

施工シミュレーションの動向

嘉納 成男

建設工事におけるコンピュータを使用したシミュレーションは、1970年代から乱数シミュレーションを使用して不確定な状況における生産性や工期の推定をより正確に行おうとする研究として始まり、今日では工事の進捗状況を3次元空間で再現し視覚的に各種の検討を行う計画や管理の手法として変貌しつつある。本報では、工事の計画や管理の手法の一つとして、施工シミュレーションの可能性、自律型のシミュレーションの重要性を示し、高度なシミュレーションを実現するために必要な方法論と将来の方向性を考える。

キーワード：シミュレーション、3次元CAD、自律型シミュレーション、バーチャルリアリティ、建築工事、可視化、3次元スキャナー、工事計画、工事管理

1. はじめに

建設活動への3次元CADやCGの活用が始められて既に20年以上が経ち、現在ではその延長上にあるバーチャルリアリティ技術を活用して施工シミュレーションを行う研究や試行が活発に進められている^{1)~3)}。

建設活動の如く複雑なプロセスを計画・管理するためには、現実をバーチャルな世界で構築し視覚的に把握・判断する意義は大きい。工事技術者の多くが持つ「ものを見ながら考える」という現場主義は、実際の物事を視覚的に捉え、物事を判断する重要性を示している。バーチャルリアリティの技術は、コンピュータの中で「ものを見ながら」と言う理念を実現することによって、より正確で且つより適切な判断をし得る環境を造り出す。

また、施工シミュレーションで事前に得た将来の工事現場の姿は、工事が実際に進捗した時点で撮影する写真や3次元スキャナー点群と比較することによって、工事の進捗度合いや出来形の適否を視覚的に確認することにも役立つ。

本報では、工事現場の計画や管理の手法の一つとして、施工シミュレーションの可能性を示し、工事のモデル化の仕組み、高度なシミュレーションを実現するために必要な方法論と将来の方向性を考える。

2. 施工シミュレーション

シミュレーションとは何か。現実の世界を擬似的に紙の上や模型を用いて、特定の条件を与えた時の動きや状態を予測または再現することを意味する。数学モデルを使用した経済予測、企業の収支計算、投資効率の予測、実大モデルを使用した地震時の構造的安定性の確認などがこれに当たる。また、建築模型を作成して、それぞれの位置からの見え方や風洞実験などのシミュレーションもある。

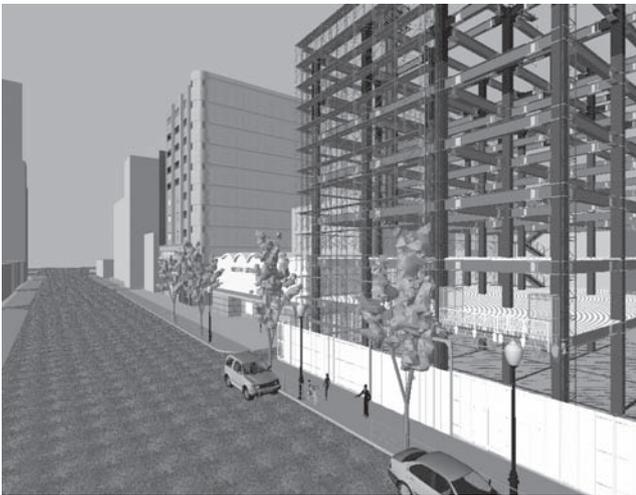
施工の計画では、古くから工事現場の模型を作成して工事の進め方を検討したり、完成すべき建築物のモックアップを作成して、その作業手順や方法を検討している例は多い。これもシミュレーションの一つである。

1970年後半から乱数シミュレーションという言葉が施工においても使用され始めた。これはコンピュータを使用して、現実の施工をコンピュータ内で再現し、視覚的な3次元表示はないものの、工事の進捗速度や工事機械の稼働率や生産性を予測しようとするものであった。GPSS⁴⁾やSLAM⁵⁾などのシステムが使用された。工事用シミュレーションシステムとしてCYCLONE⁶⁾も開発されている。しかし、このような技術的なチャレンジも大規模工事の一部に適用されたものの、一般の工事ではコンピュータを用いた施工シミュレーションは普及しなかった。

