

# 特集 現象を理解するための可視化技術

## Visualization Technologies for Understanding Phenomena

### Summary

In research and development in the field of architecture, visualization technologies are extremely important when capturing physical phenomena from a theoretical perspective, understanding the events and mechanisms that are occurring, and verifying hypotheses through experimental methods. Visualization technologies are methods for making data and information about invisible or unseen events, phenomena, and relationships into a form that is easy to grasp visually using graphs, heat maps, 3D models, infographics, dashboards, text mining, and other means. Using visualization technologies not only facilitates common understanding and decision-making, but also makes understanding and sharing of information more efficient. Furthermore, adding a time axis to events, phenomena, and relationships makes it possible to grasp changes over time, and by deciphering the deep information and patterns behind the data, it becomes possible to make future predictions, formulate hypotheses and gain deeper insights.

In this special issue, titled “Visualization Technologies for Understanding Phenomena,” we take up examples of visualization technologies related to building construction quality assurance and architectural space evaluation. In order for the general reader to understand the content widely, the content of each topic is explained in a compact manner. An overview of the topics is shown below.

Chapter 2 introduces examples of visualization technologies that contribute to the performance and quality of building structures. Three examples of visualizing phenomena that cannot be quantitatively grasped with the naked eye or visually confirmed are introduced and are used to improve construction quality.

Section 2.1 shows an example of visualizing the grout filling status of mechanical joints during the precast method by an analysis method using the Discrete Element Method (DEM).

Section 2.2 shows an example of real-time visualization of the filling status at the time of concrete pouring in the formwork by flow-gradient analysis.

Section 2.3 shows visualization by motion analysis of the craftsmanship of painting and plastering. Examples of visualizing phenomena that cannot be quantitatively grasped with the naked eye or phenomena that cannot be physically confirmed visually are introduced and are used to improve construction quality.

Chapter 3 introduces examples of visualization of various phenomena that occur in architectural interior spaces under the title of visualization technology in architectural spaces.

Section 3.1 shows the visualization technologies for airflow and particle behavior that contributes to optimal design in air conditioning and room layout.

Section 3.2 shows an example of a system that visualizes the biometric information and location information of occupants in office with the aim of improving the quality and optimization of architectural plans, which are becoming increasingly diverse.

Section 3.3 is an example of visualizing the difference in indoor earthquake damage due to differences in the seismic performance of buildings, using VR video of the behavior of installed furniture and fixtures.

All of these cases are the visualization of invisible or invisible events and phenomena, and the visualization of the relationship between data and information. It was introduced as an effective case study from the following perspectives.

- Promote common understanding and decision-making by streamlining the understanding and sharing of information
- Predict the formulate hypotheses and gain deep insights by deciphering deep information and patterns behind changes over time and data.

**Keywords:** visualization technology, architectural structures, architectural interior spaces

# 1 はじめに

## Introduction

榑部 淳道 Atsumichi Kushibe\*1

建築分野の研究開発において、物理現象を理論的視点でとらえ、起きている事象やメカニズムを理解して実験手法などにより仮説を検証する際に可視化技術は非常に重要である。可視化技術は目に見えないあるいは見えていない事象、現象、関係性に関するデータや情報を、視覚的に捉えやすい形にするための手法である。主なものには、グラフ、データに含まれる数値を、色とグラデーションで視覚化するヒートマップ、3Dモデル、視覚的に複雑な情報をわかりやすくしたインフォグラフィクス、データをグラフや表にまとめて一画面に可視化するダッシュボード、大量のデータを、統計学や人工知能などを駆使して分析し、新たな知見を見出すデータ・テキストマイニングなどがある。これらの手段による可視化技術を用いることで、共通の理解や意思決定が容易になるだけでなく、情報の理解と共有を効率化することができる。さらに、事象、現象、関係性に時間軸を加えることで経時変化を把握し、データの背後にある深い情報やパターンを読み解くことで将来予測、仮説の立案や深い洞察が可能となる。

本特集では、「現象を理解するための可視化技術」と題し、建築施工品質確保や建築空間評価に関する可視化技術の例を取り上げる。一般の読者にも広く内容を理解していただくため、各トピックスについてコンパクトに内容を解説する構成としている。Table 1に、本特集にて取り上げた6つの事例の可視化技術としての位置づけを示す。

第2章では建築構造物の性能・品質に関する可視化技術と題して、個別要素法 (Discrete Element Method, DEM) を用いた粒子法シミュレーション解析手法により、プレキャスト工法時の機械式継手部へのグラウト充填状況を可視化した例、流動勾配解析による型枠内コンクリート打設時の充填状況のリアルタイムの可視化例、および塗装や左官の職人技能の動作解析による可視化を取り上げ、肉眼では定量的に把握できない現象や、目視で直接確認できない現象を可視化し、施工品質の向上に役立てている例を紹介している。

第3章では建築空間における可視化技術と題して、空調環境設計における最適設計のための気体・粒子の可視化技術に加え、デザインの多様性が増している建築計画をより高質化、最適化することを目指しオフィス空間の執務者の生体情報や位置情報を可視化した例、さらには、家具・什器の物理シミュレーションで地震時の揺れに伴う室内の被害をアニメーションにより可視化し、耐震性能の違いによる被害の差を示すことで設計者と居住者との合意形成に役立てている例を紹介している。

今回取り上げた6つの事例は、建築分野における可視化技術のごく一部の事例にすぎないが、いずれも情報の理解・共有の効率化による共通理解・意思決定の促進につながる事例、あるいは時間やデータによる変化の背後にある深い情報やパターンを読み解くことによる、予測、仮説立案、深い洞察の獲得につながる事例である。

Table 1 本特集におけるトピックスの位置づけ

章	タイトル	目的	手法	可視化の効果
2章	建築構造物の性能・品質に関する可視化技術			
2.1節	グラウト充填施工の流体解析による可視化	施工品質管理	粒子法シミュレーション解析	グラウト施工時の充填挙動の可視化による施工品質の不具合リスク排除
2.2節	流動勾配解析による型枠内コンクリート充填状況の可視化	施工品質管理	流動勾配解析	コンクリート型枠打設工事の状況可視化による品質確保と経験知のデータ化
2.3節	職人技能の計測・可視化技術	塗装、左官技能の伝承	職人動作の計測・動作キャプチャー	職人技能に関わる動作を数値化し「コツ」の解明と理解・習得の促進
3章	建築空間における可視化技術			
3.1節	空間設計や室レイアウトの最適化に資する気流・粒子の可視化技術	空間設計とレイアウトの最適化	気流・粒子可視化	目に見えない気流・粒子の挙動を可視化し精緻な空間設計に活用
3.2節	オフィス空間における執務者の生体情報および位置情報の可視化技術「GISTA」	オフィスにおけるワーカーの生体・位置情報可視化	生体情報等のセンシング、ヒートマップ化	ワーカーの生体情報、位置情報に基づく自身への理解と空間活用の最適化
3.3節	地震時の揺れの可視化「TAFT」	地震時の揺れや被害状況に関する理解や合意形成	地震被害のVR画像と連動する振動体感デバイス	建物性能の地震時の安全性、被災後の安心感に関する合意形成の迅速化、円滑化

\*1 技術研究所 環境・社会研究部長 博士(工学) General Manager, Environmental & Social Research Department, Research & Development Institute, Dr. Eng.

## 2 建築構造物の性能・品質に関する可視化技術

### Visualization Technologies for Performance and Quality of Building Structures

#### 2.1 グラウト充填施工の流体解析による可視化

##### Visualization Using Fluid Analysis of Grout Filling Construction

掛 悟史 Satoshi Kake\*2

鉄筋コンクリート（RC）造建物で用いられているプレキャスト（PCa）工法において、機械式継手部へのグラウト充填施工での充填性検証や新たなPCa工法の開発促進のため、国立研究開発法人 海洋研究開発機構との共同研究により、個別要素法（Discrete Element Method, DEM）を用いた解析手法を開発した。本節では開発した解析手法およびグラウトに関連する各解析による充填状況の可視化について示す。

##### 2.1.1 背景

RC造高層建物では、躯体工事の品質の向上や生産性向上を図るため、PCa工法が採用されることが多く、今後建設労務者の不足に伴い、その採用はさらに増加していくと考えられる。PCa工法では、鉄筋を連続させるために機械式継手を採用することが多い。機械式継手と鉄筋との間で応力を伝達させるため機械式継手内に無収縮グラウトを充填する。このグラウト充填施工の品質を高めるため、事前に継手部および部材目地部を模擬したアクリルボード試験体による充填確認試験を実施し、グラウト注入中のつまりや空気溜まりが発生しない充填方法を検討するのが望ましい。しかしながら、グラウト充填については未だに経験則での充填検討がなされている。グラウト充填を行う箇所はPhoto 1に示すようにPCa部材および型枠によって閉鎖された空間であるため、充填中は目視による確認が難しい。そのため、充填された材量や機械式継手の排出孔からのグラウト排出により、部材内への充填を保証している。このようなグラウト充填施工の現状に対し、目視での確認ができないPCa部材内部へのグラウト充填の手順や充填後の品質を定量的に検討するために、個別要素法による流体解析手法を開発し充填状況の可視化を試みた。

