

輸送シミュレーションシステム

— Route Master 4D —

TRANSPORT SIMULATION SYSTEM

— Route Master 4D —

安武 祐太^{*1}, 小林 修^{*2}, 中村 太三^{*2}, 永見 伶^{*2}
YASUTAKE Yuuta, KOBAYASHI Osamu, NAKAMURA Taizou and NAGAMI Rei

The authors have developed a three-dimensional (3D) transport simulation system that utilizes point cloud data and BIM/CIM information to improve productivity and quality in transport planning. The system reproduces the time-based movement of transport vehicles along the planned route together with the actual conditions at the scene in three dimensions. This enables users to visually identify potential interference between vehicles and surrounding structures. Applied to various construction sites in residential areas, and wind-power and other facilities, the system has assisted in making decisions on vehicle selection, route feasibility, and safety planning. This report outlines the features of the system and presents use cases in multiple projects.

Keywords : *Point Cloud, Simulation, BIM: Building Information Modeling, CIM: Construction Information Modeling 3D Model, Laser Scanner, Artificial Intelligence*

点群, シミュレーション, BIM/CIM, 3次元モデル, レーザースキャナ, 人工知能

1. はじめに

搬送経路および現場搬入の計画は、計画経験者の知見や判断により行われている。軌跡計画は2次元図面上で行われており、立体的なイメージがしづらく、支障物との位置関係を正確に把握することが難しい。課題としては、搬入経路の途中で狭い路地（写真1）がある場合など、2次元図面（図1）のみでは輸送経路全域の現況や実際の位置関係、上空にある構造物まで把握できないため、接触判断に限界があることである。そのため、運搬経路上の周辺構造物との接触を3次元的に検証し、車両走行を時間軸で可視化する4D（3D空間+時間軸）的な搬送計画の立案が可能なシステムが求められる。

本報では、開発した輸送シミュレーションシステムとその活用について報告する。市街地での一般車両（トラクタ等）による搬入計画、大型風力発電設備ブレードの輸送、施工前段階におけるBIMとの連携による干渉検証など、複数の現場に本システムを適用した。搬入可否

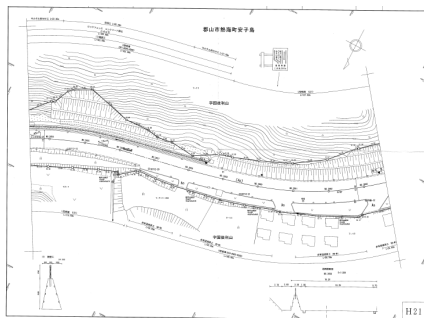


図1 2次元図面



写真1 狭い路地の例

の判断、接触リスクの把握、警備計画支援など、実務上の課題解決にどのように適用したかについて報告する。

2. 輸送シミュレーションシステムの構成

2.1 概要

本システムは、点群やBIM/CIM情報を活用して3次元空間を構築し、その中で輸送車両や積荷の動きを再現できるように開発した^{1,2,3}。本システムでは、車両および積荷が周辺環境と接触する箇所を自動的に特定し、輸送ルート上の接触リスクを迅速に把握することが可能となる。また、3次元空間上で任意の経路に対するさまざまな車両モデルの軌跡を自動生成し、計画の具体性が向上し、従来の手法では難しかった精度の高い搬入計画を効率的に策定できる。車両モデルの寸法や性能などを個別に設定することで、3次元での車両動作可視化により、接触リスクを把握し、実車両に近い挙動の再現が可能となった。これにより、計画検討の精度が向上した。

* 1 戸田建設(株)技術研究所 修士(工学)

* 2 戸田建設(株)本社土木ICT・AI推進部

Technology Research Institute, TODA CORPORATION, M.Eng.
 Civil Engineering ICT & AI Department, TODA CORPORATION

2.2 3次元空間の構築技術

本システムでは、輸送経路上の構造物や周辺環境を再現するために、主に次の二つの手法により3次元空間の構築を行っている。

(1) 点群データを用いた簡易BIMモデルの構築

道路や構造物などの現況を把握するため、点群データに基づいて3次元モデルを構築する^{1,2,3)}。まず、深層学習ベースのセグメンテーション技術を用いて、点群データから道路、電柱、ガードレール、看板、樹木などを自動的に分類し、それぞれに属性を付与する。(図2)