2000年に入ってから、シミュレーションという言葉

葉が再び盛んに使用されるようになった。コンピュータを使用して工事の進捗を再現することは旧来と同じであったが、新たに加わった要素として視覚的に工事の進捗が「見える」ことであった。各時点の工事現場の様子を静止画や動画で「見る」ことによって、発注者や工事関係者がより直感的に工事の状況や問題点を把握し得る道具となった。これを可能にしたのが3次元CADをベースとした部材や工事機械等の3次元形状や位置の正確な情報であり、施工シミュレーションによって部材の干渉や作業の干渉を含めた工事進捗を再現出来るようになった。

図一1は、鉄骨建て方終了時の工事現場の様子を示す静止画である。発注者や工事関係者に見せることによって直感的に工事の進み具合や近隣との関係が理解できる。



図一1 鉄骨建て方終了時の工事現場の様子

3. 自律型シミュレーションによる可視化の仕組み

工事現場では、作業者の動き、工事機械の動き、仮設資材の配置などが複雑に関連しており、その可視化シミュレーションでは、これらの動きを表示しながら、見る側の視点を変えて状況を観察し得るウォークスルー表示方式が効果的である。

更に、複雑な工事の進捗をコンピュータ内で再現するには、予め用意したシナリオ通りに工事を進めてその様子を表示するのみではなく、コンピュータ内で作業員や工事機械が自律的に各種の判断をすることによって、工事を進めていく自律型シミュレーションの仕組みが不可欠となる。

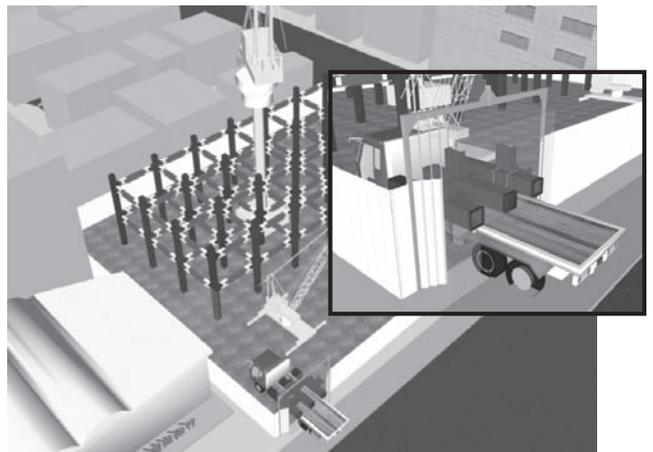
ウォークスルー表示方式では、表示と同時にシステ

ム内での人や物の動きを計算で求めるため、処理に大きな負担が掛るが、見る側が視点を動かして任意の位置から工事進捗を見ることが出来る。アニメーションなどでは、この方式以外では作成時に決めた位置や方向からの動画となるため見えない部分は何度見ても見ることが出来ないが、この方式は、人や物体の動きをその都度自由な視点から見ることが出来るため、工事の進捗を把握し易い。

自律型シミュレーションでは、作業員や工事機械の動きの規則や仕組みを予めロジックとしてモデルに組み込むことによって、実際の工事に起こる不確定な要因や生産性の変動、他の作業員の動きなどを考慮した施工シミュレーションを行うことが出来る。

現状のパーソナルコンピュータの能力では、この自律型の施工シミュレーションをウォークスルー表示方式と同時に行うためには処理能力が不足しているため、その目的に応じて部分的な自律型シミュレーションを組み込むことが現実的であるが、コンピュータの能力向上と合わせて自律型シミュレーションの幅は広がって行く。

図一2は、鉄骨を運ぶトラックが現場のゲート前に到着すると、ゲートが自律的に開き、開き終わるとトラックが自律的に現場内に移動し、その後ゲートが閉まる過程を組み込んだ事例を示している。自律型シミュレーションによって、施工シミュレーションの動きをシナリオとしてモデル化する必要がなくなり、モデル作成の手間は削減される。



図一2 トラックと現場ゲートの自律型シミュレーションの事例

4. 施工シミュレーションのモデル化の方法

(1) 工事進捗モデル

工事の進捗をモデル化する方法には3種類がある。

- ①工事ネットワークモデル
- ②部材順序モデル
- ③ワークパッケージモデル

工事ネットワークモデルは、PERT/CPM 手法で用いられる工事間の前後関係をネットワークで表現するモデルである。この方法は工程ネットワークの市販ソフトと連携して施工シミュレーションを行うことが出来るため、多くの施工シミュレーションで用いられている。欠点としては、視覚的に見せる部材や機材の動きと工事進捗との関係を個々に定義することが必要な点であり、部材や機材の動きが複雑であると正確に定義することが難しくなる。

