

# 特集「可視化技術」

解説

可視化技術

Visualization Technology of Construction Field

畑 浩二 Koji Hata

## 1. はじめに

「良く、安く、速い」は、大林組創業以来の歴史の中で受け継がれてきた精神「三箴（さんしん）」である。最良の建造物を創り出すために、安く（＝安く）、速いを必要不可欠な条件とし、生産性向上へと繋げていくことになる。生産性向上とは、組織が保有する技術や知識を活用し、可能な限り小さな投資で最大の成果を生み出すことを目標とする。類似の表現に業務効率があるが、こちらは従来業務の低コスト化や、時間短縮に注力することを意味する。したがって、上述した三箴は、生産性向上を目指す決意の言葉と解釈できる。

総務省の平成30年版情報通信白書<sup>1)</sup>によれば、2008年の1.28億人をピークに、我が国の総人口は減少に転じ2053年には1億人を下回ると予想されている。また、15歳から64歳の生産年齢人口は、現在の約60%から52%まで下がると予想されており、生産性向上は企業存続のみならず、我が国の死活問題にまで影響すると示されている。ひるがえって、建設業界を俯瞰すると既に高齢化や人材不足は顕在化しており、生産性向上は待った無しの状況にあると言える。

生産性を向上させるために企業が行うべき施策は種々ある。例えば、最新機材の活用、人材育成や最適配置、業務内容の正確な把握などである。とりわけ、生産現場では、業務内容を効率良く短時間で把握することで意思決定の迅速化が見込める。そのためには、発注者と受注者間でPDCAサイクルを共有化し、さらには業務内容や成果を可視化することが最も有効な手段と考えられる。昨今、「見える化」という表現が多用されているが、派生的に生じた造語であるため、本解説では「可視化」で統一し、論を進める。

可視化とは、人間が直接「見る」ことのできない現象・事象・関連性を見ることが出来る形に変換する事である。見えないもの、見えなかったものを見えるようにするほか、1次元から2次元、2次元から3次元さらには時間軸を加味した4次元のような高次元へ拡張した工夫も範疇に入る。その結果、関係者間で現象・事象・関連性の共有化が進み、意思決定が迅速になる効果を生む。例えば、航空機やスポーツカーにおける翼やボデー周辺における空気の流れがわかれば、空気抵抗を極力抑えた形状が提案でき、引いては使用燃料の削減に役立つかもしれない。従来、この種の可視化技術は風洞実験で培われてきたが、近年ではコンピュータの飛躍的な進歩に伴い数値解析が取って代わろうとしている。そこで、今回の技術研究所報の特集では生産性向上に深く関わる「可視化技術」を取り上げる。2章では、ICT（Information and Communication Technology）やAI（Artificial Intelligence）の利用が可視化に如何に繋がっているのか、また如何に発展するのかを概説する。3章では、建設業に焦点を当て可視化の取組み状況を俯瞰する。4章では、特集号論文、特集号報告および特集号技術紹介で示した大林組の最新技術に加え、保有する技術も加味して可視化技術を総括する。

## 2. IoT, AI時代における可視化技術の展開

内閣府は第5期科学技術基本計画<sup>2)</sup>の中で、未来社会のコンセプトとしてFig.1に示すSociety 5.0（超スマート社会）を提唱している。人間社会の基盤は、狩猟に始まり、農耕、工業そして情報に推移しており、それぞれSociety 1.0からSociety 4.0を割付けている。現行の情報社会であるSociety 4.0でも、デジタル化やICT化が進んでいるが、知識や情報が共有されず分野横断的な連携が十分ではないと考えられている。そこで、次世代のSociety 5.0では、IoT（Internet of Things）で全ての人とモノを繋げることで知識や情報が共有され、新たな価値の創造に寄与したり、AIにより今まで人間が考えつかなかった解決方法が導き出されることが期待される。そのためには、現実空間（以下、フィ

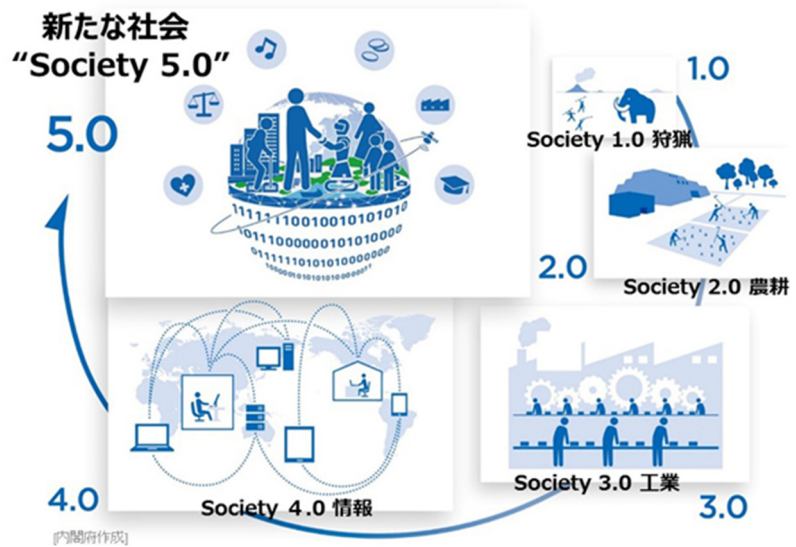


Fig.1 Society5.0<sup>2)</sup>

Future Society Concept

ジカル空間)と仮想空間(以下、サイバー空間)の融合が必要不可欠とされている。Fig.2に示すように、Society4.0でもフィジカル空間とサイバー空間の融合に着目し、SF映像では既に仮想現実(以下VR:Virtual Reality)が違和感なく使用されている。また、現実風景にデジタル情報を重ねる拡張現実(以下AR:Augmented Reality)や、逆に仮想風景に現実情報を重ねる複合現実(以下、MR:Mixed Reality)も展開されてきた。しかし、多くの場合、利用者がフィジカル空間に蓄積される膨大なデータに自らアクセスし、分析・整理するのが普通である。一方、Society5.0では全てのデータがフィジカル空間からサイバー空間に集約され、AIによる分析や解析を想定している。フィジカル空間での実データは、ますます増大する傾向にあり、これらを人間が分析・分類するには既に限界にきている。そこで、人間の処理能力を超えたビックデータに関しては、AIを活用するというシナリオが考えられている。Society4.0からSociety5.0への推移の中で、最大の要点は、人間による分析からAIによる分析への変革とも言える。

一方、世界に目を向けると、ドイツのIndustrie4.0<sup>3)</sup>を筆頭に、イギリスのHigh Value Manufacturing<sup>4)</sup>、中国の中国製造2025<sup>5)</sup>、アメリカのSmart America Challenge<sup>6)</sup>などがスマート社会構想を謳っている。いずれも、フィジカル空間とサイバー空間の融合を示唆し、IoTやAIをベースにした取組みが加速される勢いにある。このような現状を踏まえると、単なる図表やテキストデータで現象を解説し、情報の共有化を図る技術はもはや過去のものになりつつあると言っても差し支えない。VRからARへ、そして革新的な画像処理やAIへと、分析結果をより高度でかつリアリティーに富む可視化へと繋げることが、今後の技術展開の核になると考えられる。

### 3. 建設業における可視化の取組み

経済財政白書<sup>7)</sup>では、景気回復期間は戦後最長に迫りGDPが大きく増加している反面、経済の基礎体力や潜在成長率の伸びが十分追いついていないと指摘している。そのためには、企業の労働生産性を高め、人手不足に対応する賃上げの動きをさらに加速させかつ継続することの重要性を説いている。同様に、情報通信白書<sup>8)</sup>では、具体的に15歳から64歳の生産年齢人口が、現在の約60%から52%まで下がると予想し、人手不足に拍車がかかることを示唆している。いずれにしても、我が国の発展は人手不足解消にかかっていると断言しても過言ではない。

人手不足の実態と労働生産性の水準を見ると、人手不足感が高い業界では労働生産性の水準が低い傾向にあると考えられる。高齢化が進む中、若い人手の確保がままならない状況にあり、労働生産性の向上が問題解決の糸口になるのは必然

である。とりわけ、建設業界での就労年齢を俯瞰すると、高齢化は著しく進行し、人材不足は顕在化している。どの職種を見ても、人手不足が顕著であり、要員確保のため単価アップとのいたちごっこである。このような観点から、人手不足問題を改善し労働生産性を向上させるためには、Society5.0で提示するIoTやAIの新たな技術領域に関する経験や知識を獲得し、システム開発を通しての実用化展開が切り札になると言える。つまり、他産業以上に、建設業ではフィジカル空間とサイバー空間の融合を強力に推し進めることが重要と考えられる。

2016年10月12日、国土交通省が有識者による建設産業政策会議を開催し、日建連(日本建設業連合会)、全建(全日本建設技術協会)、全中建(全国中小建設業協会)、建専連(建設産業専門団体連合会)、日空衛(日本空調衛生工事業協会)および住団連(住宅生産団体連合会)から「10年後を見据えた建設業のあり方<sup>9)</sup>」について答申された。その中で、10年後の建設業における克服すべき課題、施工体制のあるべき姿および大きな技術変化に関して、ICT技術の活用、ロボットの実用化促進、AI処理による全体最適化などが提示されている。根幹は、上述したSociety5.0に繋がるものであり、最新のIoTやAIを積極的に活用し、企業経営変革や働き方改革を推進しようとする動き、すなわちi-Constructionの推進が垣間見える。行き着く先は、生産性向上であり、安全安心、工期短縮、工費削減にも繋がることを意味する。種々の技術開発が推進されているが、分析・解析した結果を発注者に理解してもらわなければ価値は高まらない。可視化は、その最たる工夫である。超高層ビルにおける地震や風による挙動を3次元的かつ時系列で表現することで、構造、使用材料、施工法の最適化が進んでいる。BIM/CIM(Building Information Modeling/Construction Information Modeling & Management)では、構造系に意匠系、さらには地盤系を含めたトータルでの可視化の方向性が見て取れる。コンクリートを初めとする材料系では、外力に対するひずみやき裂の発現や進展を明らかにするため、高度な画像処理技術の活用が進んでいる。建物の外空間ではビル風、内空間では火災時の熱の流れなど、感じることはできるが目に見えない現象を視覚化する工夫を施している。一方、基礎や地盤系では、地中の中身をもともと目に見ることができない。そのため、弾性波や音響などの技術によって視覚化する取組みも行っている。