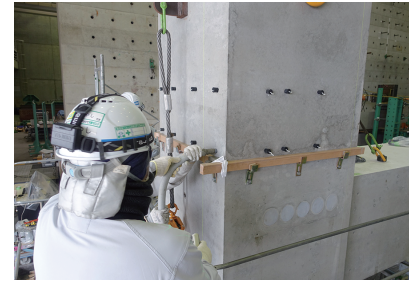


Photo 1 グラウト充填状況  
Grout filling status

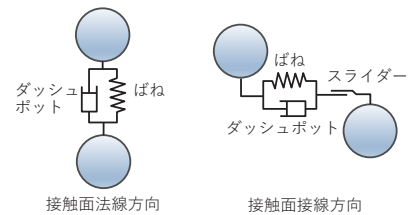


Fig. 1 粒子同士の接触モデル  
Contact model between particles

##### 2.1.2 個別要素法による解析概要

開発した流体解析手法は国立研究開発法人 海洋研究開発機構が開発した個別要素法の解析ソフトであるDEMIGLACE<sup>1)</sup>をベースにしたものである。個別要素法は、多数の個体粒子の運動を粒子ごとの並進および回転の運動方程式に基づいて時刻歴に解き進める解析手法である。本解析手法での粒子間力のモデル化については、法線方向はばねとダッシュポットを並列に配置したVoigtモデルを考慮し、接線方向はスライダとVoigtモデルを直列に配置したモデルを用いている（Fig. 1）。粒子間の接触力はHertz-Mindlinの弾性接触理論<sup>2)</sup>を適用し、DEMIGLACEでは非線形ばねを用いており、所謂簡易Hertz-Midlin接触力モデル<sup>3)</sup>を使用している。またグラウトの粘塑性流動を粒子で表現するために、粒子間の法線方向に（1）式より求める粘塑性力 $F$ を作用させた。式中の粘性力 $F_{vis}$ は粒子間相対速度に比例する減衰力を表し、塑性力 $F_{pla}$ は引力と斥力の合力によりポテンシャル力を表している。

$$F = F_{vis} + F_{pla} \quad (1)$$

また粒子間と同様に、粒子と容器壁面との間の接触力と粘塑性力についても考慮できるモデルとしている。



Photo 2 グラウト材のフロー試験  
Grout flow test

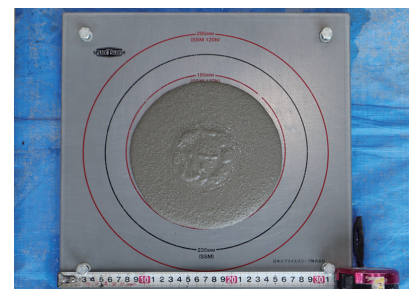


Photo 3 グラウト材のフロー試験結果  
Grout flow test result

\*2 技術研究所 研究主任 Senior Researcher, Research & Development Institute



### 2.1.3 グラウト材のフロー再現解析

グラウトは充填前にフロー試験にて流動性を確認し、品質管理を行うことが一般的である。そこで本解析手法で用いる粘塑性流動に関する各種係数について、グラウトのフロー試験結果に基づくキャリブレーションを行った。参照したフロー試験では、Photo 2およびPhoto 3に示す直径50mmの円筒状の容器内にグラウト材を充填したのち、容器を引き上げた際のグラウト材のフロー値の変化をハイスピードカメラで計測した。Fig. 2およびFig. 3にグラウトのフロー値の実験結果と本解析手法による解析結果との比較を示す。フロー試験では容器を引き上げた後0.5~1.0秒付近まではグラウトのフロー値が概ね線形の挙動を示す領域が確認され、1.0~1.5秒程度でフロー値が徐々に緩やかとなる領域が確認された。その後、容器引き上げから1.5秒以降についてはフロー値が頭打ちとなる傾向を示した。これに対してキャリブレーション後の解析結果は、上記のグラウトの各時刻での挙動の傾向を概ね再現できた。最終的なフロー値についても実験値が170mmに対して解析値は172mmと高い精度でグラウトの挙動を再現できた。

### 2.1.4 グラウト材の継手部充填解析

前節で得られた粘塑性流動に関する各種係数を用いて、実際のPCa部材の機械式継手および目地部へのグラウト充填施工の再現解析を実施した。本解析手法では、機械式継手および目地部を想定した容器に対して、グラウトを想定した粒子を指定した速度で注入している。Fig. 4にグラウト充填試験の実験結果を示す。実験ではグラウトの注入位置を起点として扇形にグラウトが広がっていることがわかる。さらに継手部の中心には鉄筋を配しており、鉄筋の後方ではグラウトが遅れて伸展していることがわかる。Fig. 5にグラウト粒子の分布状況を可視化した例を示す。実験結果同様、グラウト注入位置を起点として扇形にグラウトが広がっており、鉄筋の後方のグラウトの伸展の遅れについても再現することができた。

### 2.1.5 シミュレーションによる効果

これまでPCa部材へのグラウト充填施工は、経験則での検討が主となっており、目視での確認ができない空間への注入状況を、アクリルボード試験体を使用して可視化してきた。建設労務者の減少に伴いPCa工法による建設現場の生産性向上がさらに求められる中で、新たなPCa工法の開発も今後さらに要望されると考えられる。今回開発した流体解析手法を用いることにより、新たなPCa工法を含むグラウト充填施工に関して、充填試験前の検討段階から品質と施工性を両立できる様々な注入方法を模索することができる。

#### 参考文献

- 1) 阪口秀, 西浦泰介 : DEMIGLACE, INNOVATION News, 11, pp.10-13, 2009
- 2) Mindlin, R.D., : Compliance of Elastic Bodies in Contact, ASME. J. Appl. Mech., 16 (3), pp.259-268, 1949
- 3) Tsuji, Y., Tanaka, T., Ishida, T. : Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe, Powder Technology, 71 (3), pp.239-250, 1992

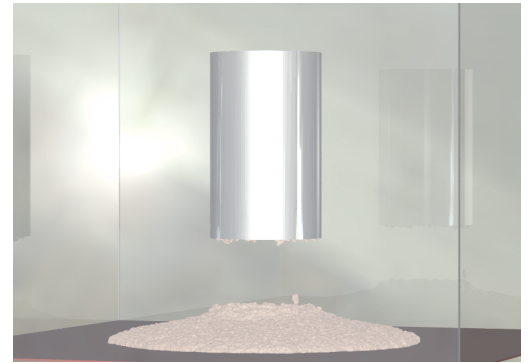


Fig. 2 フロー試験の解析結果  
 Analysis result of flow test

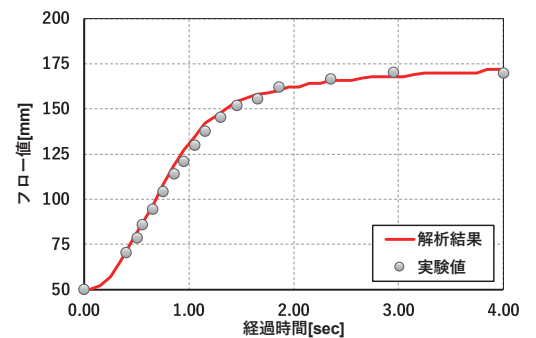


Fig. 3 実験結果および解析結果の比較  
 Comparison of experimental and analytical results

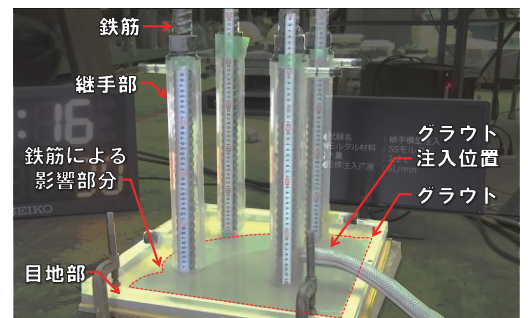


Fig. 4 グラウト充填試験の実験結果(充填開始25秒後)  
 Test result of grout filling test (25 sec. after filling start)

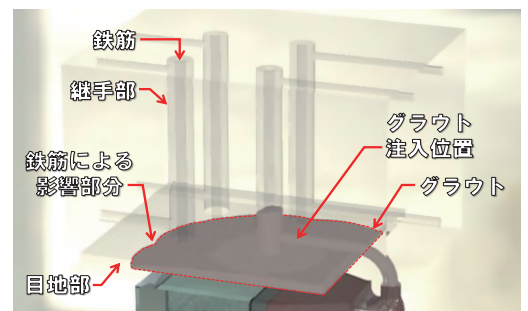


Fig. 5 グラウト充填試験の解析結果(充填開始25秒後)  
 Analysis result of grout filling test (25 sec. after filling start)