部材順序モデルは、名称の如く、部材の取り付けや運搬の順序関係をネットワークとして表現するモデルである。シミュレーションで使用する部材が既に3次元モデルとして登録されている場合には、CADの部材IDを用いてその順序関係を定義することによって、工事ネットワークモデルよりも容易にモデルを作成することが出来る。視覚化シミュレーションは、見えるものを対象とするため、プロセスをモデル化するよりも部材を使用した方が直観的にモデル化出来る。通常は、工事機械や仮設資材も含めて、その取り付け、取り外しや運搬などもモデル化する。図-3は、鉄骨柱と梁に関する部材の取り付け順序をモデル化した事例である。

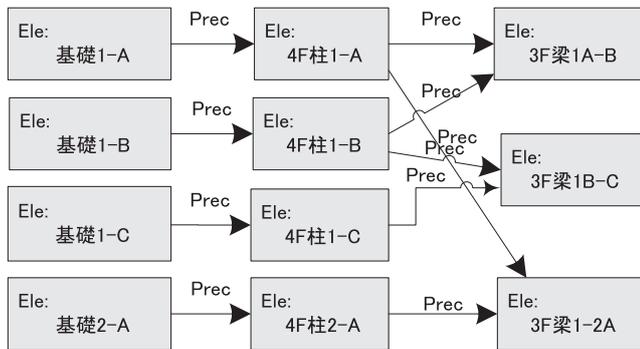


図-3 鉄骨柱・梁に関する部材順序モデルの事例

ワークパッケージモデルは、工事の複雑な進捗をより詳細にモデル化するとき使用する。このモデルは、工事の順序関係とともに材料や部材、作業員、工事機械や仮設資材をアローで結び、工事と各種資源の関係を表現する。このモデルを繋ぎ合わせていくと、全体工程を表現するモデルとなり、工事の進捗に合わせた部材や工事機械等の発生や消滅を詳細にモデル化することが出来る。

図-4は、作業員AがボードBを切断して、切断

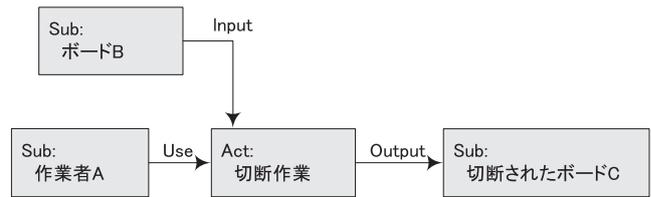


図-4 ボードの切断作業を表すワークパッケージモデル

されたボードCを作り出す工程を示したワークパッケージモデルである。

(2) 物理モデル

工事を進めていくときには、部材や工事機械の発生、移動、消滅等の如くシミュレーション側が意図的に動かす事象とともに、工事を進めていくと地盤などは自然と崩れたり、落下したりする事象がある。このような物理や力学的現象に従う動きをモデル化し、これを施工シミュレーションに組み込むことによって、物理現象を含めたモデルを作成する。