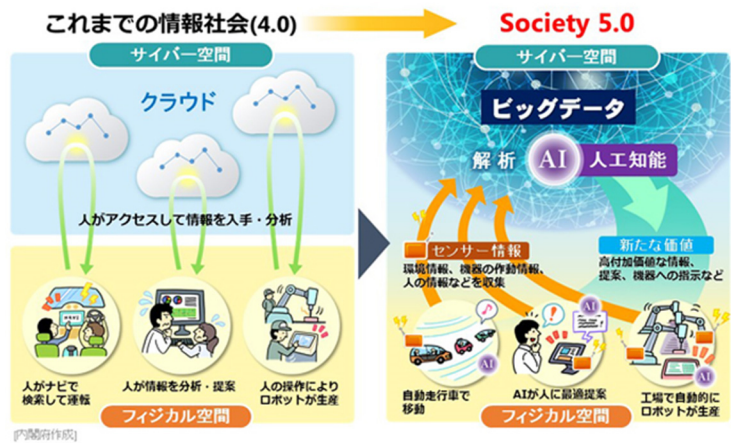


Fig.2 フィジカル空間とサイバー空間の融合<sup>2)</sup>  
Fusion of Physical Space and Cyber Space

#### 4. 大林組の可視化技術

Society5.0 が提唱される以前から、大林組は ICT を積極的に活用し、生産性向上を目指した技術開発を推進してきた。多くの先駆的な研究や開発で得られた経験や知識が、Fig.3 に示す大林組の主な開発技術<sup>9)</sup>に繋がっている。これら開発技術は Society5.0 と関連させ、11 分野から構成される。これら全ての分野において、可視化は重要な役割を演じる。例えば、「スマート生産システム」における植物工場では、工場内の温湿度変化に伴う気流解析によって植物育成の制御を可能にしている。また、「効率的で効果的なインフラ維持管理・更新の実現」では、測量等で得られる多数の点群情報を如何に効率よく 3 次元描画し発注者との情報共有を促進させることに注力している。これら技術を開発するに際して、AI 画像解析<sup>(例えば 10,11)</sup>、BIM の発展形である SCIM (Smart City Information Modeling)<sup>12)</sup>および建物に関するあらゆる情報を集約したプラットフォーム BIMWill<sup>®13)</sup>を基盤技術として推進する。これらの技術分野を踏まえ、今回の研究所報では特集号論文 14 編、特集号報告 1 編と特集号技術紹介 4 編 (Table 1 参照) を掲載した。表中、各技術の目的、使用されるシーン、手法によって分類した。

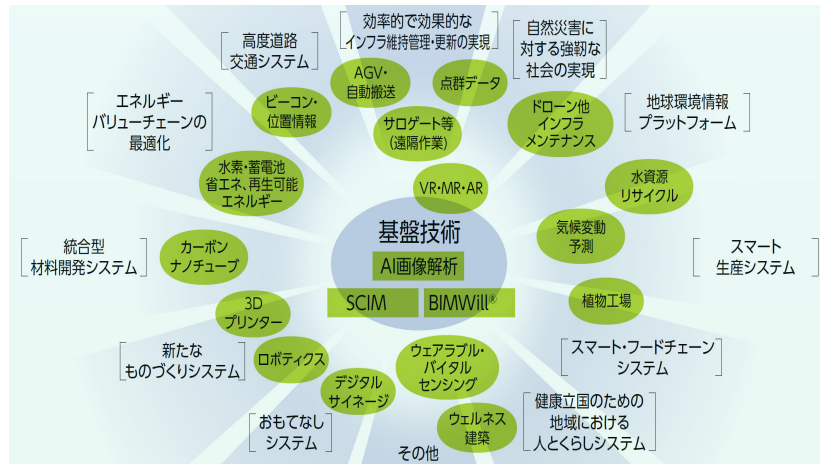


Fig.3 大林組の主要な開発技術<sup>9)</sup>  
Major Development Technologies

率よく 3 次元描画し発注者との情報共有を促進させることに注力している。これら技術を開発するに際して、AI 画像解析<sup>(例えば 10,11)</sup>、BIM の発展形である SCIM (Smart City Information Modeling)<sup>12)</sup>および建物に関するあらゆる情報を集約したプラットフォーム BIMWill<sup>®13)</sup>を基盤技術として推進する。これらの技術分野を踏まえ、今回の研究所報では特集号論文 14 編、特集号報告 1 編と特集号技術紹介 4 編 (Table 1 参照) を掲載した。表中、各技術の目的、使用されるシーン、手法によって分類した。

- ・分類Ⅰ (目的) : 工費削減, 工期短縮, 品質保証, 安心・安全, 技術提案
- ・分類Ⅱ (シーン) : 計画, 調査, 設計, 施工, 計測, 維持管理, 研究段階
- ・分類Ⅲ (手法) : FEM, 粒子法, CAD, BIM/CIM, ロボット, AI, クラウド, センサ, 画像処理

Table 1 特集号論文, 特集号報告, 特集号技術紹介一覧  
List of Featured Papers, Featured Report and Featured Technology Introductions

No.	タイトル	分類Ⅰ 【目的】	分類Ⅱ 【シーン】	分類Ⅲ 【手法】		
特集号論文						
1	材料境界部の物理的・化学的観察法の開発と模擬処分場供試体境界への応用	技術提案	研究段階	画像処理		
2	コンクリート構造物のひび割れ幅計測法の開発	品質保証	研究段階	画像処理		
3	外壁検査システム「ウォールチェッカー <sup>®</sup> 」の開発	安心・安全	維持管理	ロボット		
4	画像計測及び非線形FEMによるRC構造物のひび割れ性状評価	品質保証	計画	FEM	画像処理	
5	安定液の自動測定技術の開発	工費削減	計測	センサ		
6	化学イメージングセンサを用いたベントナイト間隙水のpH測定手法の開発	品質保証	計測	センサ		
7	数値解析によるダウンバーストの流れ場の再現と数式モデルの構築	技術提案	設計	画像処理		
8	矩形プールを対象としたスロッシング発生時の挙動評価技術	技術提案	設計	センサ		
9	超高層建物を対象とした風揺れ居住性評価用風速に関する研究	技術提案	設計	センサ		
10	ゾーンモデルを用いた大規模群集避難性状の予測	安心・安全	設計	画像処理		
11	新型ボアホールレーダによる場所打ち杭の出来形の可視化	品質保証	計測	センサ	画像処理	
12	既製コンクリート杭の支持層到達確認技術の開発	品質保証	計測	センサ	AI	
13	自走式孔内観察ロボットによる水平ボーリング孔内の可視化	工期短縮	設計	ロボット	画像処理	センサ
14	トンネル切羽前方探査による地山等級の三次元可視化	工期短縮	設計	BIM/CIM		
特集号報告						
1	三次元地層推定手法による地盤構造の可視化	工費削減	計画	BIM/CIM		
特集号技術紹介						
1	AIによる免震基礎コンクリートの空隙自動検出手法	品質保証	研究段階	AI		
2	地震後の建物安全性判定支援システム「ポケレボ <sup>TM</sup> 」	安心・安全	計測	センサ	クラウド	
3	室内音響設計・騒音対策検討の可視化・可聴化技術	品質保証	設計	画像処理		
4	深層学習によるトンネル切羽評価	品質保証	施工	AI	クラウド	画像処理

大林組技術研究所では、大別して5つの研究分野がある。生産技術系ではコンクリートなどの材料・施工全般を、構造技術系ではコンクリート構造・鋼構造、耐震・振動制御全般を、自然環境技術系では緑化、バイオ、土壌浄化と廃棄物全般を、都市環境技術系では音響、電磁、風、屋内環境、人流制御全般を、そして地盤技術系では地盤・岩盤、地震動、建物基礎全般の研究開発を担っている。それぞれの研究分野において、生産性向上に関わる目的、使用されるシーンおよび手法は様々である。Table 1 に加え種々な技術開発を行っていることから、可視化に係る革新的技術を以下概説する。



#### 4.1 生産技術系における課題と可視化技術

生産技術系において、計画や施工段階で発注者や設計との合意形成を効率よく行うことが重要である。また、生産現場では機械と作業員との接触事故防止の観点から、安全安心に寄与する技術開発に注力している。大林組の保有技術を Table 2 に示す。

Table 2 生産技術分野における可視化技術  
Visualization Technology to Resolve Construction Problems

技術名称	概要
拡張現実ツール「FutureShot」 <sup>14)</sup>	タブレット端末の映像にサイズや表面素材の変更が可能な BIM モデルを配置し、現地の映像に重ね合わせて表示する AR 技術
自動品質検査システム <sup>15)</sup>	検査者が装着するステレオカメラの映像から施工管理者の位置・方向角情報を推定し、タブレット端末に BIM モデルを重ね合わせて表示する MR 技術
AI を用いた工事進捗管理システム <sup>16)</sup>	AI を用いて、工事写真から認識した工程情報をもとに現場全体の工事進捗状況をタブレット端末により共有することができる技術
作業員接触防止システム「クアトロアイズ <sup>TM</sup> 」 <sup>17)</sup>	重機に取り付けた複数のカメラで撮影した画像から AI を用いて重機周辺への作業員の立ち入りを検知し警報を出す技術

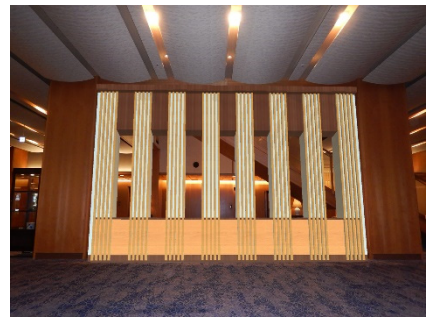
4.1.1 拡張現実ツール「FutureShot」 リニューアル工事において、新設部材の取まりや見栄えを発注者や設計者と確認する場合や、仮設物の種類や設置位置を専門工事会社と確認する場合など、現地でのイメージ (Photo 1 参照) を両者で共有することで円滑な合意形成に役立つことができる。



(a) BIM モデル表示



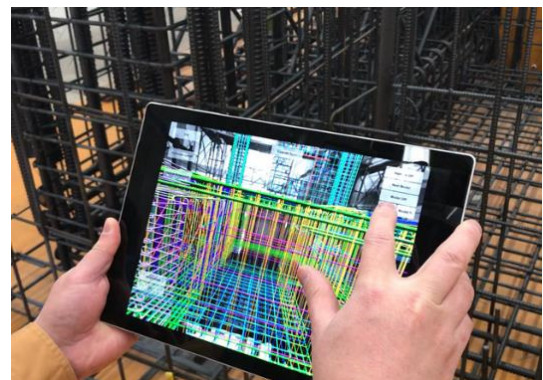
(b) 改修前の状況 (映像)



(c) 改修後の状況 (映像+BIM モデル)

Photo 1 タブレット端末を利用した拡張現実ツール「FutureShot」  
"FutureShot" - An Augmented Reality Tool Using a Tablet Device

4.1.2 自動品質検査システム 現場監督の目の役割を担える技術をコンセプトに開発されたシステム (Photo 2, Photo 3 参照) である。検査者が装着するステレオカメラの映像と IMU (慣性計測装置) の方向角の情報から現場内における位置情報を Visual SLAM (カメラ映像による自己位置推定技術) で計算し、この位置・方向角情報をもとにタブレット端末上に BIM モデルを重ね合わせて表示する MR 技術である。配筋検査では、検査者の位置・方向角情報から検査対象の鉄筋が自動的に絞り込まれ、その名称が表示される。検査者は検査対象を確認してから検査を開始できる。検査では、ステレオカメラで配筋の点群データを取得すると、本数・径・ピッチ等が自動的に計測できる。取得した配筋の点群データは、BIM モデルと重ね合わせて表示し、配筋が正しく組まれているかを確認できる。