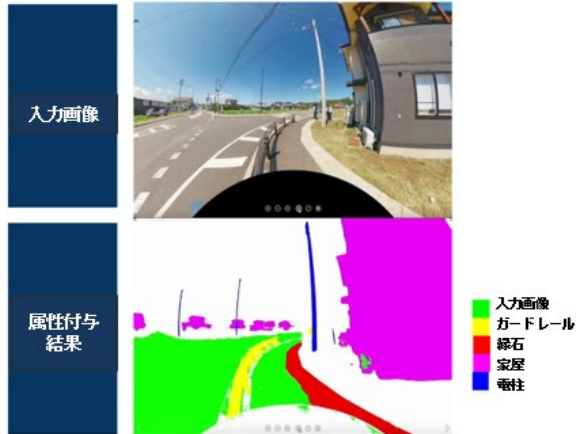


図2 点群の属性付与

本システムでは、セグメンテーションにより分類された点群に対して、建物の壁や床には平面フィッティング(図3)、曲面形状の道路にはメッシュ再編成(図4)、電柱や信号機のような定型構造物にはテンプレートフィッティング(図5)を適用することで、対象物の形状特性に応じた簡易BIMモデルの生成を行っている。

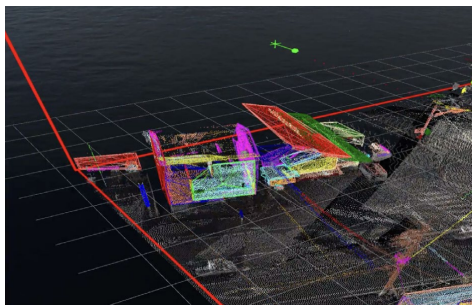
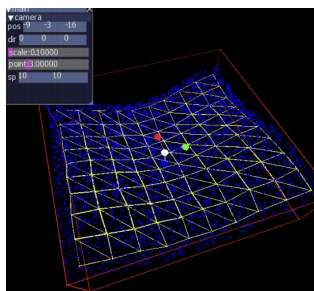
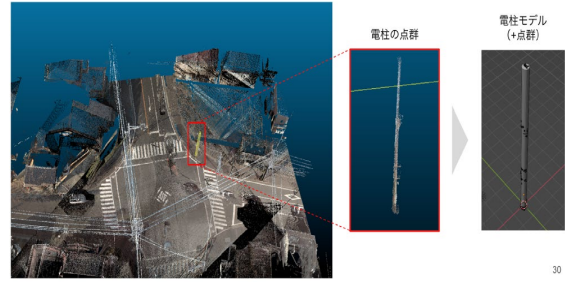


図3 建物の平面フィッティング



歪み具合に応じて格子状の面を張り付ける

図4 メッシュ再編成



電柱の点群に3Dモデルをフィッティングした実例

図5 テンプレートフィッティング

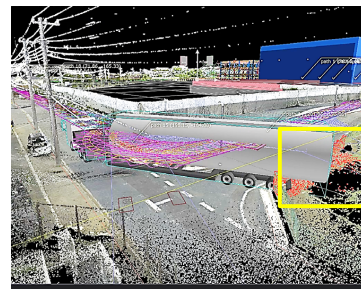
このようにして構築された簡易BIMモデルにより、高密度な点群データと比較して、ファイル容量や処理負荷の少ない軽量な空間データを得ることができる。

(2) BIMモデルのインポートと3点位置合わせ

施工前の構造物や仮囲い、建築予定物などについては、設計部門から提供されるBIMモデルを直接活用している。この場合、3次元空間内にBIMモデルを正確に配置するため、3点を基準とした位置合わせ手法を採用している。具体的には、BIMモデル側の基準点と、3次元空間内の対応点を3点選定し、それらをマッチングさせることで、モデル全体を高精度にマッピングする。これにより、点群とBIMが重畳された3次元空間が構築され、施工前の状態を再現したシミュレーションが可能となる。

2.3 自動経路生成機能

本システムの経路生成では、始点・終点および中継点を設定し、AIが支障物の少ない最適経路を自動探索する。中継点の工夫により、経路の精度と処理効率も高められる。車両モデルには、実際の輸送車両の寸法や操舵特性、軸構成といった諸元を反映しており、より現実に近い挙動を再現できるよう構築している。システム上では、軌跡を操作することで、車両がその軌跡に動的に追従して走行する仕組みを備えており、操舵や進行方向の変化に対する動作も自動で反映される。実際の点群データやBIM/CIM空間に設定された輸送軌跡と、車両情報を反映した3次元モデル車両を用いることで、正確な接触判定を行うことができる。(図6) また、シミュレーションの結果は、軌跡図や接触対象物の種別・件数といった集計結果として出力することもでき、輸送計画の検討作業を効率化し、精度の高い搬入計画の策定をする。