## 2.2 流動勾配解析による型枠内コンクリート充填状況の可視化

### Visualization of Concrete Filling Status within Formwork Using Flow-gradient Simulation

辻 大二郎 Daijiro Tsuji\*3

コンクリート打込み順序の最適化と品質管理の精度向上を目的として、打重ね時間を考慮したコンクリートの充填状況を可視化する。これにより、効率的な施工計画の立案と実施時の品質確保が可能になる。

#### 2.2.1 はじめに

鉄筋コンクリート造建築物の躯体品質の確保のために、コンクリート打込み時において規定の打重ね時間（外気温25℃以下の場合150分、25℃を超える場合は120分）を遵守してコールドジョイントや豆板のない健全で美観に優れた躯体を作り上げることは、コンクリート表層品質の向上及び長期耐久性確保の観点において重要である。しかし、これまでコンクリート打込み順序の計画は、多くの場合、熟練のポンプ工の経験と知識に基づいて計画されているため、打重ね時間を守るための打込み順序に関する暗黙的なノウハウがコンクリート打込みに関わる作業員に伝わらずにいる状態であった。また、コンクリート打込みの実施時においても打込み順序及び下層・上層の打重ね時間の正確な記録が残らないため、計画の良否や反省を次のコンクリート打込みに活かすことに結び付きにくい状況であった。

このような背景に対して、今回開発した「コンクリート打込みの可視化シミュレーション」は、工事前の打込み計画の検討段階においてコンクリートの充填状況の可視化技術であり、打重ね時間を考慮した最適な打設計画を検討することができる。また、「コンクリート充填状況可視化システム」は工事当日の打込み状況の推移を、筒先の正確な位置情報とポンプ車からのコンクリート供給量をリアルタイムで取得しながら可視化する技術であり、工事の実際の進捗を確認・管理することで打重ね時間の順守や品質管理の精度向上、さらに作業効率の改善が期待できる。

#### 2.2.2 コンクリート打込みの可視化シミュレーション<sup>1)</sup>の概要

コンクリート打込み時において、型枠内部の充填状況を正確に把握することは困難であり、打込み前における打重ね時間の遵守に向けた事前計画には工事担当者や職人の経験やノウハウに頼る場面が多々あった。

本シミュレーションは、コンクリートが型枠に流し込まれた際に充填されていく様子を流動勾配解析により可視化して、部材への打込み予測位置をシミュレーションするもので、特に壁や柱といった下方の見えづらい立ち上り型枠の内部でコンクリートの投下後の広がり方を加味した流動状況を事前に可視化することができ、打込み前に型枠内での充填状況や打重ね時間の予測を行うことが可能である。要素ブロックによる流動勾配の模式図をFig. 6に示す。シミュレーションの仕組みは、コンクリートを5センチ角ほどのブロックの集合体とみなし、型枠を模した容器の中に落とし込んでいき、ある程度ブロックが積まれた段階で未充填部分に崩れていくことを繰り返す。一か所での打込み数量または打込み高さを事前に設定することで、その高さに到達するまでブロックを積み上げていくことで打込み時の流動勾配が決定される。

本シミュレーションを工事に適用する際は、計画時に打込み範囲の型枠モデルを作成し、現場担当者が計画した打込み順序でシミュレーションを実施する。実際のシミュレーションを行った際の画面の様子をFig. 7に示す。シミュレーション結果は、型枠に落とし込まれた時刻からの経過時間によって色が青→緑→黄→赤と変化し、視覚的に打重ね時間の厳しい箇所がわかる。また赤色になる時間を打込みから120分と設定した場合、シミュレーション結果で赤色が見られた場合は建築工事標準仕様書JASS5などに基づく打重ね時間の超過となるため計画を見直す必要があることがわかり、複数のパターンでシミュレーションを行うことで計画段階での打込み順序や打込みピッチ等の最適解を把握することができる。

実工事での経験の積み重ねは無論重要なことであるが、このような

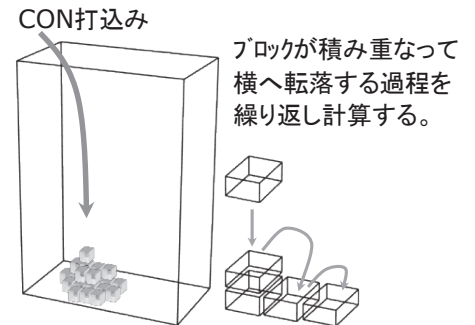


Fig. 6 要素ブロックによる流動勾配の模式図  
 Schematic diagram of flow gradient with Block elements

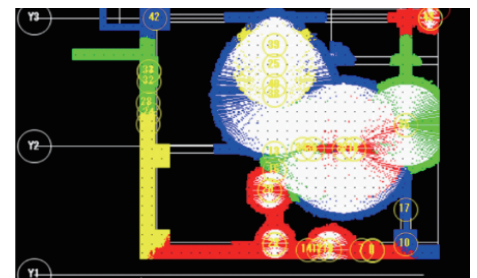


Fig. 7 シミュレーションの例（平面表示）  
 A simulation example (flat view)

\*3 技術研究所 建設基盤技術研究部 建設材料グループ長 博士(工学) Group Leader, Research & Development Institute, Dr. Eng.

シミュレーションで事前に工事状況を予測しておくことはトラブルの回避に繋がるとともに、作業員との事前打合せの際に本シミュレーションを用いて、関係者間で打込み当日の作業手順や注意点などを共有でき、打重ね管理の点で、躯体品質の確保に役立てることができる。また、本シミュレーションを用いて打設順序を検討できるため、経験値の浅い若手現場担当者の学習ツールとしての活用も期待される。

### 2.2.3 コンクリート充填状況可視化システムの概要

コンクリート充填状況可視化システムの概要をFig. 8に示す。本システムは以下の三要素で構成されている。①ポンプ工(筒先担当)に位置情報測位のための受信機を携帯してもらい『打込み位置』をリアルタイムで測位する。②コンクリートポンプに設置された高精度の計測機器により、ポンプ車からの吐出量・吐出速度をリアルタイムで計測し、位置情報を測位した筒先ポンプ工の『打込み位置』と吐出データを連動させることで『打込み量』を正確に算出する。③前述の『型枠内での流動勾配』データをもとに、実際の型枠内でのコンクリート打込み状況を3Dモデルとしてリアルタイムで可視化する。これにより、現場責任者や作業員はタブレットなどのモバイルデバイスを通じて、コンクリート打込み状況や打重ね時間間隔が危ない箇所をリアルタイムかつ直感的に把握することができる。

コンクリート打込み時の充填状況の可視化の例をFig. 9に示す。実際の打上り高さや経過時間を概ね精度よくリアルタイムで把握できることにより、例えば柱では一層目の施工後に二層目の許容される打重ね時間が予測でき、また担当現場員は予定数量に対する現在の数量をリアルタイムで把握しながら残数量を確認し生コン車の手配ができ、残コン・戻りコン削減に役立てることができる。また作業の進捗状況をリアルタイムで把握できるため、作業員の配置や作業順序の最適化が可能となる。

ある商業施設の地下躯体でこのシステムを試適用した事例を最後に紹介する。計画時に3Dシミュレーションを行い、作業員と工事前に詳細な計画の共有をすることで関係者全員の意識向上がなされ、打込み当日も大きな混乱なく筒先移動や締り締め作業を進めることができた。1層目のコンクリートを一つの壁面に打込み終わったタイミングでレーザー距離計を用いて実測した打上り高さや、計画時のシミュレーション上での打上り状態を重ね合わせた図を、Fig. 10に示す<sup>2)</sup>。シミュレーション側のポンプ吸込み効率の設定がやや低かった影響があり打上り高さの実測値とシミュレーション結果に若干差異が見られるが、流動先端部までの勾配の変化は概ね整合した。このリアルタイムの3Dシミュレーション結果を端末で確認しながら現場員は筒先移動を指示し、予定時間内に工事を終了することができた。

本システムを活用することで工事手順を正確にシミュレーションでき、現場担当者は適切に作業を計画し、工事当日のトラブルの軽減や、左官工や鉄筋工といった他工種との作業間調整も効率化できる。今後の課題として、施工データベースを構築することでシステムの精度を高め、各作業所で得られた打込みノウハウを全社的に展開するとともに、AI学習による打設順序の最適解を導き出すことで、コンクリート打込み技術の向上と効率化に寄与していきたい。

### 謝辞

本研究は愛知工業大学、極東開発工業との共同開発研究によって実施した。ここに謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 瀬古繁喜ほか：コンクリート打込み計画の可視化シミュレーション，コンクリート工学，Vol.62，No.5，pp.358-364，2024
- 2) 小川亜希子ほか：準天頂衛星システム（SLAS）と車輛管理支援システムを利用したコンクリート工事管理システムの現場実証（その3：商業施設の厨房除外設備における現場実証），日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），pp.757-758，2021.9

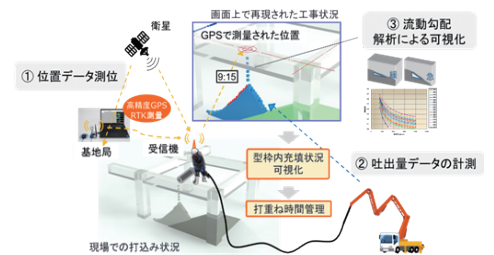


Fig. 8 コンクリート充填状況可視化システムの概要  
Configuration of concrete filling status visualization system



