる新しい通りの創出と、古地図に記された計画地周辺の旧地名「源氏山」の再生をコンセプトとした。その実現のために、明治神宮の杜と表参道・裏原宿エリアの地域生態系に配慮した植栽計画、鳥類を指標とした緑地計画技術の活用、施設を貫通するパサージュの風環境評価、木本を含む在来種による壁面緑化



Photo 6.7 明治神宮の杜につながる源氏山  
Bird's eye view



(Vertical Forest)等を適用し、建築を地形に見立てた段状のテラスと低層屋上の緑化を実現した(Photo 6.7)。

新しい「源氏山」が原宿の街並みと明治神宮の杜をつなぐランドマークとして都市景観を形成すると共に、駅前と裏原宿をつなぎ、街の回遊性を高める公共的な歩行空間が新たな人の流れを生み、未来に向けた持続的な街の価値向上に寄与していく(Photo 6.8)。

### 6.6.2 新柏クリニック<sup>6.15)</sup>

新柏クリニックは、千葉県柏市郊外に位置する120床の透析診療所とその周辺施設である。

日々透析に通う患者の“からだ”と“こころ”を浄化する「森林浴のできるクリニック」をコンセプトとし、周囲の風景を取り込む開放性の高い木質・木造架構の透析室を持つ診療所(1期、2016年)と、腎臓リハビリテーションのうち運動療法の実践を目的とした庭園(2期、2017年)、腎臓病の原因のひとつとされる糖尿病治療に特化した糖尿病専門治療センター(3期、2020年)が、駅前地区にまとまって立地し、「森林浴のできるメディカルケアタウン」を形成している(Photo 6.9)。

3期6年に及ぶメディカルケアタウンづくりでは、地域生態系に配慮した植栽計画、鳥類を指標とした緑地計画技術の活用、雨水貯留浸透技術レインスケープ(Photo 6.10)や健康遊歩道の実装、緑地認証(SEGES そだてる緑)の取得等に取り組むことで、街が緑豊かに様変わりしただけでなく、クリニックの人材確保、患者のQoLの向上にも寄与するなど、事業主やクリニックスタッフ、患者、地域住民等、ステークホルダーへの価値提供を実現している。

## 6.7 本章のおわりに

### Conclusion of This Section

冒頭に述べたように、企業が生物多様性保全に資する土地利用を推進する目的が、これまでの社会貢献的なものから、脱炭素と並ぶ経営上の重要課題と位置付けられ、自然重視型の土地利用を推進する社会ニーズが高まっている。本章では、これらニーズに対応する当社の取り組みとして、ランドスケープデザインを支える計画技術・環境シミュレーション技術・対策技術・運用支援技術に関する当社の技術開発と建築作品への適用事例をとりまとめた。今後も、これらランドスケープデザインを支える技術の開発とプロジェクト適用を推進し、自然の多機能性を都市や建物空間で巧みに活かしながら複雑な都市の社会課題を総合的に解決し、サステナブル社会の実現に貢献していく所存である。

## 参考文献

- 6.1) Savard, J. P. L., Clergeau, P., & Mennechez, G. Biodiversity concepts and urban ecosystems. Landscape and Urban Planning : 48 (3-4), 131-142, 2000.
- 6.2) Simberloff. Flagships, umbrellas, and keystones is singlespecies management passe in the landscape era. Biological Conservation 83 : 247-257, 1998.
- 6.3) 北野雅人, 深谷肇一:「都市鳥類の生息モデルに基づいた緑地計画技術」, 建設機械施工, Vol.68 (2), p89-94, 2016.