黄色枠内の赤い部分が接触箇所

図6 輸送軌跡を走行する3次元モデル車両

2.4 多視点ビューア機能

システムでは、視点を自由に変更できる3次元ビューアを搭載しており、全景視点、運転者視点、上空視点など、さまざまな角度から輸送状況を確認することが可能である。(図7) これにより、現場への搬入計画者や施主などの近隣に対して、視覚的に輸送経路を把握し、それぞれの立場で判断を下せるようになる。

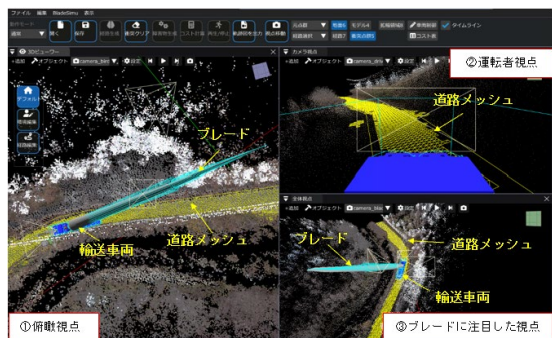


図7 多視点ビューア機能

2.5 路面接触シミュレーション機能

路面にタイヤを接触した状態で車両運搬の動的シミュレーションができる。一般的なシミュレーションは、道路勾配とは関係なく、水平として配置するものが多いが、本システムは、車両モデルのタイヤを路面の勾配に追従させることができる。(図8) これにより、傾斜地や段差のある搬入経路においても、高い精度で検証ができる。

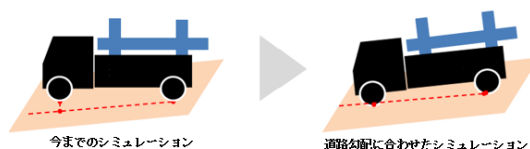


図8 車両のタイヤが勾配に合わせて路面に接触

2.6 スタック判定機能(空転)

スタック判定機能は、タイヤが地面に接触していない箇所を判定することができる。一例として、構台の乗り口の空転やテールが地面に接触した箇所を把握することができる。(写真2)



写真2 タイヤ非接地および車両後端の路面近接状態

3. 現場への活用事例

本章では、本システムを用いた実際の搬入計画事例について紹介する。対象現場の条件に応じて、搬入可否の検証や警備計画、車両選定など、シミュレーション結果をどのように活用したかを示す。

3.1 事例1: 市街地現場における搬入可否と警備計画

今回の検証では、街中で車や人通りの多い現場への搬入シミュレーションを実施した。(写真3) ①上り坂で現場内に長尺部材を搬入できるかの確認、②車と人通りの多い搬入現場での警備範囲の計画に活用した。

街中で点群収集には、約750gと非常に軽量で持ち運



写真3 搬入エリア状況

びが容易なレーザースキャナ Leica BLK360 G2 (写真4) を採用した。本機は、設置作業の手間が少なく、標定点を設置せずに測量ができる特徴があり高い機動力を発揮する。また、1回のスキャンにかかる時間は約20秒と短く、1カ所につき3~5回の測定を行った場合でも、10分程度で3次元測量を完了させることができた。今回の現場では、全体で21か所の点群データを取得し、それらをもとに6つのゲートからの搬入状況(図9)をシミュレーションして、搬入計画の妥当性を事前に確認した。



Leica BLK360 G2



赤丸は点群測定箇所、黄色長方形はゲート

写真4 レーザースキャナ

図9 現地敷地平面図

自動生成された最適な輸送経路上で、3次元モデル上の車両モデルを実際に走行させて、搬入可否を検証した。その結果、特に上り坂での搬入が困難になることが懸念されたが、全景からの俯瞰ビュー(図10)により、勾配を含めた地形全体を可視化でき、搬入が可能であることを確認した。点群データには、通行止め予定エリアに人物が映り込んでおり、これらは接触リスク箇所として赤く表示されているが、実際の車両自体の搬入には支障がないことが明らかとなった。一方で、ゲート後右上からの視点では、車両が一部対向車線にはみ出すことが判明し(図11)、この状況を踏まえた上で、対向車線を一時的に通行止めにする必要性の有無について事前に検討を行った。この検討結果は現場の安全性確保と交通管理の判断材料となり、警備体制や誘導員の配置計画の策定に活用された。