事例として、地盤における土砂の自然崩壊についての物理モデルを示す。図-5.aは、地盤モデルを示し

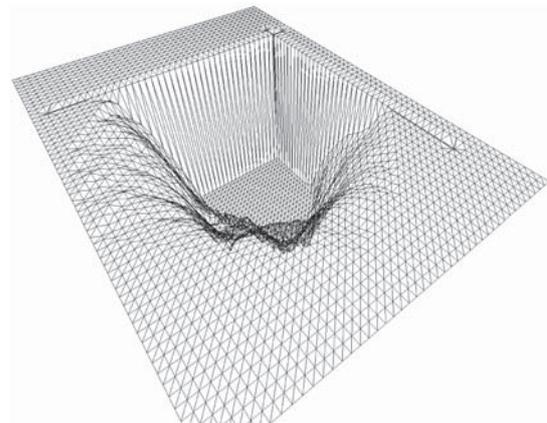


図-5.a 地盤の崩壊を表す物理モデル

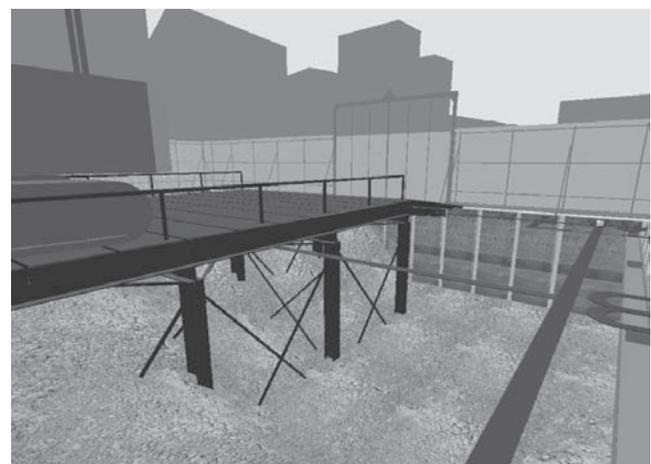


図-5.b 地盤の物理モデルを組み込んだ土工事例



図一6 作業者の動作型シミュレーションの事例

ており、掘削を始めるとその周りの土砂が少しずつ崩れるように土砂の動きが事前にモデル化されている。これを用いることによって、掘削機が土砂を取り除くとその周りの土砂が自動的に時々刻々変形していく状況を視覚的に示すことが出来る。図一5.bは、地下掘削状況をシミュレーションするために、地下部分の掘削工事に合わせて山留壁の内側で地盤が下がるようにモデル化した事例である。

(3) 作業者の動作モデル

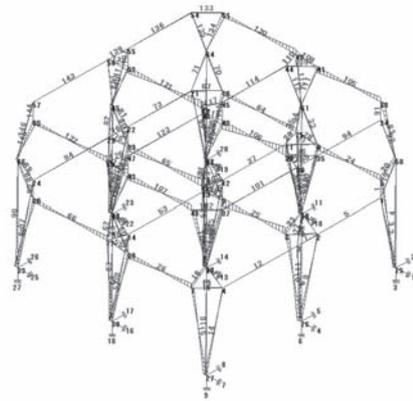
複雑な関節を有する人間の動作を忠実に再現するには、モーションキャプチャによって作業者の手足の動きを正確にデータ化して、これらに基づいて動きを表示する。動作型シミュレーションでは、一般にBVHフォーマットで記載されたモーションキャプチャデータを用いる。また、一連の作業の動作を連続させて行わせる場合には、運搬、取り付け、移動などの複数の動作ファイルを繋ぎ合せて繋ぎ目のない連続的な動作として見せる方法もある。図一6は作業者が足場を移動する様子を示した動画のコマ落とし画像である。

(4) 取り付け順序モデル

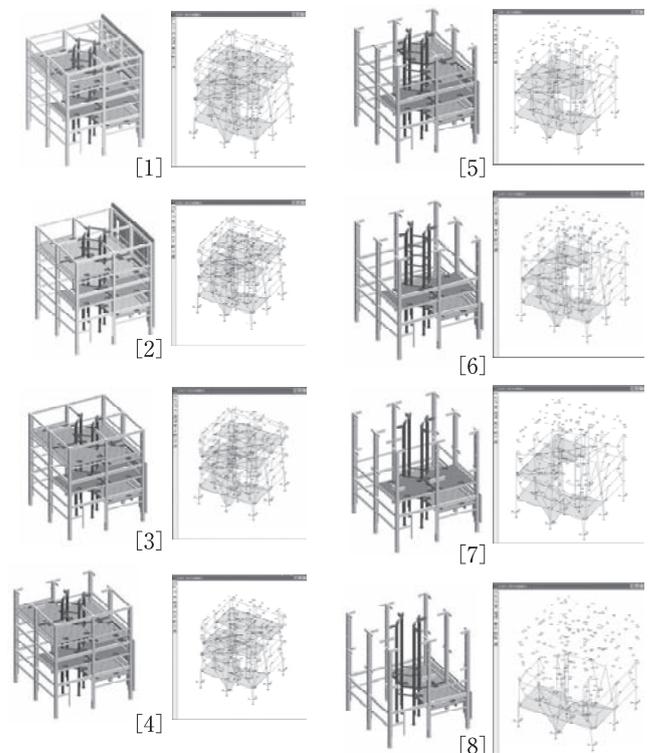
施工シミュレーションにおいて問題となる事柄の一つとして、視覚的に取り付けて行く部材の順序を予め定義することに手間が掛る点がある。先に述べた部材順序モデルを用いればよいが、部材が数百、数千となると事実上不可能になる。このため、部材の取り付け順序を自動的に認識して、工事を進めるロジックが必要になる。