Fig. 9 打込み当日の打設状況の様子  
Application of visualization system during concrete pouring

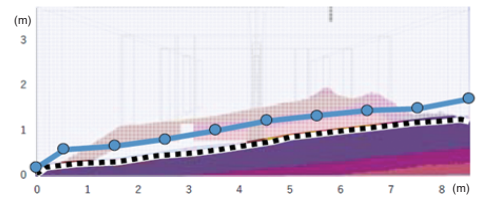


Fig. 10 実際のコンクリートの打上り高さ（青丸印）とシステム上のコンクリートの打上り状態（黒破線）の比較  
Comparison of real concrete pouring heights (in blue circles) with simulation results (in black dashed lines)

## 2.3 職人技能の計測・可視化技術

### Measurement and Visualization Technologies for Construction Worker's Craftmanship

渡邊 義明 Yoshiaki Watanabe\*4 西村 智賢 Tomomasa Nishimura\*5

熟練職人の高齢化が進み、若手への技能継承が課題となっている。また、熟練職人の減少により、作業効率や作業品質の低下が懸念されている。このような背景から、我々は技能が十分に身につけていない非熟練職人向けの育成支援システムと、職人不足解消のための建設ロボットの検討・開発を進めている。これらのシステムやロボットの開発において、各種建設作業における熟練職人の動作を計測・可視化し、その技能を明らかにすることが重要である。本節では、これまでに取り組んできた塗装作業と伝統左官作業の動作計測とその可視化について述べる。

#### 2.3.1 塗装職人の技能計測・可視化

塗装作業は建物の美観性のみならず、遮熱性や耐火性といった機能性にも関わる重要な建設作業である。塗料を塗布する方法には、刷毛塗装やローラー塗装、スプレー塗装があるが、本項では最も実施頻度の高いローラー塗装に注目する。ローラー塗装は、ローラーに塗料を含ませる動作と、塗料を塗布する動作を交互に繰り返すことで、塗料を対象に均一に塗布していく。均一に塗料を塗布した後、筋が残らないよう調整する動作を行う。本項では、塗料を塗布する動作における熟練者の技能を明らかにするため、熟練者と非熟練者の動作を計測・可視化した結果を述べる。

計測にあたり、まず熟練者に対してローラー塗装に関するヒアリングを行った。その結果を基に、ローラーの速度と接触力、ローラーハンドル角度を計測項目とした。これらの項目を計測するため、市販のローラーハンドルを基に計測用ローラーを開発した<sup>1)</sup>。計測用ローラーには、接触力を計測するための6軸力覚センサと、ハンドル角度を計測するための9軸IMUを搭載した。ローラーの速度は、デプス画像から推定された動作軌跡を基に算出した<sup>1)</sup>。続いて、計測用ローラーとRGB-Dカメラを使って900mm×600mmのベニヤ板に塗料を塗布する時の動作データを計測した。計測は、熟練者として塗装歴が10年以上の塗装職人5人と、非熟練者として塗装経験のない当社社員4人を対象に行った。

熟練者と非熟練者の塗布動作を比較するため、動作データの可視化を行った。ローラー塗装は、ローラーを上下に往復させて塗料を塗布することが多い。そこで、動作データからローラー往復動作を抽出し、往復動作時の各計測項目の平均と分散を可視化して比較することにした。得られた結果の中で、熟練者 (skilled) と非熟練者 (unskilled) の代表的な例をFig. 11左2列と右2列にそれぞれ可視化した。Fig. 11は上段から順に往復動作時の速度 (Velocity)、ローラーハンドル角度 (Angle)、接触力 (Contact force) を表す。ローラーハンドル角度は、ローラーハンドルのベニヤ板に対する仰角であり、ベニヤ板に平行な時は0 [deg]、垂直な時は90 [deg] とする。各グラフは、各データの平均 (点線) と分散 (青色領域) を示す。青色領域が狭いほど、毎回の往復動作で近い数値が計測された (分散が小さい) ことを表す。各グラフの生成に用いた往復動作データ数は最上段に記載の通りである。往復動作を統一して比較するため、各往復動作データは、動作開始時を時刻0、動作終了時を時刻1とする正規化時間を用いた。

可視化結果を基に熟練者と非熟練者の塗布動作を比較した結果、いくつかの特徴的な差異が明らかになった。まず速度を見ると、熟練者は非熟練者に比べて振幅が大きい (速度が速い)。次にハンドル角度を見ると、熟練者は非熟練者に比べて分散が小さく、また振幅が大きい。そして接触力を見ると、非熟練者に比べて熟練者の分散および振幅が小さい。これらの結果から、熟練者は非熟練者に比べて、塗料を塗布する際のローラー往復動作の速度が速く、ハンドルを大きく動かし、力があまり入っておらず、毎回同じ程度の力を安定してかけていることが明らかになった。また、熟練者はロボットのように毎回同様の往復動作を繰り返していることが確認できた。この傾向は熟練者にも確認して裏付けを得た。

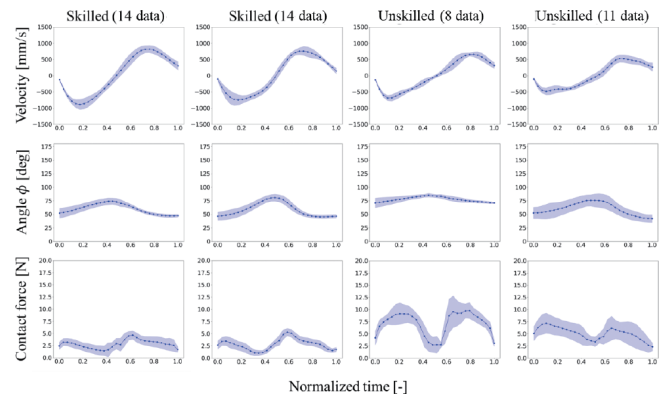


Fig. 11 熟練者と非熟練者のローラー往復時の速度・ハンドル角度・接触力の比較<sup>1)</sup>  
 Comparison of speed, handle angle, and contact force between skilled and unskilled roller reciprocation

\*4 技術本部 主任 Associate Chief, Technology Division

\*5 設計本部 主任 Associate Chief, Design Division



以上のように、本項で述べた計測項目・データを通じて、熟練者のローラー塗装における技能の一端を可視化して明らかにすることができた。

### 2.3.2 伝統左官職人の技能計測・可視化

伝統左官は、寺社仏閣等の文化財に見られる日本の土壁を構築する左官技術であり、鍬を使って自然材料を塗り付ける作業を主とする。材料は、土と砂、すさ（藁・麻・紙など）、水などを混ぜ、場合によっては寝かせて（発酵させて）作成する。材料の塗り付けは、縦方向に塗り付ける縦塗りと、横方向に均す横塗りを組み合わせて行う。本項では、縦塗りに焦点をあて、熟練者の動作計測と可視化結果について述べる。

まず、光学式モーションキャプチャーシステムを用いて、熟練者が910mm×910mmのベニヤ板を縦塗りする時の動作を計測した。計測時、熟練者の全身に48個、鍬に7個のマーカを取り付けた。5人の熟練者の縦塗りを計測し、合計15回分の縦塗り動作データを取得した。そして、Fig. 12のように動作データから骨格モデルを求めて可視化した。

次に、縦塗り時の熟練者の鍬動作の技能解明のため、動作データから鍬動作モデルAを作成した。熟練者ごとの違いはあるものの共通する技能があると仮定し、15回分の鍬動作軌道の平均を取ることでモデルAを作成した。このモデルが熟練者の技能を反映しているか検証するため、モデルAをロボットアームに入力して縦塗りを行わせた。その結果、Photo 4に示すように材料を塗ることはできたが、熟練者と異なり1回目（Photo 4 左）と3回目（Photo 4 右）で一部材料が剥離した<sup>2)</sup>。これにより、鍬動作モデルAは熟練者の技能を完全には反映していないことが確認された。

再度動作データと可視化結果を分析した結果、①塗りはじめに下地方向へ鍬を押し込む動作と、②塗り付けの後に塗り付け時と反対の辺を使って押し付けながら均す動作、が熟練者の動作に含まれていることがわかった<sup>3)</sup>。①・②を反映した鍬の動作モデルBを求め、同様にして検証した結果、剥離なしに材料をPhoto 5の様に塗ることができた。

このように、ロボットアームを用いて入力した動作モデルに含まれる技能を検証することで、熟練者の動作から重要な要素を抽出することができた。そして縦塗り時の鍬の動作では、①と②が重要な要素であることがわかった。

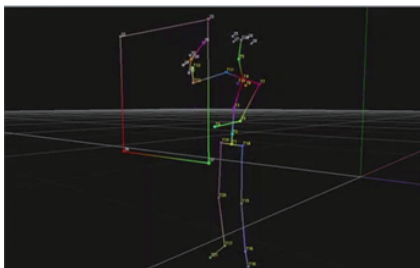


Fig. 12 縦塗り動作時の骨格モデル可視化例  
Visualization example of skeletal model during vertical plastering trowelling