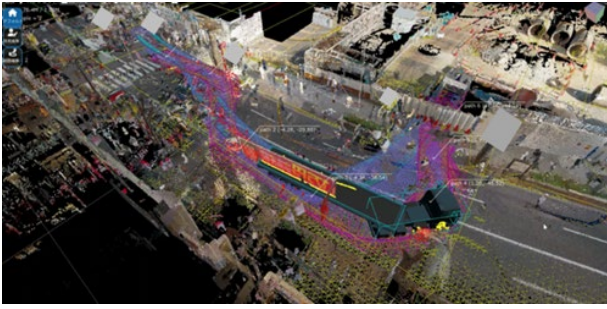


図 10 全景から搬入状況の確認

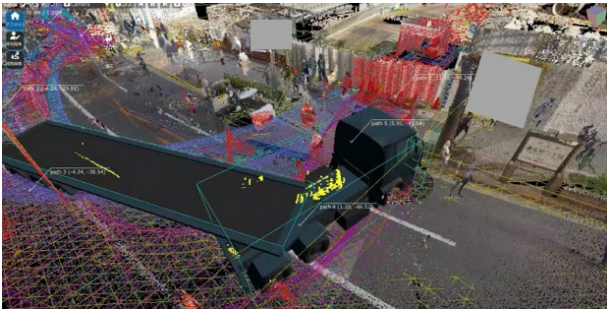


図 11 ゲート後方右上からの確認

3.2 事例 2：住宅街経路における通行可能車両の判別

現場への搬入路である街路で搬入シミュレーションを実施した。(図12) 経路は住宅街を通る、道幅が狭くカーブの多い街路であり、より大きな運搬車両を選定するためこのシステムを活用した。



図 12 現場への搬入路

シミュレーションの接触判定は、接触後は赤く表示される仕様である。そのうえで、3次元空間の輸送経路上で10tトラック車両モデルを走行させたところ、電柱に接触することが確認されたため、10tトラックでの輸送を断念した(図13)。接触箇所は視覚的に明示され、計画段階での情報として活用された。次に、8tトラック車両モデルにてシミュレーションを実施した結果、接触することなく輸送できることを確認した(図14)。車両の旋回動作や通過余裕も含めて問題がないことが確認され、輸送車両の通行には支障がないと判断した。関係者間でシミュレーションの結果を視覚的に共有しやすく、輸送計画車両選定に関する合意形成に役立った。



図 13 10tトラックによる輸送状況の確認

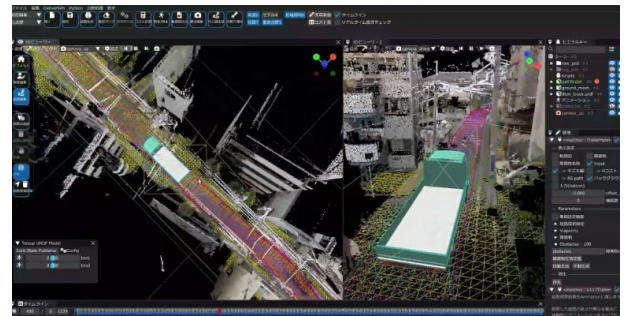


図 14 8tトラックによる輸送状況の確認

3.3 事例 3：BIMを活用した施工前段階での搬入計画支援

将来的に計画された施設において、搬入計画の検討を目的にシミュレーションを実施した。現場は市街地に位置し、周辺には住宅や狭隘な道路が点在していたため、搬入経路の確保には高い精度の事前検討が求められた。現況の点群データに加えて、将来構築する建物、搬入ゲート、仮囲い等の構造物をBIMデータとして挿入することで、完成後の状況を想定した環境を構築し、車両の走行時における接触状況を確認した(図15)。

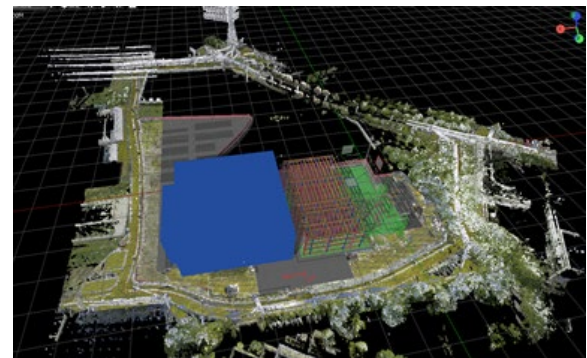


図 15 未施工の構造物をBIMモデルとして3次元空間に配置

車両モデルを用いてシミュレーションを実施した結果、計画中のゲート搬入時にポール、ガードレール、樹木との接触が確認された(図16)。また、搬出時には樹木への接触が確認された(図17)。接触箇所は可視化されており、対象物ごとの影響範囲を直感的に把握することができた。これらのシミュレーション結果を踏まえ、施工後の環境を考慮した輸送計画を策定する際の検討材料にできた。