取り付け順序を自動的に求めるには、①部材の安定性、②取り付けの容易性がある。

ここでは、部材の安定性を検討しながら部材の取り付け順序を求める方法を示す。部材の安定性とは、例えば「柱を両わきに2本建てなければその間の梁は取り付けられない」ことを示している。即ち、部材と取

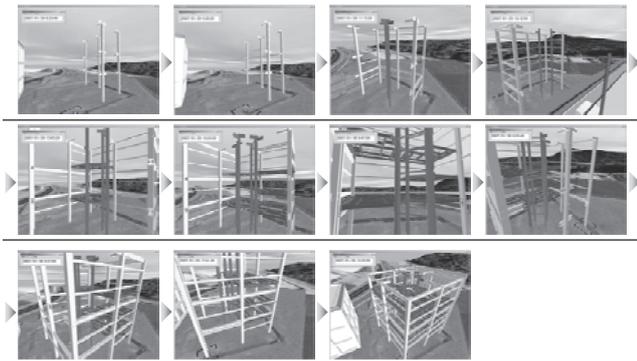


図一7.a 部材の安定性を求める構造解析モデル



図一7.b 逆順序解析方式を用いた鉄骨の建て方手順の推定プロセス

り付けたとき構造的に安定しない部材は取り付けられないため、後回しになる。図一7.aは、この考え方を



図一7.c 鉄骨の建て方シミュレーション結果

用いて、鉄骨建て方についての安定性を求める構造解析モデルを示しており、図一7.bはこのモデルを使い逆順序解析方式⁷⁾を用いて、鉄骨建て方手順を求めプロセスを示している。図一7.cは、これによって求めた鉄骨の建て方手順の結果である。

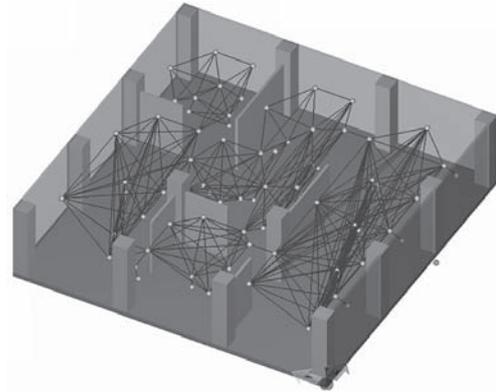
(5) 移動・運搬経路に関する空間認識モデル

施工シミュレーションにおいては、工事機械の移動経路や作業者の移動経路を決める場合に、新たな壁が出来たり開口部が塞がれたりするためこれを考慮して決めなければならない。しかし、施工シミュレーションに乱数的要素を含めると、移動時にどの部分が塞がれているかが分からないため、移動時に最短経路を自動的に求める必要が出てくる。開口部などで塞がれた箇所を回避させながら自動的に工事機械を移動させることが出来れば、事前にその経路をモデルに指定する必要がなくなる。

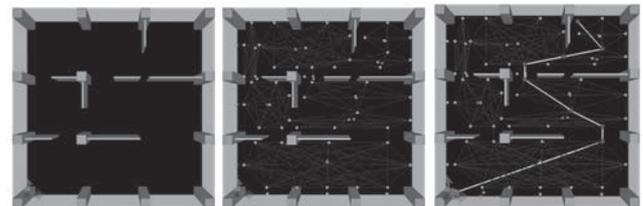
変化する工事空間において、最短移動経路を自動的に求めつつ、工事機械や作業者を移動させていくためには、空間認識と最短移動経路の発見のロジックを施工シミュレーションに組み込む必要がある。

図一8.aは、壁など遮蔽物があるときの最短経路を求めるために自動的に作成された経路ネットワークである。図一8.bは経路ネットワークを求めるプロセスを示しており、経路ネットワークを作成しその最短経路を求めた結果が図一8.b③である。このモデルに