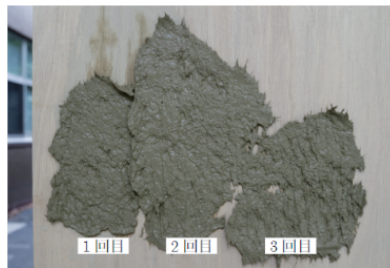


Photo 4 鍬動作モデルAによるロボット縦塗り結果<sup>2)</sup>  
Results of robotic vertical plastering with trowel motion model A



Photo 5 鍬動作モデルBによるロボット縦塗り結果<sup>3)</sup>  
Results of robotic vertical plastering with trowel motion model B

### 2.3.3 まとめ

本節では、熟練者の技能を明らかにするために行った、ローラー塗装と伝統左官の動作計測と可視化について述べた。ローラー塗装と伝統左官について、可視化結果を基に熟練者の技能の一部を明らかにできた。今後はローラー塗装および伝統左官のさらなる可視化を通じて、両作業における熟練者技能の全体像を明らかにしていく。そして、それらの知見を基に、実施中の建設ロボット開発<sup>3),4)</sup>や非熟練者の育成支援システムの開発へ応用していく計画である。

### 謝辞

ローラー塗装および伝統左官の動作計測・可視化は、それぞれ信州大学 自律知能システム研究室と京都工芸繊維大学 村本研究室との共同研究で実施しました。共同研究関係者各位に厚く御礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) Miyairi, Kyosuke et al., "A Measurement System Toward to Skill Analysis of Wall Painting Using a Roller Brush," ROBOMECH Journal, Vol.10, No.5, 14 pages, 2023.
- 2) 登尾育海ら, "左官職人の鍬の動きに基づく経路により制御したロボットアームによる土塗り左官", 第45回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, 31-36, 2022
- 3) 登尾育海ら, "左官職人の動作の分析を基にした土塗り左官ロボットの改良", 日本建築学会大会学術講演梗概集, 情報システム技術, 201-202, 2023
- 4) Watanabe, Yoshiaki et al., "Reproduction of roller painting operations by humanoid robot for observational learning," International Conference on Humanoid Robots, 2022.

### 3 建築空間における可視化技術

#### Visualization Technologies in Architectural Space

##### 3.1 空調設計や室レイアウトの最適化に資する気流・粒子の可視化技術

##### Visualization Technologies for Airflow and Particle Behavior that Contributes to the Optimization of Air Conditioning Design and Room Layout

谷 英明 Hideaki Tani\*6

昨今、CFD（Computer Fluid Dynamics、数値流体シミュレーション）は、解析技術の進歩と汎用性、操作性が高いソフトウェアの普及により、空調設計やその評価の場面において幅広く活用されている。しかしながら、人の動作や微細な形態を伴うシーンにおいては、解析モデルの作成や境界条件の設定に時間を要する場合や、実現象の再現精度を高めることが困難なことがある。そのような際に、気流や粒子の可視化技術を用い、モックアップ実験や現地実測を行うことが有効である。ここで述べる気流・粒子の可視化技術とは、気流や粒子を模したトレーサー物質と特殊な可視化用レーザー光源を用いることで、粒子の光散乱効果を利用し、通常は目視できない気流や粒子の動きを可視化する方法である。さらに、その様子をハイスピードカメラで撮影し、コンピュータ画像処理であるPIV（Particle Image Velocimetry：粒子画像流速測定法）解析を行うことで、気流や粒子挙動（ベクトル、速度等）の定量化が可能である。

そこで、以下3.1.1、3.1.2では、当社技術研究所に構築した可視化クリーンルームにおいて気流・粒子の可視化技術を活用した研究事例を紹介する。なお、本項では気流・粒子の可視化以外の結果紹介は割愛しているため、各研究の詳細については、各参考文献を参考されたい<sup>1),2)</sup>。

##### 3.1.1 空調気流による安全キャビネット内部への汚染リスク検証

微生物検査や細胞調製等の作業で使用される安全キャビネット（以下、BSC）は、内部で取り扱う微生物等が外部へ漏出することを防ぎ、かつ無菌操作を行うことができる設備である。BSCは、気流バランスを厳密に調整することでその性能が確保され、工場出荷検査法と現場検査法により検証方法が規定されている。しかしながら、BSC近傍でのヒト・モノの移動や空調気流等、BSCの気流バランスを乱すような外因性の気流が発生した場合、上記性能が維持できなくなることが懸念される。そこで、外部気流によるBSC内部への汚染物質の流入リスクについて、気流・粒子の可視化及びPIV解析により検証した。ここでは、“空調気流”に関する検証結果<sup>1)</sup>を紹介する。使用したPIV計測・解析システムの概要をTable 2に示す。

本実験では、FFU（Fan Filter Unit）とルーバーで構成した模擬吹出し装置によって空調気流を再現した。吹出し角度は30°に固定した上で、BSC前面開口部に向かう気流を発生し、作業者を想定したマネキン周囲の気流を評価した。実験レイアウトをFig. 13に示す。

実験の結果、模擬吹出し装置の停止時には内部に気流が侵入する様子は見られなかったが、BSCへ到達する気流速度を増加させると、徐々にBSC内部まで気流が侵入していく傾向が確認された。

一例として、FFU出力100%時における、PIV解析結果の代表画像をFig. 14に示す。作業者の後方から肩の付近に0.75~1.0m/s程度で気流が到達し、腕周囲の一部において、BSCの気流バランスが乱れる状況（BSC外部から内部に向かう気流）が確認された。すなわち、本実験と同様の空調気流がBSC周辺で発生しないような空調計画を行うことの重要性を示すことができた。

##### 3.1.2 診察時におけるエアロゾル感染対策効果に関する検証

診察等の医療行為の場面において、適切な感染防止策を図るために、患者が発する飛沫等の感染性物質の挙動を解明することは重要である。そこで、気流・粒子の可視化技術を用い、診察時における感染対策設備によるエアロゾル感染対策効果に関する実験的検証を行った。ここでは、感染対策設備としてプッシュプル型換気装置に関する検証結果<sup>2)</sup>を紹介する。なお、プッシュプル型換気装置とは、ファンとHEPAフィルタが一体となったパーティショ

Table 2 PIV計測に使用した機器と解析ソフト  
 Test equipment and software for PIV

カメラ	Phantom Miro 110 (Vision Research社製)
レーザー発生装置	PIV Laser G6000 (カトウ光研社製)
ミスト発生装置	PORTA SMOKE PS-2005 (ダイニチ工業社製)
ソフトウェア	Flow-Expert ver1.2.17

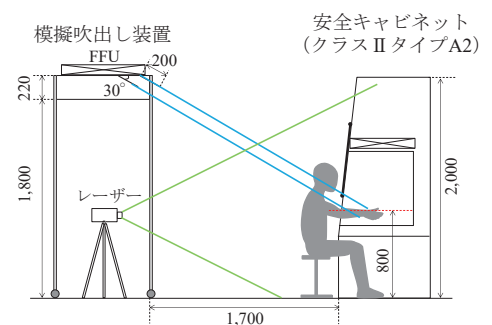


Fig. 13 実験レイアウト (1)  
 Experimental layout (1)

\*6 技術研究所 主任研究員 Chief Researcher, Research & Development Institute



ン型の装置であり、プッシュ（給気）ユニットとプル（排気）ユニットの対によって構成され、それらを正対して配置することで形成される一方向気流によって、各ユニット間に清浄域を提供するものである。

実験はクリーンルーム実験室内で実施した。プッシュユニットとプルユニットの間に、患者と医師を模したマネキンを配置し、患者の口元付近より呼気由来エアロゾルを模したミストを発生させた。各ユニットとマネキンの配置について、“直列配置（各ユニットとマネキンを同一直線上に配置）”と“斜め配置（各ユニットとマネキンの軸を斜めにずらして配置）”の2パターンで実験した。実験時のレイアウトをFig. 15に示す。各配置におけるエアロゾル拡散挙動について、レーザーで可視化を行った。なお、使用したミスト発生装置とレーザー発生装置はTable 2と同様である。

実験結果をFig. 16に示す。“直列配置”条件では、一方向気流の形成が人によって阻害されることで、医師と患者間の空間に空気の滞留域が生じ、患者から排出されたエアロゾルが医師に到達する状況が確認された。一方、“斜め配置”条件では、患者から排出されたエアロゾルは一方向気流によってプルユニット側で排除されたため、医師には到達しなかった。以上のことから、機器の配置によって感染対策の効果に大きな差が生ずることが確認された。