Photo 6.8 街を望む屋外テラス  
Outdoor terrace with city view



Photo 6.9 メディカルケアタウン全景  
Aerial photograph



Photo 6.10 レインスケープと庭園  
Rainscape and Garden

- 6.4) 北野雅人, 向井一洋, 槌尾健, 西田恵, 鈴木康平, 林 紀男, 下野綾子:「グリーンインフラとして計画された調の森 SHI-RA-BEの多機能性評価」, 竹中技術研究報告, No.79, 2023
- 6.5) 土屋直也, 安藤邦明:「快適な屋外空間設計のための熱環境シミュレーション」, 計算工学講演会論文集, Vol.19, 2014.
- 6.6) 藤原邦彦, 三輪隆, 宮田弘樹, 鈴木康平, 浅輪貴史:「ランドスケープデザインのための樹木配置最適化に関する研究 その3 ビオトープにおける水生生物の生育環境改善のための活用事例」, 日本建築学会大会, pp.2441-2442, 2020年9月.
- 6.7) 佐久間護, 小島倫直, 三坂育正:「樹木が植栽可能な壁面緑化に関する研究:緑化システムと生育特性の評価」, 日本建築学会大会, pp.1029-1030, 2008.
- 6.8) 伊藤幹二・伊藤操子(2020). まちの健康回復に芝生の力を活かす グラスパーキングの科学 大阪公立大学共同出版会
- 6.9) Orsolya Valkó, Zoltán Rádai, Balázs Deák: Hay transfer is a nature-based and sustainable solution for restoring grassland biodiversity. *Journal of Environmental Management* : 311 (2022) 114816
- 6.10) 小島倫直, 花里真道, 石川敦雄, 岩崎寛:「オフィスの緑化された共用空間における就業者の利用実態および利用頻度や利用意識に影響する要因」, 日本緑化工学会誌47 (1), pp.129-134, 2021.
- 6.11) Edward O. Wilson. *Biophilia*. Harvard University Press. (1984)
- 6.12) 小島倫直, 花里真道, 岩崎寛:「オフィスの植栽を利用した園芸活動による就業者のワークエンゲージメントおよびウェルビーイング・社会的健康の改善に関する検証」, 日本緑化工学会誌48 (1), pp.80-85, 2022.
- 6.13) 安藤邦明, 阪本泰智, 河合哲夫, 他9名:「ICTを活用した分散型コミュニティスペース」, 日本建築学会大会建築デザイン発表会, pp.14-15, 2015年9月.
- 6.14) 第2回グリーンインフラ大賞 優秀賞 (2022年), グッドデザイン賞 (2021年), 第20回 屋上・壁面緑化コンクール 環境大臣賞 (2021年), 他
- 6.15) グッドデザイン賞 (2017年, 2022年), 医療福祉建築賞2017 (2017年), 他

## 7 おわりに Conclusion

山本 雅史 Masashi Yamamoto\*1

特集として魅力的なデザインの実現を支援する技術の一例として木質構造デザイン技術、コンクリートの美観デザインを支える技術、デザインの自由度を高める3Dプリンター活用技術、ファサードデザインを支える技術、ランドスケープデザインを支える技術をそれぞれ紹介した。竹中技術研究所が開発を行う技術の多くは魅力的なデザインの実現を支援するために行われている。それら技術により竹中工務店が提供する建物およびランドスケープをその所有者、使用者をはじめとするステークホルダーの方々が魅力あるものととらえ、建物等に愛着を持つ、保有することが誇れると感じていただけていると願っている。

近年、新型コロナウイルス感染拡大をきっかけに、物理空間から仮想空間へのシフトが進む一方、物理空間の良さも見直され、物理空間と仮想空間の合理的な使い分けが議論されている。また、少子高齢化、ワークライフバランスなど働く人や働き方の変化に加えて、温暖化ガス排出量の削減、生物多様性といった環境問題への取り組みも進めていく必要がある。このように、取り巻く環境が急速に変化する中で、魅力的なデザインとして求められるものも必然的に変化する。また、建物等の寿命は長い（長くするため）、今だけでなく一歩先の将来を見た対応が望まれる。

建設業の活動が社会、環境に与える影響は大きく、上記への取り組みに対する社会からの期待、責任も大きい。竹中技術研究所では近年急速に進化するロボット、AI、メタバースなどをはじめとする最先端技術を利用しつつ、引き続き、変化する社会においても魅力あるデザインを提供できるよう技術開発を推進していく。

---

\*1 技術研究所 リサーチフェロー 博士(工学) Research Fellow, Research & Development Institute, Dr. Eng.