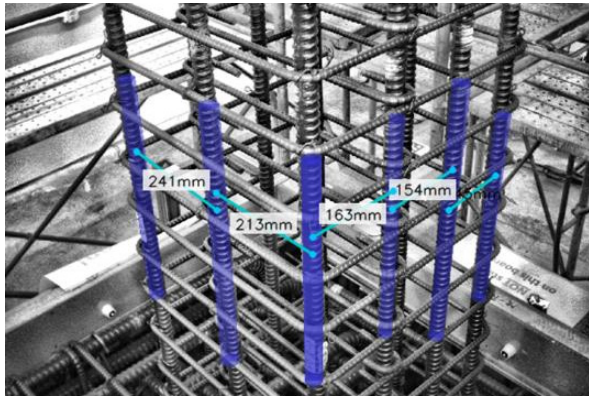


タブレット端末で BIM モデルと配筋の重なりを確認

Photo 2 自動品質検査システム  
Automatic Rebar Inspection System

4.1.3 AI を用いた工事進捗管理システム 集合住宅の内装仕上げ工事に用いられる約 50 種類の内装資材を認識することができ、そこに写る資材の使用状況から内装仕上げ工事の進捗状況を全 11 段階で推定することができる (Photo 4 参照)。工事写真に写っている資材を AI により認識し、この資材の割合をもとに仕上げ工事の進捗状況を推定する。現在は、集合住宅の内装仕上げ工事に用いられる約 50 種類の内装資材を認識し、内装仕上げ工事の進捗状況を全 11 段階 (断熱施工完了・LGS 施工完了等) で推定し可視化することができる。

4.1.4 作業員接触防止システム「クアトロアイズ」 重機と作業員の接触災害の防止を目的としたシステム (Photo5 参照) である。クアトロアイズに搭載された複数のカメラで撮影した映像から、重機周辺の作業員と重機までの距離を認識する。これにより重機等に近づいた作業員とオペレータに警報を発報したり、重機を自動停止させたりすることができる。また、電柱などを作業員として誤認識することなく、屈んだ姿勢や大きな資材を運んでいる作業員の検知も可能である。



(a) BIM モデルと配筋の重なりを確認

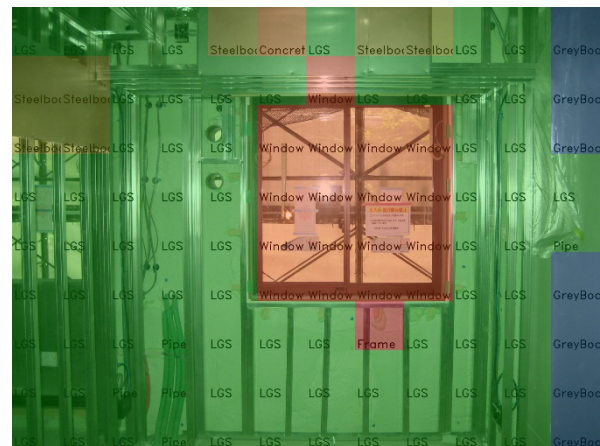


(b) 自動品質検査システムの使用状況

Photo 3 自動品質検査システム  
Automatic Rebar Inspection System



(a) 内装工事中の工事写真



(b) 認識した資材ごとに着色した例

Photo 4 AI を用いた工事進捗管理システム  
A Construction Progress Management System Using Artificial Intelligence



(a) クアトロアイズの設置状況



(b) 作業員と重機までの距離を認識

Photo 5 作業員接触防止システム「クアトロアイズ」  
"Quattro Eyes" A Contact Prevent System



4.2 構造技術系における課題と可視化技術

構造技術系において、地震時における構造安全性や液状化の評価は極めて重要な課題である。また、海に面した地域での津波予測は避難安全性の確保にも大いに役立つ。大林組の保有技術を Table 3 に示す。

Table 3 構造技術分野の可視化技術  
Visualization Technology to Resolve Structural Engineering Problems

技術名称	概要
画像計測と非線形 FEM による RC 構造物ひび割れ性状評価 <sup>18)</sup>	地震による RC 構造物のひび割れ評価に、3次元画像変位計測と FEM 解析によるひび割れの幅と長さを集計したひび割れ面積を加えひび割れ性状を評価する技術
地震後の建物構造安全性判定支援システム「ポケレポ <sup>TM</sup> 」 <sup>19)</sup>	無線加速度計で記録された地震記録を自動的にクラウドサーバに送り、地震直後における建物の構造安全性を判定するための支援情報を確認する技術
建物地震被災度即時推定システム <sup>20)</sup>	地震が発生した際に、建物地下または1階に設置された地震計とコンピュータによる応答計算を組み合わせて、自動的に高層建物の被災度を推定する技術
工事振動監視システム「ゆれ番人 <sup>®</sup> 」 <sup>21)</sup>	工事振動を常時監視し、隣接する生産施設や近隣住民に対する振動許容値を超えそうな場合に、警報を発信して振動障害を未然に防止する技術
積荷・什器類の地震時挙動シミュレーション <sup>22)</sup>	地震発生時に、倉庫の積荷や居室の機器や家具などのように、転倒や落下、移動をしてしまう物体の挙動を予測するため、振動台実験をコンピュータ上で再現できる「数値振動台」技術
地震被害予測システム「Quake Ranger <sup>®</sup> 」 <sup>23)</sup>	地盤・構造物・各種設計地震動等のデータからインフラ施設の地震被害を簡易に予測し、結果を地図上で面的に表示する技術
津波避難シミュレーション <sup>24)</sup>	津波シミュレーションと避難シミュレーションを連動させ、地震発生から避難完了までの津波の遡上と住民の避難の状況を評価し表示する技術
繊維補強コンクリートの構造性能推定 <sup>25)</sup>	繊維補強コンクリートにおける、打設箇所に応じた部材の任意の位置における繊維の向きを評価し表示する技術
液状化地盤の三次元有効応力解析手法 <sup>26)</sup>	広範な密度の飽和砂の地震時から地震後までの過剰間隙水圧の蓄積、消散を表現する地盤構成モデルを導入し、液状化地盤にある RC 製構造物等の非線形領域を含めた挙動を解析する技術

4.2.1 画像計測 地震による RC 構造物の損傷は、主に最大ひび割れ幅で評価される。特に原子力施設など気密・水密性が重要な RC 構造物においては、ひび割れからの漏洩量を迅速に推定するために、ひび割れの総量を評価する必要がある。ひび割れの幅と長さを集計して求めるひび割れ面積に着目し、3次元画像変位計測と FEM 解析により視覚的かつ定量的に評価する手法を開発した。

4.2.2 建物地震被災度即時推定システム&ポケレポ 地震発生時に、建物管理者は避難指示等の可否を即座に判断する必要がある。内外装材に覆われて目視確認できない建物構造の安全性を可視化する技術として、地震計などのデータを自動分析して安全性判定を支援するシステムの開発が進みつつある。大林組では、1台の地震計とコンピュータによる応答計算を組み合わせた「建物地震被災度即時推定システム」(Fig.4 参照)を保有している。さらに、無線加速度計とクラウドサーバの選択肢を加えることで、既存建物への導入コストの削減を図り、複数建物のデータ管理を容易にした「ポケレポ」(Fig.5 参照)を開発中である。

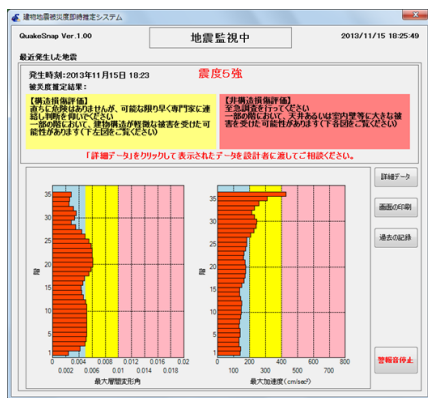


Fig. 4 建物地震被災度即時推定システム  
Instantaneous Estimation System of Structural Damage

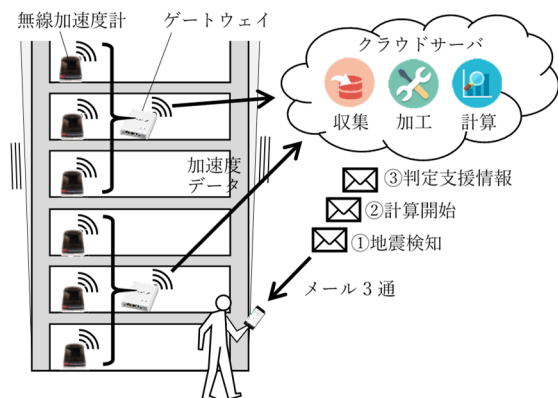


Fig. 5 地震後の建物構造安全性判定支援システム「ポケレポ」  
Building Safety Judgement Support System after Earthquake "Pocket Repo"

4.2.3 ゆれ番人 精密機械工場などの建設工事では、稼働中の既存棟に近接した敷地で新棟建設や増改築を行うケースが多く、工事振動が既存棟の製造装置に悪影響を及ぼさないように配慮しなければならない。敷地境界の振動レベルを表示するだけの装置は広く普及しているが、工事振動監視システム「ゆれ番人」

(Fig. 6 参照) の特長は、独自の手法で工事による振動と周辺環境からの振動を切り分け、周波数ごとに振動許容値をきめ細かく設定し、工事現場に注意報や警報をフィードバックできる点にある。警報は回転灯やブザーで現場内に発信するほか、電子メールの自動送信機能により現場職員やオペレータなど複数の関係者に一斉伝達することも可能である。

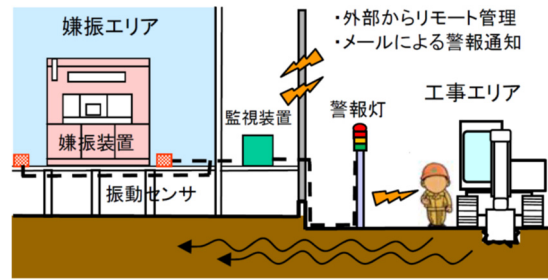


Fig. 6 工事振動監視システム「ゆれ番人」  
Construction Vibration Monitoring System "Yure-Bannin"

4.2.4 積荷・什器シミュレーション 地震被害に対するBCP対策を立案するにあたり、倉庫に保管された積荷や製造中の製品、医療施設の機器や什器など、転倒や落下・移動を伴う物品の地震時挙動を把握することが重要となってきた。振動台実験で全てのパターンを網羅するためには莫大な費用と時間が必要になるため、剛体物理解析という手法を用いて、振動台実験をコンピュータ上で再現する「数値振動台」システム (Fig. 7 参照) を開発した。実際の振動台実験と異なり、手軽に多数の実験ケースを実施することが可能で、視点の移動・回転や一時停止・コマ送りにより実験結果を詳細に検討し、地震時の事業継続計画 (BCP) に有効活用できる。

4.2.5 地震被害予測システム「Quake Ranger」 あらかじめ読み込んだ地盤・構造物・各種設計地震動等のデータから、地盤の揺れやインフラ施設 (土木構造物) の地震被害を簡易に予測するシステムである (Fig. 8 参照)。任意の想定地震動と評価対象地域を選定す