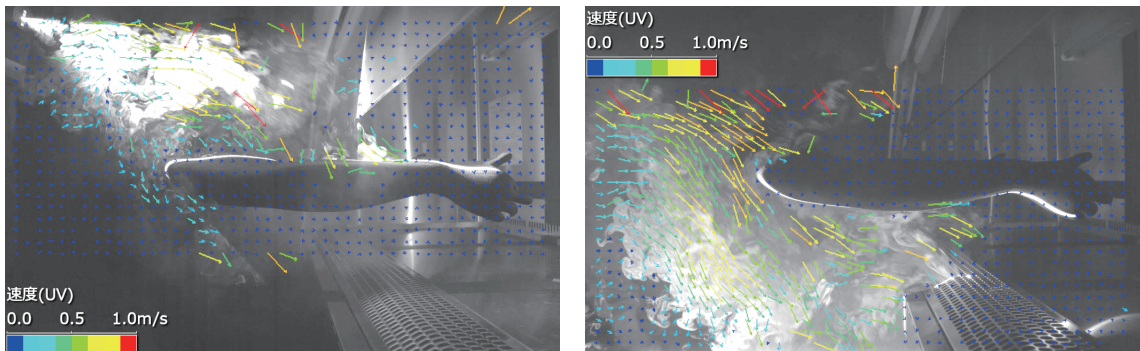


Fig. 14 BSC前面開口部における作業者の腕付近の気流解析結果  
 Velocity vector map by PIV analysis around the worker's arm at front opening of BSC

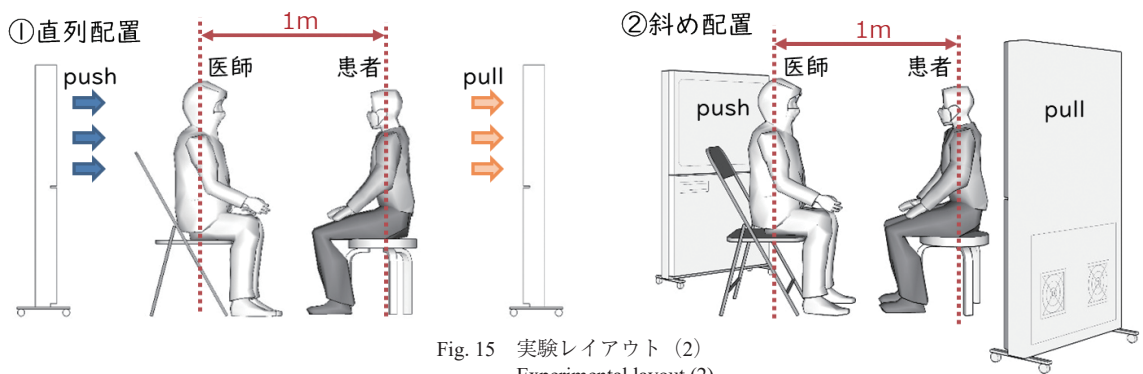


Fig. 15 実験レイアウト (2)  
 Experimental layout (2)

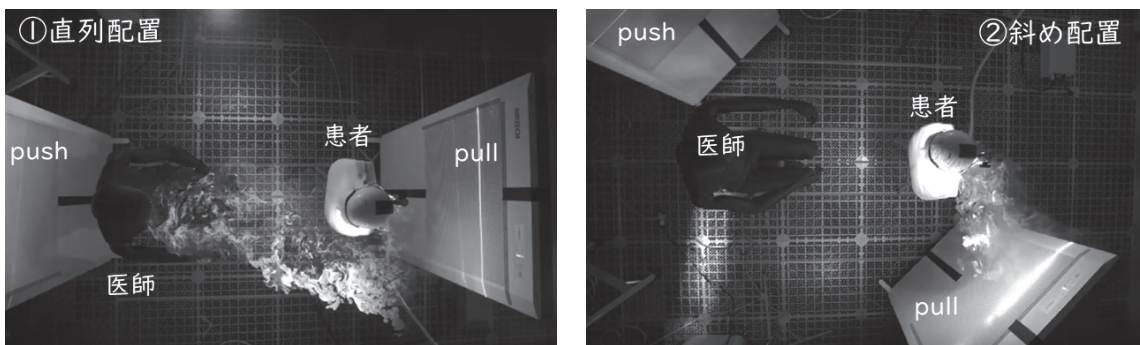


Fig. 16 各配置条件におけるエアロゾル拡散挙動に関する代表シーン  
 Representative scenes of aerosol diffusion behavior in each layout pattern

参考文献

- 1) 谷英明, 高橋幹雄, 天野健太郎, 千葉友樹:「バイオクリーン施設への安全キャビネットの適用に関する研究 (その2)」, 平成29年度空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.17-20, 2018年
- 2) 谷英明, 天野健太郎, 瀬戸洋子, 杉山訓樹, 篠原克明:「気流等による診察時の感染リスク低減対策に関する実験的検証」, 第38回日本環境感染学会総会・学術集会プログラム・抄録集, p.262, 2023年



### 3.2 オフィス空間における執務者の生体情報および位置情報の可視化技術「GISTA」

#### Visualization System of Locational and Biometric Information of Occupants in Office: “GISTA”

高橋 祐樹 Hiroki Takahashi\*7 徳村 朋子 Tomoko Tokumura\*8

建築分野における執務者の快適性や知的生産性に関する研究は、これまでに幅広く知見が蓄積されてきた。温熱、光、音、空気といった物理環境に加え、開放性や緑視率といった空間デザインの多様化が進み、それに対してアンケート調査等による心理的評価のみならず、心拍計や脳波計といった生理的評価も試みられている。一方で、近年の技術革新により、計測機器の小型化・高精度化が進み、ウェアラブルデバイスやビーコン等により人の生体情報や位置情報を比較的簡易に計測可能となってきた。そこで、近年デザインの多様性が増している建築計画をより高質化、最適化することを目指し、執務者の生体情報と位置情報を、デジタルデバイスを用いて大人数・長期間・軽負担で計測してオフィス空間の使われ方を可視化する技術「GISTA」<sup>1)</sup>を開発した。本技術により、建築空間の人に対する価値を、人の生理、滞在状況から可視化することが可能となった。本節では、その技術概要と適用事例について述べる。

#### 3.2.1 GISTAの技術概要

GISTAは、執務者の生体情報と位置情報を計測しリアルタイムに可視化する技術であり、計測したデータを結合し記録するシステム (Fig. 17: INPUTおよびPROCESSION) と、計測データを可視化するシステムから成る (Fig. 17: OUTPUT)。

Table 3に、各種計測システムの概要を示す。生体情報の計測には、リストバンド型心拍計を採用している。取得した心拍数および心拍1拍ごとの拍動の長さの変化を示す心拍変動から、集中度、ストレス度、トータルパワー（自律神経の活動強度を示し、疲労と共に低下する値として知られる）を、それぞれ算出する<sup>2)</sup>。位置情報の計測には、スマートフォンの各種センサにより電磁場を計測し、事前に測量した電磁場マップから位置を推定する、センサフュージョン型のインフラフリー測位システムを採用している。計測された生体情報と位置情報は、利用者IDや時刻などと合わせて、地理情報システム (GIS: Geographic Information System) 上でほぼリアルタイムにデータ結合し記録される。

結合されたデータは、スマートフォンやPC上でほぼリアルタイムに可視化される。執務者は、スマートフォンに導入された「GISTAアプリ」(Fig. 18)を使って、自身のリアルタイムの生体情報や計測期間中のオフィス利用場所と生体情報の履歴、オフィスのエリア毎の集中度マップ、エリア別の集中度ランキングなどを確認できる。自身の集中度等の一日の変動や、集中しやすい状況などの個人特性を把握できることから、自身の働き方やオフィス空間利用に対するセルフマネジメントへの活用による、執務者個人の知的生産性向上が期待される。施設管理者は、PC向けGISアプリケーションを使って、計測期間中における執務者（計測対象者）のオフィス空間の生体情報や位置情報の分布を確認できる。オフィス空間の各エリアの利用率や、集中しやすいエリアなどの空間特性を把握できることから、利用者の少ない空間の把握によるオフィス運用改善検討や、リニューアル前後の働き方改善効果の客観的評価等への活用による、オフィス空間の高質化、最適化が期待される。

#### 3.2.2 GISTAを用いたオフィス空間特性および執務者の働き方の可視化

本項では、オフィス執務者を対象とした実測結果から、オフィス空間特性と執務者の働き方を可視化した事例に

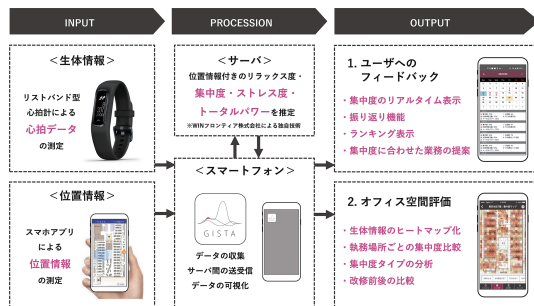


Fig. 17 「GISTA」のシステム概要  
System outline of “GISTA”

Table 3 各種計測システムの概要  
Outline of measurement systems

	計測項目	計測機器・システム	計測精度/周期
生体情報	心拍数、心拍変動	リストバンド型心拍計	200Hz (心電)
位置情報	緯度経度、階	スマートフォンアプリによるインフラフリー測位システム	5m程度/5秒(移動時)、10秒(静止時)



Fig. 18 「GISTAアプリ」の画面イメージ  
Sample screen shots of “GISTA app.”