よって、工事機械や作業者を工事の進捗に合わせて自動的に最短経路を移動させることが出来る。



図一8.a 経路ネットワークの事例



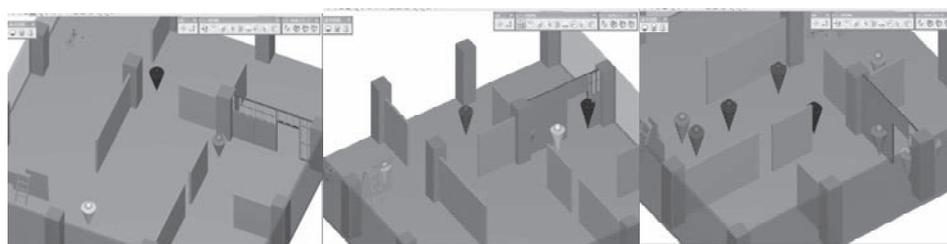
①空間 ②経路ネットワーク ③最短経路

図一8.b 経路ネットワークの作成と最短経路の発見のプロセスの事例

(6) 作業空間の干渉モデル

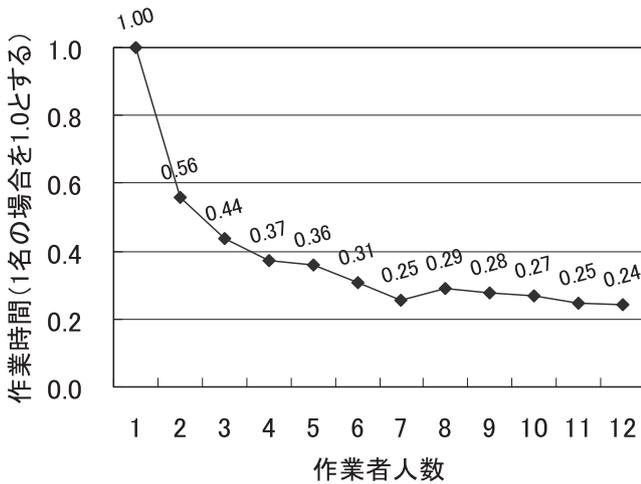
工事の進捗において、複数の工事が隣接して行われると相互に作業員や工事機械が干渉し合い生産性は低下することが知られている。また、狭隘な工区では作業員の人数が増加すると作業員同士が干渉し合い生産性が低下する。この状況を施工シミュレーションで考慮するには、空間における工事機械の干渉、移動経路の干渉、作業員の干渉などを認識して作業を進めるための空間認識モデルが必要になる。

図一9.aは、狭隘な工区において複数の作業員が間仕切壁作業を行う様子を示している。このモデルを利用して、施工シミュレーションによって作業員人数と作業時間の関係を解析した結果が図一9.bである。図一9.bは、作業員1名の場合の作業時間を1.0とした



①作業員2名 ②作業員4名 ③作業員9名

図一9.a 狭隘な工区における複数作業員による間仕切壁作業



図一 9.b 間仕切壁作業における作業人数と作業時間の関係

場合の各人数における作業時間を示している。作業員が増えて行くに従い作業員相互の干渉が起り、人数が増加しても作業時間は0.25程度にしか低下しないことが分かる。この干渉認識モデルでは、各作業員は作業の進捗によって変化する最短移動経路を自動的に求めて、且つ他の作業員を回避しながら部材の運搬と取り付けを行っている⁸⁾。

5. 施工シミュレーション結果と工事出来型の比較

視覚化を目指した施工シミュレーションは、従来、工事の進捗状況を静止画や動画によって表示し、関係者が今後どのように工事を進めるか、または進めようとしているのかを直感的に理解することを目的としている。しかし、視覚的な施工シミュレーションは、着