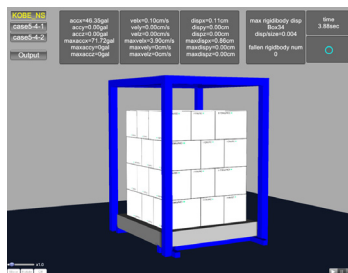
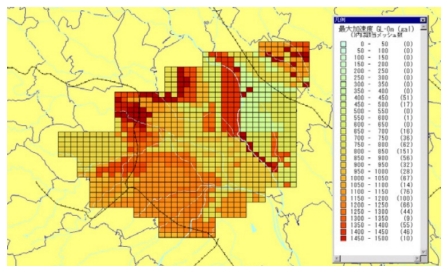
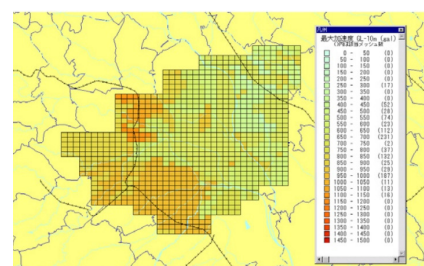


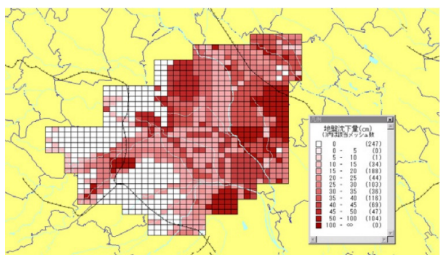
Fig. 7 積荷・什器類の地震時挙動シミュレーション  
Physics Simulation of Stacked Cargoes and Furniture due to Seismic Motion



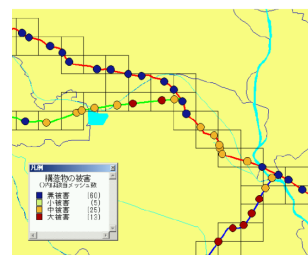
(a) 地表面 (G.L. -0m) の最大応答加速度分布



(b) 地下 10m (G.L. -10m) の最大応答加速度分布



(c) 液状化による地盤沈下の予測



(d) 線状構造物の被害予測例

Fig. 8 地震被害予測システム「Quake Ranger」による評価結果  
Distribution Maps of Ground Behavior Evaluated by "Quake Ranger"

ることで、地表面だけでなく地下の任意の深さの最大加速度・速度・地盤ひずみの分布や、液状化危険度・液状化による各種地盤被害の分布、構造物の被災度を予測することができる。地理情報システム (GIS) の利用により、予測結果は地図上に表示される。また、地震リスク評価や事前対策の優先度の意思決定を支援するだけでなく、地震直後に実際に発生した地震動を入力すれば、早期に被災程度を把握することも可能となる。BCPの策定や、発生後の迅速かつ効果的な点検、復旧の際にも役立つ。

**4.2.6 津波避難シミュレーション** 津波遡上解析と避難解析を組み合わせ、ハード・ソフトそれぞれの面から対策効果を確認し、より効果的な避難計画を策定することができる (Fig.9 参照)。具体的には、津波の遡上解析と人間の避難行動をマルチエージェントモデル (自律的に判断行動する主体が複数存在するモデル) に組み込み、地震発生から避難完了までにかかる時間を予測する。地図上に津波の遡上状況とともに住民が避難している様子が動画で示されることで、津波の遡上と避難の関係を直感的に把握することが可能である。地域の特性 (避難者の年齢特性や地形条件、避難時の移動手段など) を考慮した、より現実的なシミュレーションを通して、津波避難ビルの配置や避難経路の設定・改善、住民や観光客への避難行動の啓発に活用する。

**4.2.7 繊維補強コンクリートの構造性能推定** 繊維補強コンクリートは打設時の流動方向によって繊維の向きが変わり、この向きによって部材の曲げ耐力に影響を及ぼす。このため耐力を把握するためには、実大部材を製作し載荷実験を実施するか、部材を切り出して引張強度を確認する必要がある。そこで、流動解析により繊維配向を推定し、その繊維配向を考慮した構造解析を実施することで部材の構造性能を解析的に推定する (Fig.10 参照)。本技術を用いれば、載荷実験を実施することなく繊維補強コンクリートの曲げ性能を評価し、品質を確認できる。

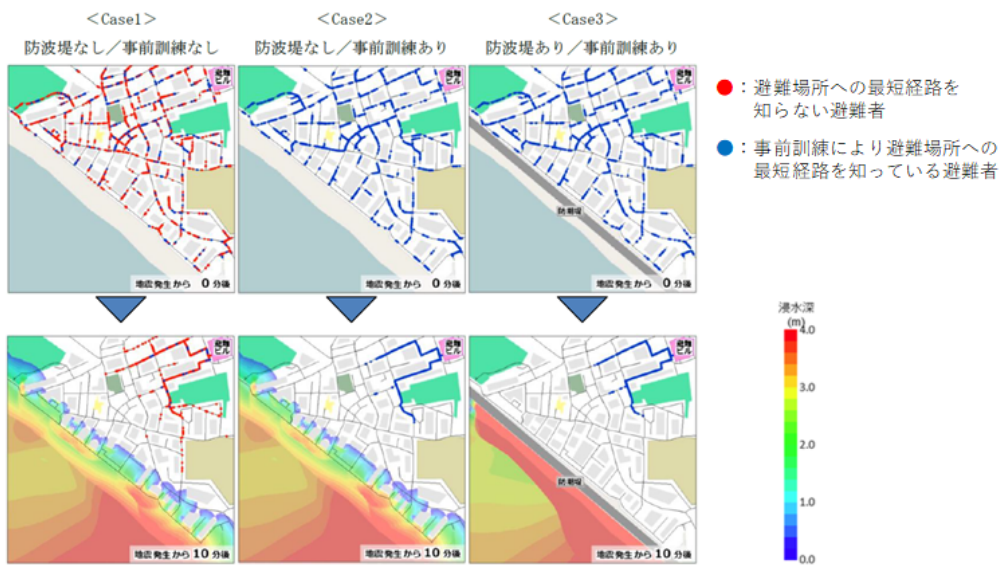
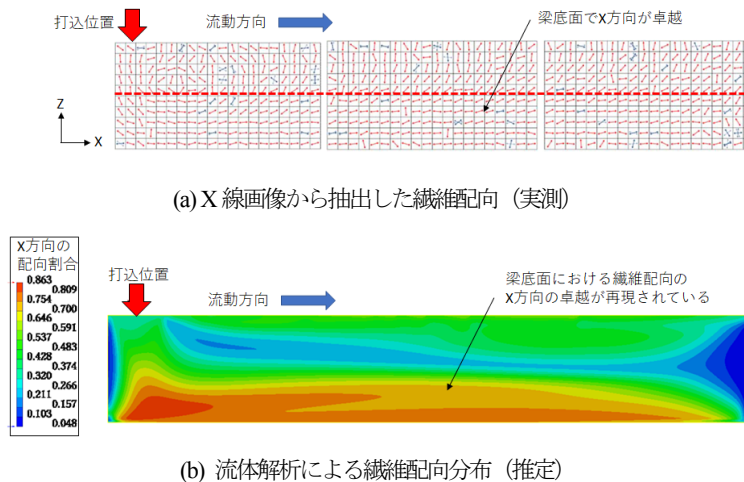


Fig.9 津波避難シミュレーション結果の一例

Example of Tsunami Evacuation Simulation Results by Multi-agent Model



(b) 流体解析による繊維配向分布 (推定)

Fig.10 繊維補強コンクリートの繊維配向と構造性能の推定

Estimation of Fiber Orientation and Structural Performance of Fiber Reinforced Concrete



4.3 自然環境技術系における課題と可視化技術

自然環境技術系において、施工時、施工後における品質管理・モニタリングによる施工不具合防止、芝の生育予測による構造物の設計への反映、生態系ネットワーク評価による建設事業の付加価値向上などが大きな課題である。大林組の保有技術を Table 4 に示す。

Table 4 自然環境分野の可視化技術  
Visualization Technology of Natural Environmental Engineering Problems

技術名称	概要
pH イメージングセンサ <sup>27)</sup>	半導体シリコンを用いて、土質材料の間隙水 pH の変化量を計測し、化学反応の程度・範囲をモニタリングできる技術
安定液自動測定技術 <sup>28)</sup>	場所打ち杭等で使用される安定液の性状を自動で連続的に測定できる技術
ターフシミュレータ <sup>29)</sup>	スタジアム形状・気象条件等から芝の生長を予測できる技術
生物の生息地評価モデル <sup>30)</sup>	都市部の小規模な緑地でも、定量的な評価に基づいて鳥が好んで訪れる環境の創出を行うことができる、当社独自の生息地評価モデルを活用した緑地設計支援技術
マルチミスト <sup>31)</sup>	病院等における付着菌数の調査に基づき汚染リスクの高い場所を特定し、薬剤をミスト噴霧することで細部まで短時間で効率的に部屋を除菌する技術

4.3.1 pH イメージングセンサ 放射性廃棄物の地層処分で用いられる人工バリア材としてのベントナイトは、同じくバリア材であるコンクリート系材料からの高アルカリ浸出液により変質し、性能低下が懸念される。しかし、ベントナイト間隙水の pH を測定する技術は現在世の中には無い。pH イメージングセンサは、LAPS (Light-Addressable Potentiometric Sensor, 光をセンサ基板に照射することで pH 変化量を測定する) により土中の間隙水 pH 変化を可視化することができる (Fig. 11 参照)。この pH の計測技術は、地層処分の安全・安心に寄与するひとつの技術となる。

4.3.2 安定液の自動測定技術 アースドリル工法などの場所打ちコンクリート杭等で使用される安定液は、その性能を維持するために、比重、粘度、砂分を管理する必要がある。これまで、安定液の性状は1日数回、断続的に測定されているが、不具合が発生した正確な時刻や要因が特定できなかつた。この課題に対して、安定液を連続的に自動測定できる技術 (Fig. 12 参照) を開発した。本技術により、安定液の劣化兆候の早期発見や安定液性状を工事関係者間で情報共有でき、不具合による品質低下、工期遅延のリスクを回避することができる。

4.3.3 ターフシミュレータ サッカーの国際大会を開催するスタジアムでは観客席に屋根が備わっていることが条件となる。そのため、低照度下でサッカーを対象にしたスポーツターフを育成する必要がある。本技術 (Fig. 13 参照) は「光合成モデル」と「生長モデル」からなり、気象条件、芝の生育の初期状態を入力すれば芝の生長を予測できる解析プログラムである。これにより、任意のスタジアム形状、気象条件で芝種の選択、芝の生長・衰退の予測等を反映した設計が可能となる。また、既存のスタジアムにおいて、芝の生育不良の原因特定と解決策の提案が可能となる。さらに、スタジアム運用時の芝の管理法を評価し最適な計画を立てることができる。