\*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 首席研究員 Senior Chief Researcher, Research & Development Institute

ついて述べる。実測は、第三者機関（芝パレスクリニック倫理審査委員会）の倫理審査を受審し承認を得て実施した。

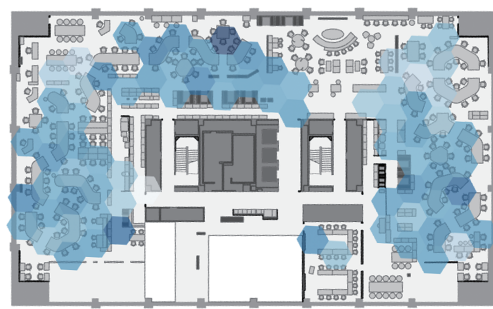
まず、オフィス空間特性の評価の例として、Fig. 19に、PC向けGISアプリケーションを用いて可視化した、オフィス内の集中度分布（対角線長さ4.5mの正六角形グリッドごとの平均値）を示す。アプリケーション上では、平均的なオフィス空間特性の把握を目的とした指定時間帯の集中度の平均値や、オフィスの利用状況の時系列推移をアニメーションとして表示できる。Fig. 20に、エリア別に集計した集中度（Z-scoreにて標準化）の時系列変化を示す。主にPCを利用した個人執務の場所である「執務エリア」のデータを見ると、集中度には、午前10時ごろやや高まり、12～13時ごろに一度低下し、16～17時ごろに最も高くなるという、日変動があることがわかる。エリア別に見ると、「（オープンな）打合せエリア」は「執務エリア」とほぼ同じ集中度であるのに対し、「（仕切られた）会議室エリア」では集中度が高まりやすい10時、16～17時により高い集中度が出現することがわかる。一方で「リフレッシュエリア」では、多くの時刻で集中度が平均（=0）以下である。以上から、このオフィスでは設計者が意図したエリア設定に沿ったオフィス空間利用がされていると推察される。

次に、執務者の働き方評価の例として、Fig. 21に、部署別のエリア滞在時間割合を示す。同じ技術系の部門であっても、部門Dは「執務エリア」での執務時間が長く、部門Aは「打合せ・会議室エリア」での執務時間が長いことから、部門Aは会議・打合せ時間が長く、個人執務時間が不足している可能性が考えられる。この場合、部門Aに対して働き方等についてより詳しく調査することで、課題があれば、働き方の見直し提案と共に、充実した会議・打合せスペースに近接した部署配置の提案などを実施できる。Fig. 22に、固定席オフィスからABW（Activity Based Working）オフィスに移転した際の、比較例として、1日のエリア移動回数の比較を示す。筆者らの研究<sup>3)</sup>で、オフィスの空間活用範囲が広い執務者ほどワーク・エンゲイジメントが高いという結果もあるが、移転により執務者がオフィス空間をより広範に活用できている様子进行评估できた事例であるといえる。

以上のように、GISTAにより、アンケート調査のみでは把握が難しい時系列的かつ客観的な生理データ、滞在状況から、オフィス空間特性や働き方の可視化が行えるようになった。今後は、本技術の適用により、多様化が進むオフィス空間を客観的なエビデンスに基づき高質化、最適化していきたい。

参考文献

- 1) 高橋祐樹, 伊勢田元, 常岡優吾, 丘本道彦, 徳村朋子, 濱中南咲, 伊藤翔, 後藤聡:「執務者の位置情報と生体情報を用いたリアルタイム空間評価システムの開発とオフィス空間特性および執務者の働き方評価」, 日本建築学会大会学術講演集, pp.1667-1670, 2023年9月
- 2) 駒澤真人, 板生研一, 菅谷みどり:「心拍変動を活用した集中状態の評価検討」, 信学技報, vol.119, no.44, MBE2019-14, pp.73-76, 2019年5月
- 3) 篠原尚生, 田辺新一, 高橋幹雄, 和田一樹, 高橋祐樹, 徳村朋子, 伊藤彰悟, 竹田雄紀, 稲山智也:「人的資本向上を目指した働き方実現のための次世代ワークプレイス環境に関する研究 その4」, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2024年9月



集中度 50% 80%

Fig. 19 集中度分布のヒートマップ  
Heat map of concentration level

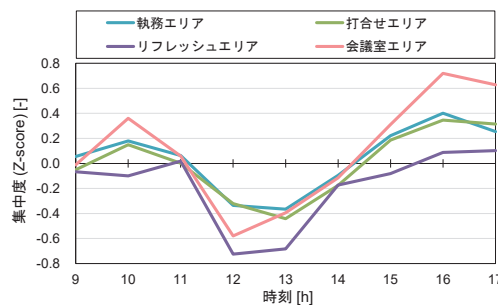


Fig. 20 オフィス内エリア別の集中度の時系列変化  
Time-course changes in concentration level

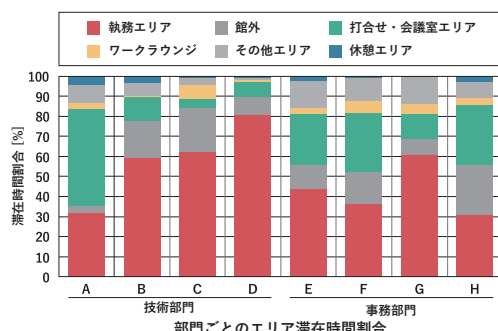


Fig. 21 部署別のエリア滞在時間割合  
Time spent ratio in office area

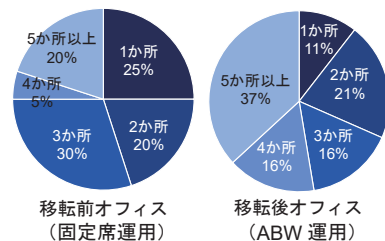


Fig. 22 1日のエリア移動回数  
Number of changing times of work area in a day

### 3.3 地震時の揺れの可視化「TAFT」

#### Visualization of Shaking during Earthquakes: “TAFT”

米田 春美 Harumi Yoneda\*9

2011年東日本大震災では広範囲に亘って強い揺れが発生し、首都圏でも最大震度6強を観測した。首都圏の建物においては、構造被害は概ね軽微であり、建築構造の専門家は構造体の安全性については問題ないと判断した。一方、天井の落下をはじめとする非構造部材の損傷、家具・什器の転倒・大移動、高層建物における長時間の揺れに対する恐怖感などにより、社会一般の人々は建物内を不安だと感じた。このように、専門家の考える建物の耐震「安全性」と一般の人々の望む地震時の建物の「安心感」に大きな乖離があることが改めて浮き彫りとなった。この状況を改善するため、家具挙動の動画により地震時の揺れを可視化するツール「呼称：TAFT (TAKENAKA Furniture Teller)」を開発した。本節では地震時の室内状況をイメージで共有することにより、耐震性能の違いをより実感でき、合意形成の迅速化につながった可視化技術の事例について紹介する。

#### 3.3.1 背景

建築主と構造設計者が建物の耐震性能について相互理解を図り、合意を得るために、Fig. 23に示すような耐震性能グレードの概念図を用いることがある。このような図に加えて、設計者は建物モデルの地震応答解析による応答加速度や層間変形角などの専門的な指標を用い、過去の被害事例の写真や振動台実験の映像を示す等で、建築主に建物の耐震性能を説明してきた。しかし、これらの説明は実感に結び付き辛いものであり、建築主が地震時の建物内部の状況を具体的に把握するのは困難であった。

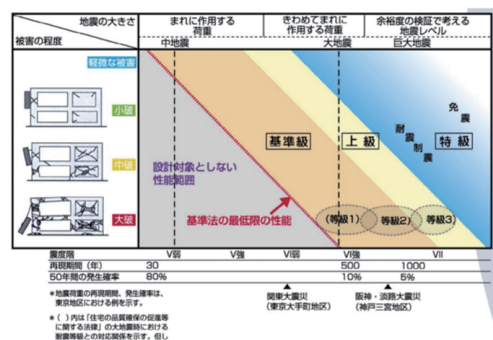
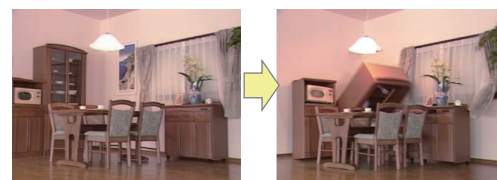


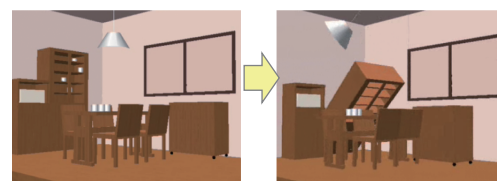
Fig. 23 建物の耐震性能グレード概念図<sup>1)</sup>  
 Conceptual diagram of building seismic performance grades