工後の出来形が計画通りに出来ているかを視覚的に確認する道具ともなる。

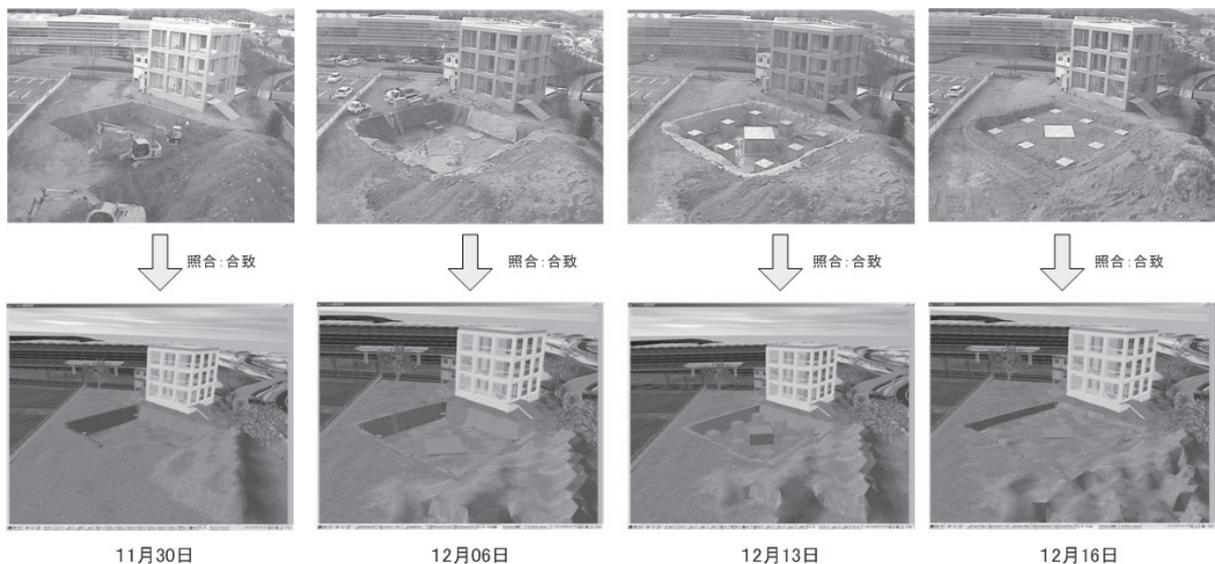
施工シミュレーションは単なる着工前の計画検討の道具ではなく、着工後の各時点における出来上がり状況を視覚的に示す計画モデル (To-Be-Built モデル) でもある。このモデルを用いれば、着工後に撮影した写真や3次元スキャナーで採取した点群データと比較することによって、施工出来形が計画とどのような差異があるかを確認することが出来る。

以下に、施工シミュレーション結果のデータと、実際の工事の進捗時に撮影した写真及び3次元レーザスキャナーで取得した点群データを用いて、工事進捗の計画とのズレを視覚的に判断した事例を示す。

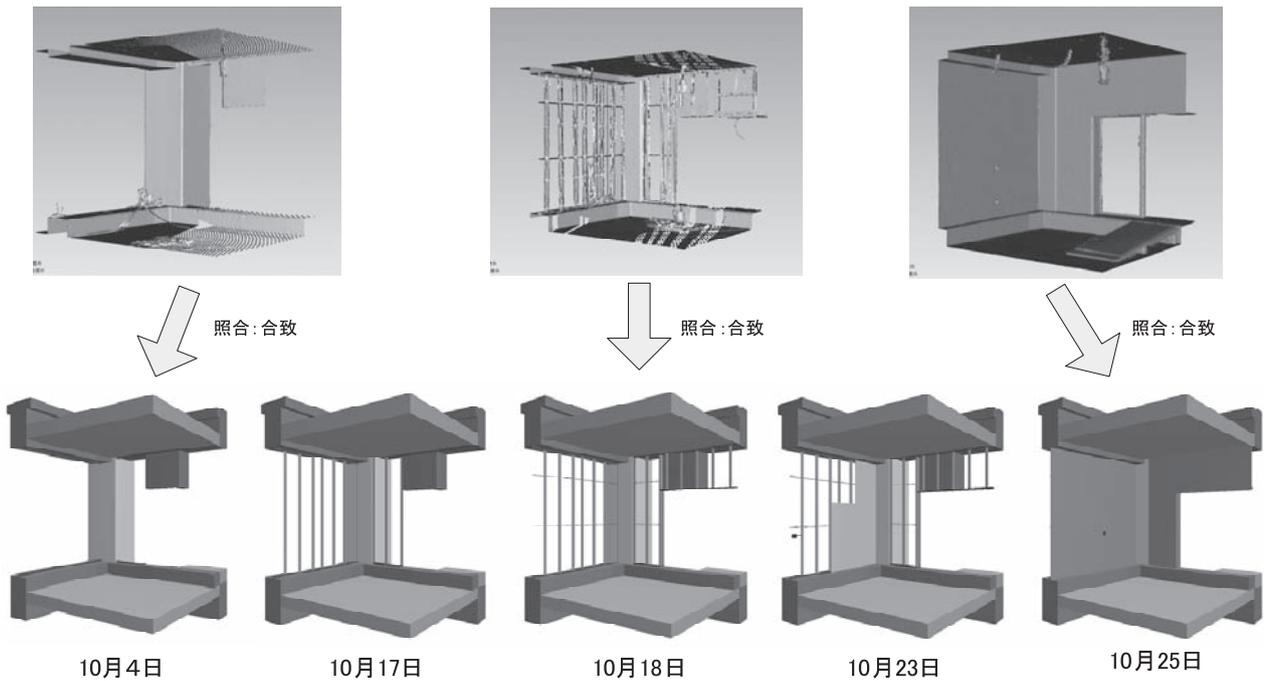
図一 10 は、基礎工事の進捗について、施工シミュレーションで各日程における施工の進捗の程度を撮影した写真と3次元的CG画像である。この両者の画像を比較すると、その進捗の程度を視覚的に確認することが出来る。写真画像と3次元CG画像については、その視野角度、撮影位置・方位を同じに設定することによって、全く同じ画像を得ることが出来るため、工事進捗を視覚的に判断する日常の管理方法となる⁹⁾。