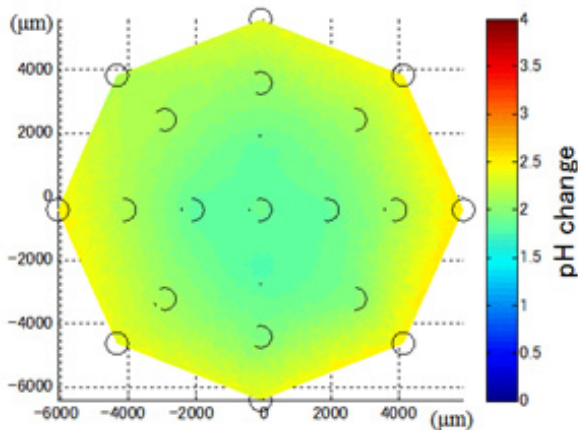


Fig. 11 pH の可視化の例  
Example of pH Visualization

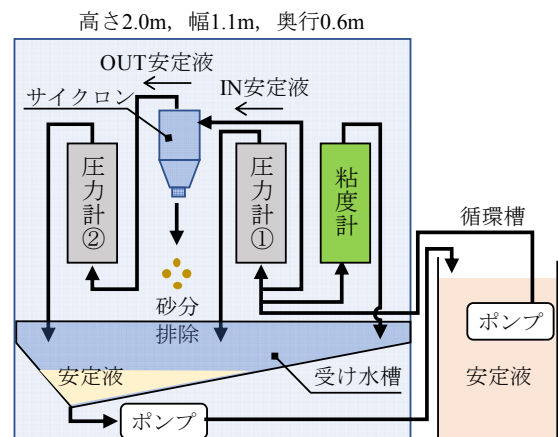


Fig. 12 安定液自動測定装置  
Automatic Measuring Apparatus for Stabilization Slurry

**4.3.4 生物の生息地評価モデル** 都市部の小規模な緑地を生物が好んで出現するように設計する際、緑地が生物の生息地に適しているかどうか詳細かつ直接的に評価することが重要である。本技術は、鳥が好んで出現する場所や移動環境を当社が独自に詳細調査した結果に基づいて開発したモデルである。このモデルを組み込んだ緑地設計支援ツール (Fig. 14 参照) を用いることで、都市部の小規模な緑地でも、鳥が好んで訪れる環境を定量的に評価して創出することが可能となる。

**4.3.5 マルチミスト** O157 やノロウイルス、インフルエンザなどの流行を背景に、医療・福祉施設や子供の利用が多い施設での接触感染を予防するため、手すりや什器など環境表面の除菌ニーズが高まっている。本技術は薬剤を部屋の隅々までミスト噴霧することにより、細部まで手間なく除菌することができる。従来、除菌が必要となる場所特定はできておらず均一的な散布処理であったが、予め付着菌数の調査を行うことで汚染リスクの高い場所を関係者間で情報共有 (Fig. 15 参照) し、必要な個所を短時間で効率的に除菌することが可能となる。

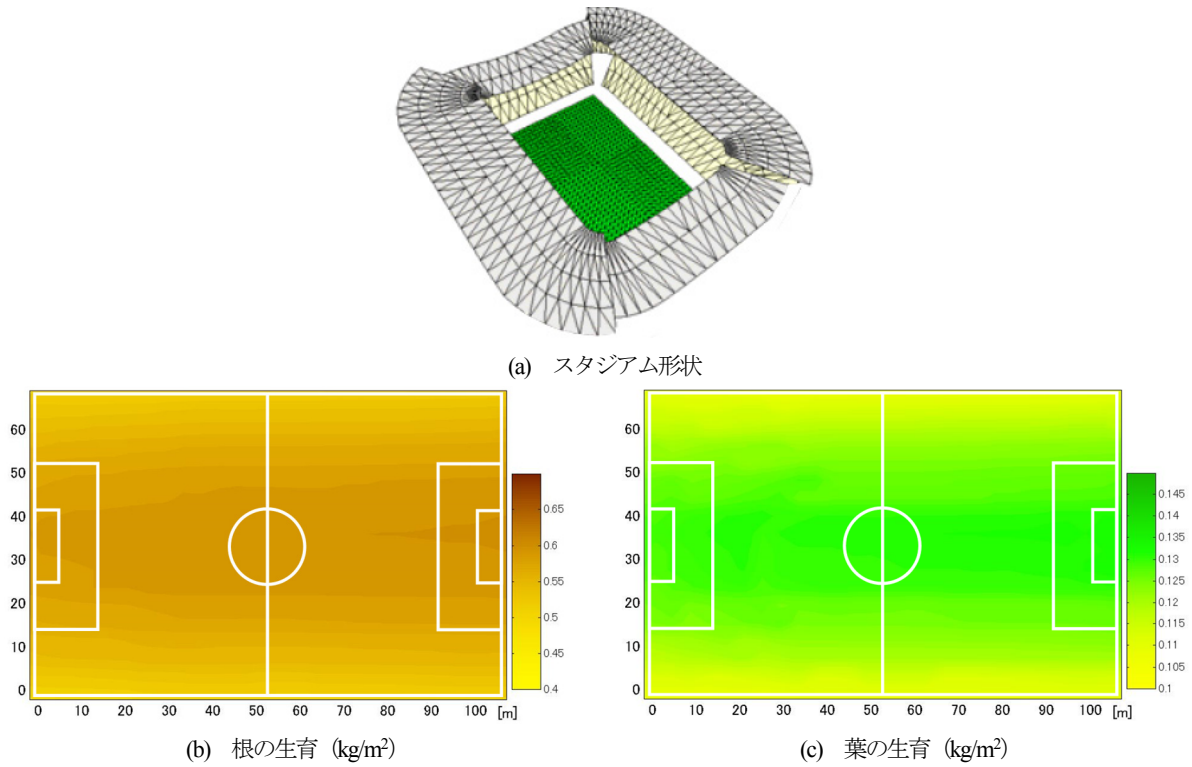


Fig. 13 ターフシミュレータの解析例  
Analyzed Example of Turf Simulator

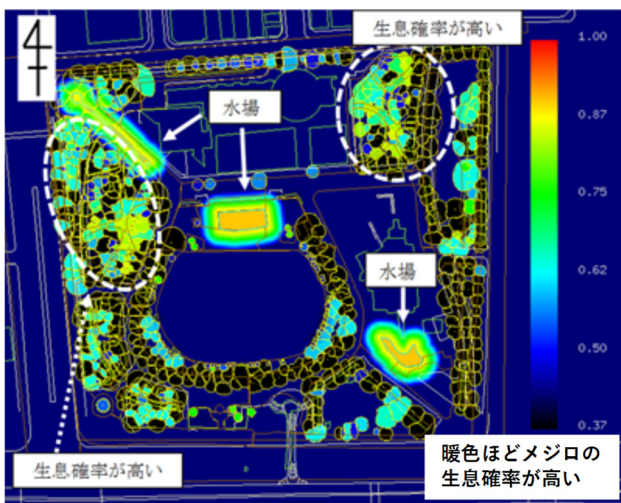


Fig. 14 越冬期メジロの生息地評価モデルの適用例  
Application Example of Habitat Estimation Model for  
"Zosterops Japonicus" in Winter Season

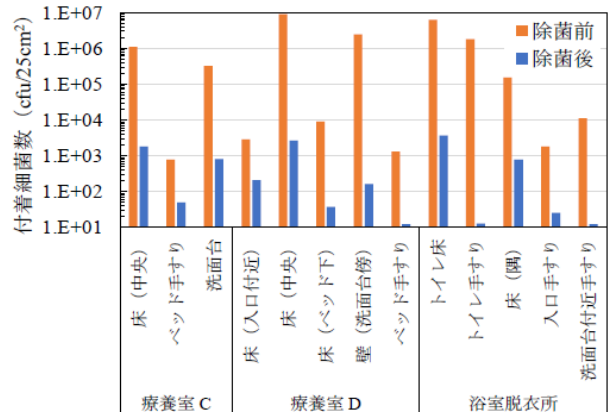


Fig. 15 ミスト除菌前後の付着細菌数結果例  
Result of the Number of Affixed Bacteria by Decontamination



4.4 都市環境技術系における課題と可視化技術

都市環境技術系において、対象となる構造物が受ける周辺環境の影響を評価するだけでなく、構造物それ自身が周辺に与える影響についても評価することが求められる。大林組の保有技術を Table 5 に示す。

Table 5 都市環境分野の可視化技術  
Visualization Technology to Resolve Urban Environmental Problems

対象	技術名称	概要
風	再現期間1年風速の予測 <sup>32)</sup>	高層建物の風揺れ居住性能評価で必要となる再現期間1年風速を気象モデルによって予測する技術
	突風シミュレータ <sup>33)</sup>	竜巻やダウンバースト(強力な下降気流によって生じる突風現象の一つ)をコンピュータ上で再現する技術
音	CALMANDO <sup>®34)</sup>	騒音発生調査や数値シミュレーションにより、建物の様々な部位から任意の受音点への寄与度を求める技術
	音ジャッジ <sup>®35)</sup>	敷地境界線上で騒音の来る方向を特定し、工事現場などで管理目標値を超えるような騒音の発生源を特定する技術
避難行動	マルチエージェント避難シミュレーション <sup>36)</sup>	MAS (Multi Agent Simulation) を用いて、エージェントに避難行動を再現させることで設計時の避難安全計画を立案する技術
	ゾーンモデルに基づく避難性状予測手法 <sup>37)</sup>	スタジアムや超高層建築物などにおいて、大人数の避難を短期間で精度良く計画する技術
雪	着雪範囲予測シミュレーション <sup>38)</sup>	建物外壁への着雪範囲を予測する技術
水	矩形プールのスロッシング評価手法 <sup>39)</sup>	高層建物の上層階付近に計画されたプールを対象に、地震などで建物が揺れた際のスロッシング現象(プールの水面の振動と建物の振動が共振する現象)を予測する技術

4.4.1 風の流れ 風の流れの可視化は、風洞実験と同等の予測を可能とするCFD (Computational Fluid Dynamics : 数値流体解析) の進化に伴い発達してきた。代表例がビル風を予測を目的とした Zephyrous<sup>®</sup> や、風荷重の予測を行う Aerodyna<sup>®</sup> である。風を受けた建物の挙動、特に超高層建物は強風時の風揺れによる居住性能評価が計画時に課題となる。通常、再現期間1年の風速(平均して1年ごとにこの風速よりも大きい風が吹くという閾値となる風速)を用いて行われる。ただし、地上での観測記録は風速計周辺の建物の影響を強く受けるため、建物の影響のない上空風での評価が有効と考えられ、気象モデルを用いた予測手法が開発されている (Fig. 16 参照)。一方、近年ソーシャルメディアによる目撃例揭示の増加とともに突風災害に注目が集まっている。突風災害の代表的な現象は竜巻である。「突風シミュレータ」(Fig. 17 参照) は、竜巻などの現象を CFD により再現し、その影響について検討するためのツールである。また、ダウンバーストと呼ばれる下降気流によって生じる突風現象についても検討を進めている (Fig. 18 参照)。従来、これらの現象は CFD による予測が主であったが、大林組技術研究所では2019年の環境工学実験棟改修工事に伴いマルチファン型非常気流風洞装置に竜巻発生装置とダウンバースト発生装置 (Photo 6) を導入し、PIV (粒子画像流速測定法: トレーサー粒子とハイスピードカメラを用いた流体計測手法) などを用いた研究を予定している。突風現象の可視化技術は、現時点では原子力発電所など限られた用途の建物計画に用いられているが、今後は病院や避難所など重要な建物への展開が見込まれる。