#### 3.3.2 TAFTの概要

TAFTは家具挙動の物理シミュレーションで地震の揺れを可視化するツールである。ゲーム等で摩擦、衝突等の物理法則の再現に用いられるオープンソースの物理エンジンODE (Open Dynamics Engine) を用い、過去に実施した居室の振動台実験を参考に、家具類の形状、重量、重心位置、摩擦係数や反発係数などの物性値を設定した。実験結果と比較することでシミュレーション精度を検証し、家具転倒のタイミング等が概ね再現された (Fig. 24)。応答加速度や層間変形角等の数値を用いずに、一般の人々とよりわかりやすくイメージを共有できるようになった。任意の地震波でシミュレーション可能であり、例えば設計中の建物について、耐震、制振、免震といった構造形式の違いによる地震時の室内状況の比較をPC上で確認し、建築主に示すことも可能である。同様のことを、振動台施設等で行うことと比較して、労力や費用面などのメリットは大きい。さらに、専門知識が無くても建物や地震の条件を入力・選択する簡単な操作で、動画を作成可能なwebアプリを2014年に開発し、一般にも公開した。耐震性能による室内の揺れ方の違いが一目瞭然で理解でき、国内外の大学での免震建物の講義にも利用されてきた。



(a) 振動台実験

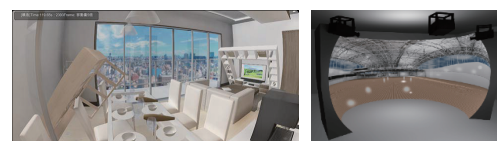


(b) シミュレーション (2014年版)

Fig. 24 実験とシミュレーションの比較  
 Comparison of experiments and simulations

#### 3.3.3 VR技術の適用および地震体験システム

近年、VR (Virtual Reality; 仮想現実) 映像技術が飛躍的に向上し、現業での3DCG活用が進み、合意形成においても臨場感の高い体験型のプレゼンテーションの要望が増えてきている。それに対応すべく、TAFTの開発環境を、物理計算や高画質なVR可視化が一体となったゲーム開発プラットフォームUnityに変更した。Unityの導入により、BIMモデルから自由な家具形状の取り込み、



(a) VRアニメーション (b) ドーム型シミュレーター

Fig. 25 VR映像地震体感システム  
 VR Video earthquake experience system

\*9 技術研究所 主任研究員 博士(工学) Chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.



VR空間内の自由な視点移動を実現した (Fig. 25(a))。このVR映像をvisiMax<sup>2)</sup> (ドーム型シミュレータ) やHMD (Head Mounted Display) に出力することで、耐震性能による揺れの違いをより実感できるプレゼンテーションが可能となった (Fig. 25(b))。また、Unityに搭載されている物理エンジンPhysXを使い、VR空間内で設定した条件でリアルタイムシミュレーション (計算と可視化を同時に実施) を可能とした。PhysXとODEでは摩擦係数や反発係数の設定方法が異なり、また商業エンジンであるPhysXでは詳細が公開されていない部分もある。そこでPhysXとODEで同様のモデル化を行って比較検証し、転倒状況が同程度であることを確認している。

Unityはデバイスとの連携も容易であり、地震の揺れの体感をさらに向上させるため、VR映像とそれに連動して振動するデバイスとを組み合わせた振動体感システムを2種類、開発した (Photo 6)。

より手軽に本システムを利用できるよう、webGLを適用し、VR版のTAFT webアプリを開発した (Fig. 26)。通常VR空間の再現にはGPUを搭載したPCが用いられるが、オフィス用ノートPC上でもwebアプリとして利用可能となった。さらに、オフラインでも利用可能なインハウスのiPadアプリ化も容易で、より動作が速いデモを可能とした。これらのアプリの室内はオフィス、マンション、手術室の3種類から選択可能であり、同時に3つまで一覧して比較して表示できる。

これらの可視化技術 (Table 4) により、地震時の揺れや被害状況に関する理解や合意形成が迅速に可能となった。

Table 4 従来の可視化方法およびTAFTの変遷  
Conventional visualization technologies and the evolution of TAFT

開発時期	従来	2014年	2015年	2017年	2019年	2021年
可視化方法	耐震性能グレード概念図	物理シミュレーション (ODE)	VR映像化 (Unity)	VRリアルタイムシミュレーション (Unity)	VR映像 + 振動体感システム (Unity)	webGLを用いたアプリ化 (Unity)
技術概要	専門用語を用いた概念図	CG動画による可視化	高画質化により没入感を強化	VR空間内で設定した状況を再現	地震の揺れの体感をより向上	ノートPC上でVR地震体験

### 3.3.4 適用事例

医薬系研究施設において、建築主への免震性能の説明に適用した事例を示す。設計段階において、施工後の室内環境をモデル化し、シミュレーションを行った。非免震では機器転倒が生じたのに対し、免震では機器転倒が低減され、その効果を確認することができた (Fig. 27)。さらに、大地震時と比較して、中小地震時は顕著には免震効果が実感できないことも事前に了承を得て、合意形成に至った。

TAFTは免震や制振技術の適用効果の提示で特に有効な手段として、開発したwebアプリおよびiPadアプリは当社の構造設計者を中心に提案資料および設計の初期段階における建築主との打合せの場で活用されている。TAFT webアプリは下記のサイトで公開しており、誰でも無料で利用可能である。

TAFT webアプリ : <https://www.taft.takenaka.co.jp/taft>

VR映像による地震体感および振動デバイスと組み合わせた振動体感は、技術研究所の見学コースに常設展示されている。建物の耐震性能に関する社会への啓発活動として、様々な展示会や防災イベントでも実施してきた (Photo 7)。建築主との迅速な合意形成だけでなく、防災教育としても有効な手段となっている<sup>3)</sup>。

#### 参考文献

- 1) 一般社団法人日本建築構造技術者協会：JSCA性能メニュー 2007年
- 2) 鶴巻均, 井川憲男, 大石潤, 矢野雅, 望月菜穂子：「デジタルプレゼンテーションシステムの開発」, 竹中技術研究報告 No.60, 2004年
- 3) 米田春美, 浜辺千佐子, 北野信吾, 大石潤, 池田周英, 濱口弘樹, 吉澤睦博, 山本雅史：「地震ゆれ体感システムによる顧客との合意形成手法の開発」, アーバンインフラテクノロジー推進会議 第35回技術研究発表会, 2023年12月



Photo 6 VR振動体感システム  
VR Vibration experience system

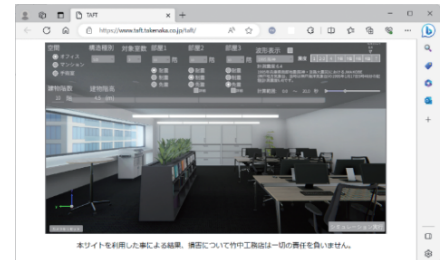


Fig. 26 VR版TAFT webアプリ (2021年版)  
TAFT web application for VR (ver.2021)

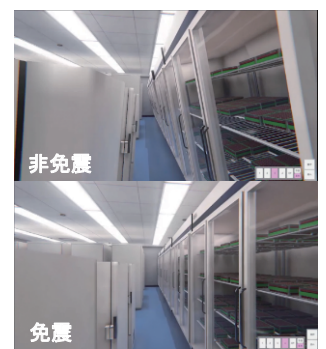


Fig. 27 免震性能提示の適用例  
(上：非免震, 下：免震)  
Application example of seismic isolation performance presentation



Photo 7 体験イベント  
Experience event

## 4 おわりに Conclusion

櫛部 淳道 Atsumichi Kushibe\*1

建築分野において、企画・設計・施工・品質・安全・維持管理にいたるまで多種多様な可視化技術が取り入れられている。本特集では、「現象を理解するための可視化技術」として、「建築構造物の性能・品質に関する可視化技術」および「建築空間における可視化技術」に関してその目的と技術的な解説を加えた6つの事例を紹介した。

共通認識や意思決定が容易になるだけでなく、データの背後にある深い情報やパターンを読み解くことで将来予測、仮説の立案や深い洞察を可能とする可視化技術は、今後ますます高度化するであろう。例をあげると、生成AIによるトレンド予測精度向上や、通信速度の高速化・データ処理能力の向上などを背景としたIoT技術のさらなる普及によるリアルタイム化、拡張現実（AR）と仮想現実（VR）を用いた没入体験による知識・技術の習得、遠隔協業のための可視化などである。さらに、量子コンピューティングの普及等による複雑な事象の可視化や科学的発見の加速、視覚に加え触覚や聴覚を活用したデータ表現である多感覚可視化など、高度で多様な可視化技術が今後ますます普及していくことに疑いの余地はない。しかしながら同時に、事実を正しく解釈し正確なニュアンスを伝えられる可視化であるために、AI活用の際のデータの質やアルゴリズムの透明性、生体情報など個人データへのプライバシー配慮など可視化の際の倫理的な配慮も忘れてはならない。本特集が可視化技術に関する理解の一助になれば幸いである。

---

\*1 技術研究所 環境・社会研究部長 博士(工学) General Manager, Environmental & Social Research Department, Research & Development Institute, Dr. Eng.