図一 11 は、間仕切壁工事における軸組作業、ボード作業の進捗を示す3次元点群とそれぞれの進捗状況を示す3次元画像との比較を示した図である。

画像で示した施工シミュレーションの結果と実際の工事中に取得した3次元スキャナーの点群データを比較することによって、出来形が計画ではいつの時点の進捗状況になっているかを知ることが出来る。また、点群データと3次元CADに基づく出来形モデルとをコンピュータ内で比較することによって、どの部材が



図一 10 基礎工事の進捗状況の計画との比較



図一 11 間仕切壁工事における軸組作業とボード作業の進捗状況の計画との比較

施工済みであるかを判別することも可能であり、工事の進捗管理に役立てることが出来る。

況にはない。建設独自の技術開発がなければならない。

JICMA

6. おわりに

施工シミュレーションは、従来の生産性や稼働率を求める乱数シミュレーションから、工事の進捗状況を視覚的に再現することによって、工事計画や管理の手法としての地位を築きつつある。しかし、視覚的な表示を可能にするためには、建築物を構成する膨大な部材や工事に関連する機械や仮設資材の形状や位置を正確に入力する必要がある。

最近では、設計過程における BIM (Building Information Modeling) の理念に基づいた 3 次元 CAD の活用の動きも活発になっており、施工シミュレーションを容易にする環境が揃いつつあるが、設計段階と施工段階では必要とする 3 次元情報の詳細度や内容が異なるため、課題も多いと言える。

施工シミュレーションは、工事を実際に行う以前に、机上で「建設工事のリハーサル」を行うことであり、建設を経済的に且つ短工期で達成するには不可欠な手法であると言える。現段階では、施工段階における 3 次元情報の利用技術と施工シミュレーション技術が未熟であり、真の「建設工事のリハーサル」を行い得る状

《参考文献》

- 1) 田村恭, 嘉納成男: 工事計画のための支援システムに関する研究 (4) 工程計画グラフィックシステムの開発, 電子計算機利用シンポジウム論文集, 1984.03
- 2) 古賀和夫・山本裕一・他: 3次元CGを利用した工程シミュレーション, 大会, 1992.08
- 3) 嘉納成男, 他: バーチャル建設現場システムの開発・建築工事の可視化シミュレーション, 建築生産シンポジウム, 2003.07
- 4) 恵羅嘉男, 他: システムシミュレーション—GPSS入門, 1970, 日刊工業新聞社
- 5) A.Alan B. Pritsker: Introduction to Simulation and SLAM, John Wiley & Sons Inc, 1979
- 6) D.W.Halpin: An Investigation of the Use of Simulation Network for Modeling Construction Operations, PhD Dissertation, 1973, Univ. of Illinois
- 7) 石丸大介, 嘉納成男, 金炯垠: 建築生産における取付け順序推定, 情報システム利用技術シンポジウム論文集, 日本建築学会, 2006.12
- 8) 石岡宏晃, 嘉納成男: 3次元空間データを用いた作業干渉の解析に関する研究, 内装工事における作業干渉シミュレーション, 関東支部研究会, 2009.03 (掲載予定)
- 9) 金炯垠, 嘉納成男, 蔡成浩: 建築工事における写真画像とVR画像を用いた進捗管理に関する研究, 工事写真の撮影方法及び視点位置・方向の取得, 日本建築学会計画系論文集, 2006.01

【筆者紹介】

嘉納 成男 (かのう なるお)
早稲田大学
教授・工博