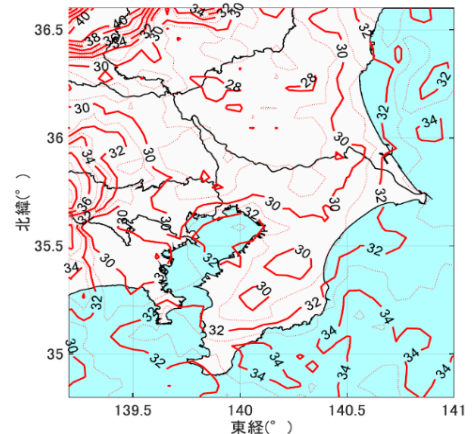


Fig. 16 350m高さでの再現期間1年風速分布  
1-year-recurrence Wind Speed at 350m Above

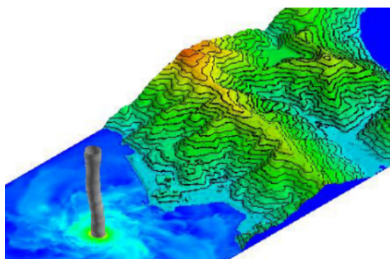


Fig. 17 突風シミュレータによる竜巻  
Tomado Like Flow Generated  
by Gust Wind Simulator

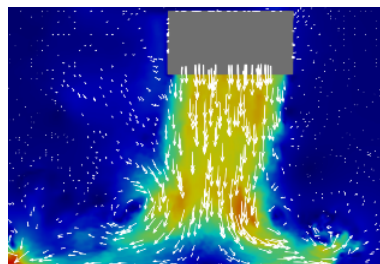


Fig. 18 ダウンバーストの再現  
Distribution of the Wind Velocity  
for the Pulsed Moving Jet



Photo 6 竜巻発生装置  
Tornado Generator

**4.4.2 騒音対策** 工場などの大きな音を発生する施設では、法令に定められた規制基準を下回るよう、敷地境界に影響する騒音を制御する必要がある。そのため、これらの施設の運営では規制基準を満たすよう対策するだけでなく、将来の施設拡張や更新も視野に入れて、騒音レベルに対する余裕度を確保することが望まれる。「CALMANDO (カルマンド)」は騒音発生状況の現場調査や数値シミュレーションにより、建物の様々な部位から発生する騒音が任意の受音点への伝播する際の影響度を求めることができ、騒音対策の立案に効果を発揮する (Fig 19 参照)。一方、「音ジャッジ」は、敷地境界線上で騒音の来る方向を特定するためのシステムであり、工事現場などで管理目標値を超えるような騒音の発生源を特定するためなどに用いられる (Fig 20 参照)。

**4.4.3 避難行動** 火災や自然災害などの非常時の避難行動も、計画時には重要な課題である。「マルチエージェント避難シミュレーション」は MAS を用いて、避難行動を再現させることで設計時の避難安全計画を評価するツールである (Fig 21 参照)。避難に要する時間や滞留の発生場所、混雑の解消時間等の避難性状の予測が可能となるが、大人数を対象とする場合には計算負荷が高くなり、検討に時間を要する点が課題であった。そこで、避難者を群集としてとらえ、対象建物を複数の単位空間 (ゾーン) に分割し隣り合うゾーンの境界面における避難者の流入出を考える「ゾーンモデルに基づく避難性状予測手法」が開発された (Fig 22 参照)。この手法は、短期間で結果を得られるだけでなく、滞留人数や各出口の通過人数の時系列データを得ることができ、全館避難予測に適する特長を有する。

**4.4.4 雪や水** 「着雪範囲予測シミュレーション」は、建物の外壁への着雪範囲を予測できる (Fig 23 参照)。デザインや環境配慮を目的としてルーバーや縦フィンなどの外装突起物を用いる際には、着雪後の氷塊の落下被害を予測し、効果的かつ経済的な対策が可能になる。高層建物の上層階付近に計画されたプールでは、地震などで建物が揺れた際の水が溢れ出す現象の評価手法 (Photo 7 参照) が利用される。東日本大震災のような長周期地震では、プールのスロッシング現象が生じることから、本予測技術が注目されている。

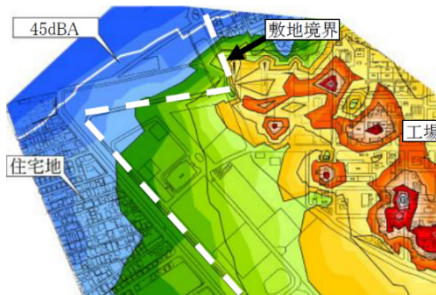


Fig 19 騒音分布予測の例 (CALMANDO)  
Prediction of Noise Distribution

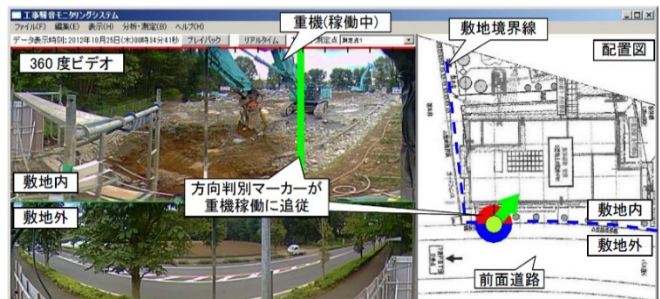


Fig 20 特定された騒音源 (音ジャッジ)  
Realtime Detection of Noise Source

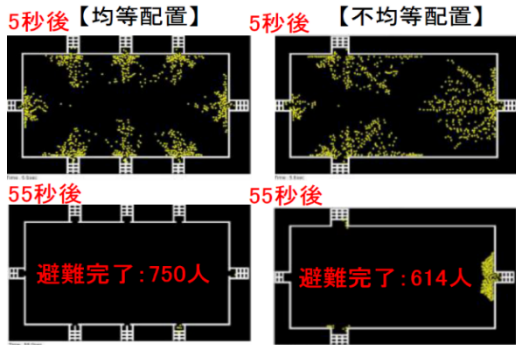


Fig 21 階段配置による避難状況の違い  
Effects of Stair Arrangement on Evacuation Situation

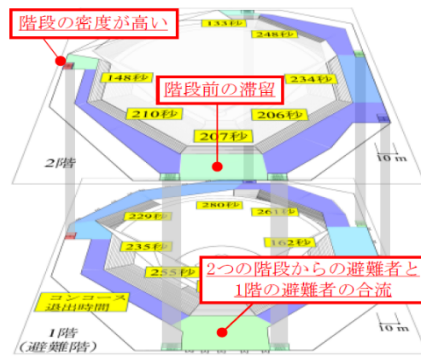


Fig 22 スタジアムでの避難時滞留ゾーン密度  
Distribution of Human Density in a Stadium

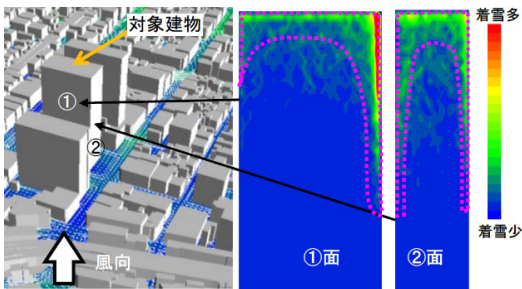


Fig 23 着雪範囲の予測  
Evaluation of Snow Accretion on a Building

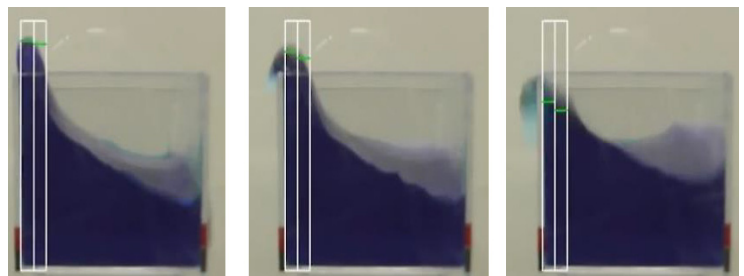


Photo 7 加振時の水面の挙動 (スロッシング評価)  
Behavior of Water Surface During Oscillation



4.5 地盤技術系における課題と可視化技術

地盤技術系において、対象となるのは直接見る事ができない地盤や岩盤である。そのため、ボーリングや弾性波探査などのデータを中心に種々な補間・描画技術を駆使し可視化することが課題となっている。また、評価する深度によって適用技術が大きく異なる。そこで、「国土交通省 大深度地下利用技術指針」<sup>40)</sup>の定義に基づき、地下40m以深と基礎くい等の支持地盤上面から10m以深の大深度を「深い深度」、地上から30m~40m未満の深さを「浅い深度」と定義し、大林組の保有技術をTable 6に示す。

Table 6 地盤分野の可視化技術  
Visualization Technology of Geotechnical Engineering Problems

技術名称	概要	主な適用深さ	
		深い深度	浅い深度
三次元地層推定技術 <sup>41)</sup>	地盤ボーリング情報に空間補間を適用し、三次元的な地層構造面を生成する技術	○	○
三次元亀裂分布可視化技術 <sup>42)</sup>	岩盤中の潜在的なき裂や不連続面を観察や計測から抽出（走向傾斜）し、三次元的な幾何学分布を表示するとともに、崩落可能岩塊を予測する技術	○	
ノンコア削孔切羽前方探査「トンネルナビ」 <sup>43)</sup>	削孔機械データを基に地山の硬軟を評価し、破碎帯や地山分類を評価し表示する技術	○	
孔内観察カメラによる孔内直接観察技術 <sup>44)</sup>	ボーリング孔内をカメラで直接観察し、孔壁面を表示する技術	○	
切羽崩落検知システム「ロックフォールファインダー」 <sup>45)</sup>	トンネル切羽の状態をカメラで監視し、画像認識技術により切羽崩落の予兆を検知する技術	○	
トンネルCIM <sup>46)</sup>	設計時の地質データ、施工時の探査データ、計測・品質データ、現況地形・地質データの各種情報を統合し三次元的に表示する技術	○	
切羽AI <sup>10)</sup>	現場で撮影した切羽画像をクラウド経由で解析し、AIにより岩盤強度、風化変質、割目状況、劣化等を判定する技術	○	
既製杭の支持層到達確認技術 <sup>47)</sup>	既製杭施工時の機械掘削速度と積分電流値を併用することで地盤の硬軟を評価する技術		○
基礎構造物の施工時モニタリング技術 <sup>48)</sup>	光ファイバーセンサを用いてコンクリートの反応熱による温度上昇を計測し、場所打ち杭のコンクリート充填状況を確認する技術		○
新型ボアホールレーダ <sup>49)</sup>	地盤ボーリング孔に挿入する地中レーダで、地盤とコンクリートの境界面の反射波をとらえ、場所打ち杭のコンクリートの出来形を確認する技術		○
磁気探査による杭の支持層到達確認技術 <sup>50)</sup>	磁場を用いて杭の鉄筋を検出し、杭長を計測する技術		○

4.5.1 地盤構造の可視化技術 建設工事においては、地盤調査を行ってその鉛直構造を把握することに加え、平面的に複数の地点で調査を行って支持層の不陸など地盤構造の面的な広がりも把握することも重要である。三次元地層推定技術（Fig. 24 参照）は、地層の三次元モデルを生成し、杭と地層境界との立体的な関係を可視化する技術である。地層ごとの土質違いや、その不陸に由来するリスクを評価し、適切な施工に役立たせる。

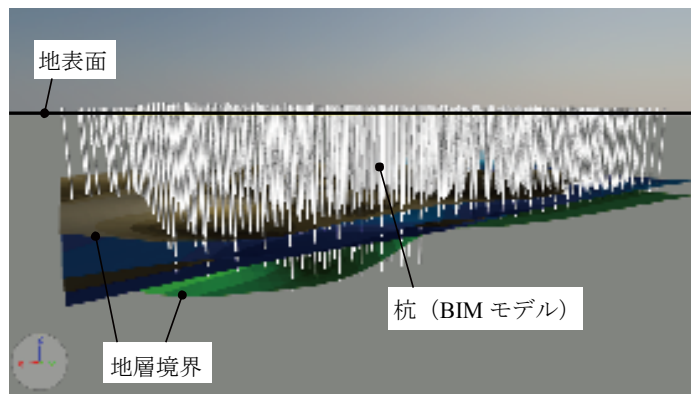


Fig. 24 三次元地層推定技術  
Three-dimensional Soil Stratum Distribution Estimation

**4.5.2 杭基礎の品質確認のための可視化技術** 杭の施工管理においては、杭孔の掘削時に先端が構造物を支持する硬い地層に到達したことを確認する必要があるが、地盤条件によっては地層境界の半別が困難な場合があり、その信頼性向上が課題である。また、杭など地中に構築される構造体は、施工中や施工後に出来形を目視で確認できないため、品質の評価が困難であることも課題として挙げられる。「既製杭の支持層到達確認技術」は、従来から施工管理指標として用いられている積分電流値<sup>5)</sup>に加え、地層の硬軟の影響を受ける掘削速度や、掘削機の振動に基づく新たな指標を導入し、施工管理の精度を向上させる。「基礎構造物の施工時モニタリング技術」は、場所打ち杭の鉄筋に光ファイバーセンサを配置し、フレッシュコンクリートと安定液の温度差およびコンクリート硬化時の温度上昇を計測することで充填確認を行う技術である (Fig. 25 参照)。計測方式は、測点間隔 1mm、温度分解能 0.2°C の高密度計測が可能な OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometry: 光周波数領域反射測定法) である。

「新型ボアホールレーダ」は、杭の近傍に設けた試験孔 (直径 200mm) にレーダを挿入することにより、杭表面の深度方向の形状を計測する技術である (Fig. 26 参照)。計測には 0.6~3.4GHz の電磁波を用い、深さ 5m までの探査に対応する。従来、非破壊での評価が困難であったコンクリート打込み後の杭の出来形確認技術として開発を進めている。一方、「磁気探査による杭の支持層到達確認技術」は、杭の近傍に設けた試験孔に磁力計を挿入し、鋼管杭や鉄筋を検出することにより、杭の長さを計測する技術である。既存杭や地中埋設物などを事前に把握することで、設計・施工の手戻りを無くし工事の円滑化に役立てられる。

**4.5.3 山岳トンネルの可視化技術** 山岳トンネルの工事では、計画段階で実施されるボーリング調査や弾性波探査でも把握できなかった地質構造が出現することが少なくない。不測の地質により安全面や、工費の超過や工期の遅延などが生じる場合がある。事前に掘削する地山の地質構造や、崩落の危険の有無を予測できれば、設計や施工計画の見直しや、施工時の安全対策を講じることができる。以下に山岳トンネルの可視化技術を概説する。「ノンコア削孔切羽前方探査 (トンネルナビ)」は、ノンコア削孔時の機械データを元に地山の状態を予測する技術である。弾性波探査やコアボーリングに比べて低コスト・短工期で地山評価ができるメリットがある。通常、探査情報は 1 次元のヒストグラムで出力されるが、複数本の探査データを元に空間補完することで 2 次元もしくは 3 次元的地質構造の予

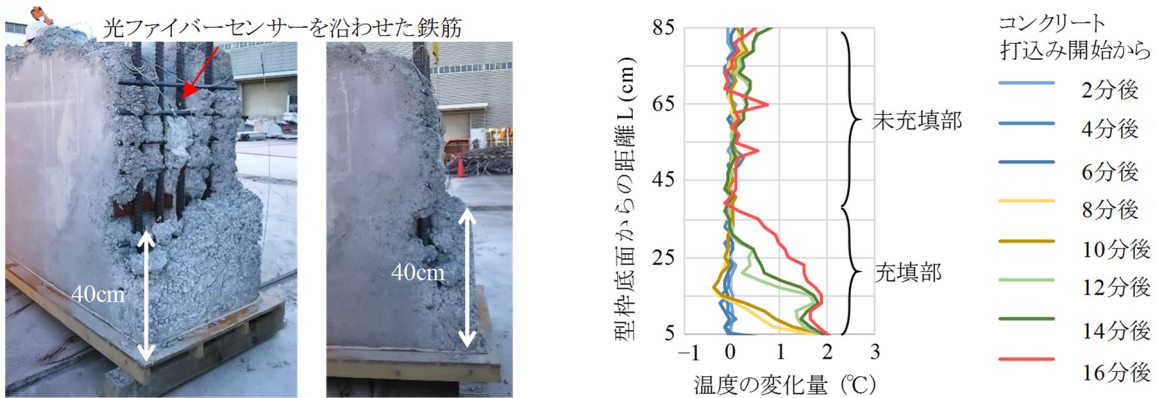


Fig. 25 基礎構造物の施工時モニタリング技術: 光ファイバーを用いた場所打ち杭のコンクリート充填確認  
Foundation Structure Monitoring: Confirmation of Concrete Filling State using Optical Fiber Sensor

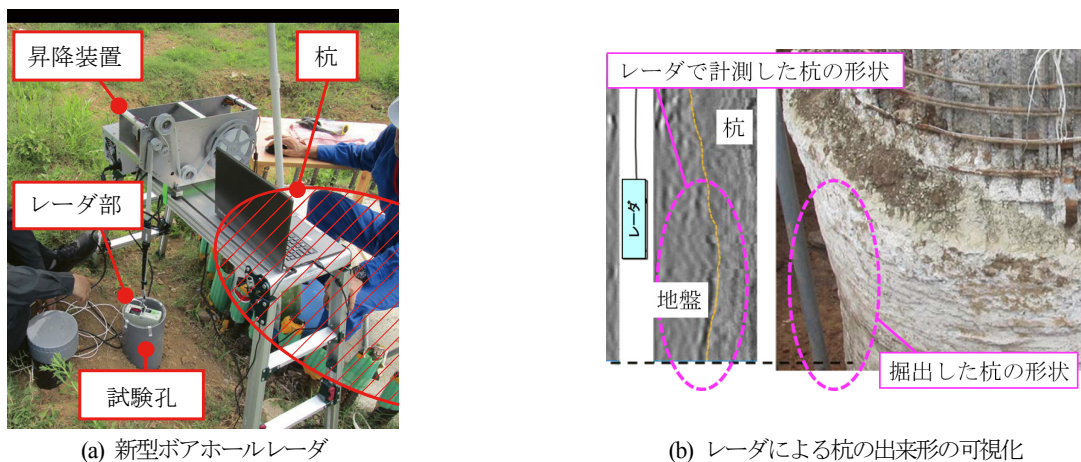


Fig. 26 新型ボアホールレーダによる杭の出来形確認  
Confirmation of Pile Shape using New Borehole Radar



測を可能にしている (Fig.27 参照)。「孔内観察カメラによる孔内直接観察技術」は、トンネルナビで削孔した孔内壁面をカメラで直接観察することにより削孔機械のデータからでは得られない風化変質の度合いなどの情報を提供できる。したがって、トンネルナビの高付加価値化となる技術である。

山岳トンネル切羽での崩落事故を防止する技術に「ロックフォールファインダー」がある。この技術は、デジタルカメラによって常時切羽を監視し、リアルタイム画像解析から切羽崩落の危険を検知し、施工時リスクを軽減する。同様に、「切羽 AI」は切羽画像を AI によって評価する技術である。岩盤強度、風化変質、割れ目状況、湧水による劣化度合いなど全 7 項目で即座に判定し、岩盤判定に繋げる。特長は、細分化した岩盤状態の判定 (ヒートマップ表示) ができるため、通常の支保工選定評価に加え、局所的な不安定性を事前予測でき、対策法選定に役立たせることが可能となることである。

「トンネル CIM」は、設計から施工、維持管理に至る取得情報を一元的に管理し、施工時においては関係者間で共有化し意思決定の迅速化に役立たせる。さらに、即座に設計・施工情報を引き出せるため、竣工後に生じた盤脆れなどのトラブルにおける原因究明に役立たせることも可能である (Fig. 28 参照)。具体的には、設計時の地質データや当初支保パターンを取込んだ 3D モデルに、施工時の坑内観察情報、各種データ、材料データ、修正支保パターン等を組み込み、情報を一元管理する。先のトンネルナビや孔内観察結果を取り込むことで、切羽前方の地質の硬軟や漸層破碎帯の予測、崩落する可能性のある岩塊を掘削前に予測することが可能になる。

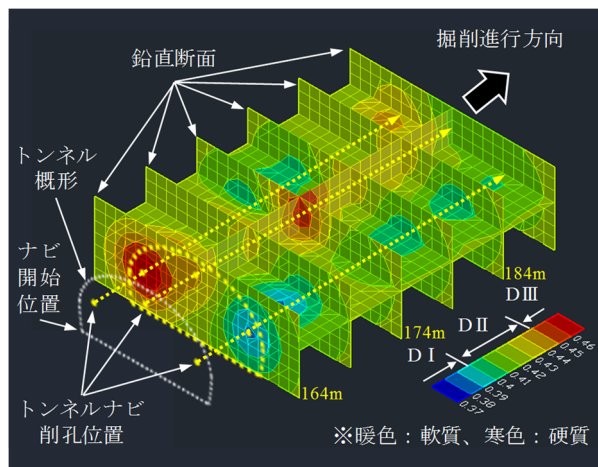


Fig. 27 トンネルナビによる三次元地山評価例  
Bedrock Evaluation Analysis with the Tunnel Navigator

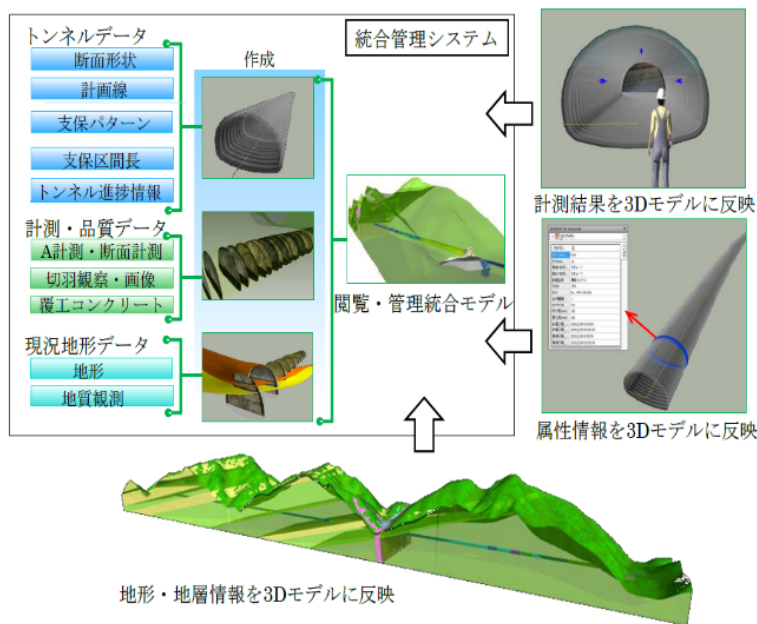


Fig. 28 トンネル CIM  
Tunnel CIM

## 5. おわりに

今回の所報は、「可視化」をテーマに選定した。今後の建設業のあり方を考えると、生産性向上を目指した Society5.0 の取り組みは必要不可欠であり、フィジカル空間とサイバー空間の高度な融合は避けて通れない。また、働き方改革も視野に入れると、発注者・施工者間での効率的な情報共有化を推進することが労働生産性の向上に直結すると考えられる。そのため、大林組が研究開発している可視化に関与した革新的な技術で特集を組んだ。構成は、特集号論文 14 編、特集号報告 1 編と特集号技術紹介 4 編である。さらに、既に開発済みで実用化に達している過去の技術群を 4 章で追加的に概説した。これらの技術が、近未来の建設業における生産性向上の起爆剤になれば幸いである。

本解説文は、特集 WG メンバーの協力を得て執筆した。

- ・4.1 担当：人見 尚, 坂上 肇
- ・4.2 担当：石川理都子, 加藤一紀
- ・4.3 担当：木村志照, 藤井雄太, 長野龍平
- ・4.4 担当：山口純一, 染川大輔
- ・4.5 担当：下山真人, 渡辺和博

## 参考文献

- 1) 総務省：平成 30 年版情報通信白書, <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h30/html/nd131110.html>, 2019.7.1 閲覧
- 2) 内閣府：第 5 期科学技術基本計画, [https://www8.cao.go.jp/cstp/society5\\_0/index.html](https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html), 2019.7.11 閲覧
- 3) 澤田朋子：ドイツ政府の第 4 次産業革命 Industrie 4.0, 国立研究会開発法人科学技術振興機構, 2014.9
- 4) Finbarr Livesey：Defining High Value Manufacturing, CBI, 2006.1
- 5) 国立研究会開発法人 科学技術振興機構：「中国製造 2025」の公布に関する国務院の通知の全訳, 2015.7
- 6) 国立研究会開発法人 情報通信研究機構（北米連携センター）：米国におけるスマートシティに関する研究開発等の動向, 2017.3
- 7) 内閣府：平成 30 年度 年次経済財政報告, <https://www5.cao.go.jp/j-j/wp/wp-je18/index.html>, 2019.7.29 閲覧
- 8) 岡本正, 矢口則彦, 岩田圭剛, 土支田領司, 才賀清二郎, 野村春紀, 西村達志：10 年後を見据えた建設業のあり方について, 日本建設業連合会, 2016.11
- 9) OBAYASHI コーポレートレポート 2018.3
- 10) 畑浩二, 中岡健一：山岳トンネル切羽評価への人工知能適用に関する研究, 第 27 回トンネル工学研究発表会 トンネル工学報告集, 第 26 巻, I-9, pp.1-6, 2017.11
- 11) 中林拓馬：工程認識 AI -現場巡視の目となる人工知能-, 土木学会誌, Vol.103, No.2, 2018.2
- 12) 技術研究所にスマートエネルギーシステムを構築 次世代スマートシティを想定した技術の実証に着手, [https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20131023\\_01.html](https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20131023_01.html), 2019.8.4 閲覧
- 13) 建物のあらゆる情報を集約できるプラットフォーム「BIMWill®」を東京都内のテナントオフィスビルに国内初適用しました デジタルツインの構築により建物管理などさまざまなサービスを展開, <https://www.obayashi.co.jp/news/detail/bimwill.html>, 2019.8.4 閲覧
- 14) 鈴木理史, 中林拓馬, 金子智弥：タブレット端末を利用した拡張現実ツールの開発 その 1) 耐震補強工事の合意形成への適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1301-1302, 2017.7
- 15) オープンイノベーションにより次世代型の自動品質検査システムを開発, [https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20180720\\_1.html](https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20180720_1.html), 2019.8.8 閲覧
- 16) 中林拓馬, 鈴木理史, 金子智弥：工事写真自動認識システムの開発 その 2) 深層学習を利用した工程認識機能, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1011-1012, 2016.8
- 17) 作業員の接近を検知して建設重機との接触を防止する安全装置「クアトロアイズ™」を開発, [https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20180725\\_1.html](https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20180725_1.html), 2019.8.8 閲覧
- 18) 穴吹拓也, 佐々木智大, 米澤健次, 水越一晃：画像計測及び非線形 FEM による RC 構造物のひび割れ性状評価, 大林組技術研究所報, No.83, 2019
- 19) 三輪田吾郎, 青山優也：地震後の建物安全性判定支援システム「ポケレボ™」, 大林組技術研究所報, No.83, 2019
- 20) 中村充, 圓幸史朗, 石川理都子, 三浦耕太：地震時における建物被災度の即時推定技術, 大林組技術研究所報, No.78, 2014
- 21) 中村充, 三輪田吾郎：機能強化した工事振動監視システム「ゆれ番人®」, 大林組技術研究所報, No.75, 2011
- 22) 吉田治, 石川理都子, 三浦耕太, 青山優也：積荷・什器類を対象とした地震時挙動シミュレーション, 大林組技術研究所報, No.80, 2016
- 23) 副島紀代, 江尻謙嗣, 大内一：土木構造物の地震被害予測システムの開発, 大林組技術研究所報, No.67, 2003
- 24) 武田篤史, 副島紀代, 萩原由訓：津波避難シミュレーションを用いた地域の安全性向上, 大林組技術研究所報, No.78, 2014



- 25) 佐々木一成, 野村敏雄, 田中翔, 秋山充良: 超高強度繊維補強コンクリート供試体の X 線撮影と鋼繊維の分散・配向を考慮した曲げ強度評価に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.1093-1098, 2017.7
- 26) 米澤健次, 穴吹拓也, 江尻謙嗣: 大規模・高速化非線形 FEM 解析ソフト「FINAL-GEO」, 大林組技術研究所報, No.75, 2011
- 27) 木村志照, 三好悟: 化学イメージングセンサを用いたベントナイト間隙水の pH 測定手法の開発, 大林組技術研究所報, No.83, 2019
- 28) 森下智貴, 三浦俊彦, 和知康晴, 吉本和哲: 安定液の自動測定技術の開発, 大林組技術研究所報, No.83, 2019
- 29) Matsubara, T., Kosugi, Y., Takanashi, S., Otsuka, K.: Gas exchange and growth/decline model of C<sub>3</sub> turfgrass fields under various light conditions, Ecol. Modell., 379, pp.107-121, 2019.4
- 30) 松原隆志, 杉本英夫, 寺井学, 赤川宏幸: 生物多様性に配慮した都市緑地の設計手法, 大林組技術研究所報, No. 78, 2014
- 31) 四本瑞世, 緒方浩基, 奥田覚, 野溝貞良, 三浦良介, 森良史: 「マルチミスト」カートによる居室内除菌の性能評価, 大林組技術研究所報, No.82, 2018
- 32) 後藤暁, 大塚清敏: 小型ドップラーライダー観測に基づく東京上空の風の鉛直分布特性, 第 22 回風工学シンポジウム論文集, pp. 7-12, 2012.12
- 33) 片岡浩人, 数値シミュレーションによる竜巻状旋回気流がもたらす風力の評価, 大林組技術研究所報, No. 79, 2015
- 34) 池上雅之, 縄岡好人: 騒音診断対策支援システム「カルマンド®」の開発, 大林組技術研究所報, No.68, 2004
- 35) 池上雅之, 本田泰大, 渡辺充敏, 羽入敏樹, 星和磨: C-C 法を用いた工事騒音モニタリングシステムの開発とその適用, 日本音響学会講演論文集, pp.257-260, 2013.9
- 36) 吉野攝津子, 山口純一, 村岡宏: 煙拡散 避難シミュレーションモデルの開発 (その 1) - (その 3), 平成 24 年度日本火災学会研究発表会, pp.156-161, 2012.5
- 37) 山口純一, 扇谷美沙, 坂井慶哉, 住田沙紀, 大宮喜文: 廊下の滞留を考慮した群衆歩行性状の簡易予測計算法 平成 28 年度日本火災学会研究発表会, pp.122-123, 2016.5
- 38) 田畑侑一, 大塚清敏: 建物外装部材を対象とした着雪予測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, pp.89-90, 2014.9
- 39) 染川大輔, 飯田有未, 後藤暁: 高層建築物上部に計画された矩形プールのスロッシングに関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, pp.15-16, 2019.9
- 40) 国土交通省: 大深度地下使用技術指針・同解説, pp.6-7, 2018.3
- 41) 児島理士, 渡辺和博, 佐原守: 杭の支持層深度の推定誤差とボーリング本数の関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, pp.489-490, 2018.9
- 42) 中岡健一, 畑 浩二, 市川雅之, 小笠原光雅, 前島俊雄, 山本浩志: 波方 L P G 岩盤貯槽におけるキープロック安定性評価, 第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.404-409, 2010.1
- 43) 桑原徹, 畑浩二, 稲川雄宣, 平川泰之: 変換解析システムによるノンコア削孔トンネル切羽前方予測技術, トンネル工学論文集, 第 18 巻, pp.1-10, 2008.11
- 44) 藤岡大輔, 畑浩二: 簡易な孔内カメラを用いたノンコア削孔切羽前方探査の高精度化, 第 70 回土木学会年次学術講演会講演梗概集, VI-684, pp.1367-1368, 2015.9
- 45) 藤岡大輔, 中岡健一, 西山哲: 背景差分法を活用したトンネル切羽の崩落検知システムの開発, 第 73 回土木学会年次学術講演会講演梗概集, VI-018, pp.35-36, 2018.8
- 46) 畑浩二, 杉浦伸哉, 後藤直美, 藤岡大輔: 山岳トンネルにおける ICT を活用した予測型 CIM の開発, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 第 71 巻, No.2, pp.II\_78-II\_85, 2016.3
- 47) 萩原由訓: 既製コンクリート杭の支持層到達確認のための指標に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, pp.733-734, 2019.9
- 48) 鈴木直子: 基礎構造物の施工時モニタリングに関する研究, 大林組技術研究所報, No.81, 2017
- 49) 勝二理智, 萩原由訓, 藤森健史: 新型ボアホールレーダによる地中場所打ち杭の出来形の可視化, 大林組技術研究所報, No.83, 2019
- 50) 勝二理智, 藤森健史: 大型物流施設の建替え工事における既存杭利用と調査, 日本建築学会技術報告集, 第 24 巻, 第 58 号, pp.989-993, 2018.10
- 51) 日本建設業連合会・コンクリートパイル建設技術協会: 杭の施工管理における支持層到達の確認方法 (既製コンクリート杭埋込み工法), p.19, 2017.2