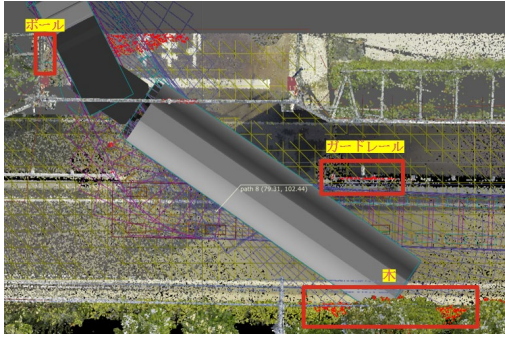


図 16 搬入時のシミュレーション

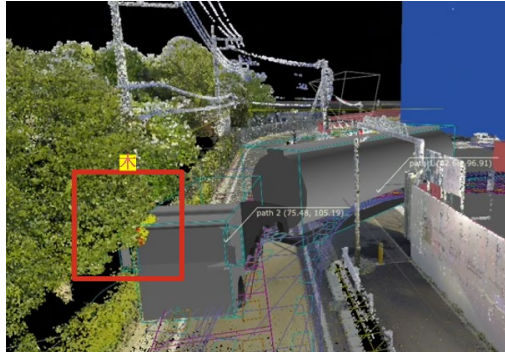


図 17 搬出時のシミュレーション

3.4 事例 4：風力発電設備の輸送

風力発電工事において風力部材の輸送は、特に注意深く検討する必要がある工程の一つであり、その理由として、風力発電設備の部材は長大、あるいは高さがあるものが大半であることが挙げられる。これらの特性により、輸送経路上のさまざまな構造物との干渉リスクが高く、事前に十分な計画が求められる。本検討では、この風力部材の輸送検討に当該システムを適用し、部材の干渉の可否に基づくルート検討を行ったうえで、道路拡幅や既設設備移設の計画を実施した。シミュレーションを実施した箇所は、道路上に歩道橋が横断している地点であり、輸送の可否を判断する上で重要な検討対象となった（写真5）。



写真5 シミュレーション箇所 歩道橋状況

歩道橋の下をシュナーベル式トレーラー（長尺物や重量物の輸送に用いられる特殊車両で、荷台の高さが低く抑えられている）が通過する際に、歩道橋と風力発電設備のタワー部材が高さ方向で干渉することが計画の段階で懸念されたため、シミュレーションを実施した。シュナーベル式トレーラーは、一般的な低床トレーラーでは

輸送時に車両全高が道路法の高さ制限を超える長尺部材の輸送に適しており、本輸送においてもタワー部材の全高を制限内に収める目的で選定されている（図18）。

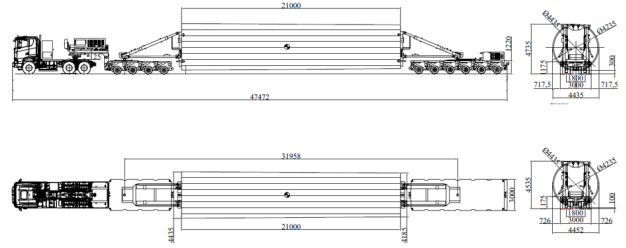


図 18 シュナーベル式トレーラー部材積載図

シュナーベル式トレーラーをシミュレーション上で走行挙動を再現し、経路上の歩道橋との干渉の有無を確認した。対象地点では、車両に積載した部材の高さが歩道橋の下端に近接しており、輸送時のクリアランスが極めて小さく接触のリスクが懸念された。本車両には、走行途中で積載高さを調整するような昇降機構が備わっていないため、シミュレーションにおいては、部材底面のGL（地盤面）からの高さ条件を10mmずつ段階的に変化させて複数パターンを検討した。その結果、路面との干渉を避けつつ、歩道橋との接触が生じない範囲を把握し、通過可能な高さ条件を定量的に確認することができた。また、軌跡図作成の効率が従来比で約10倍向上した。図19は歩道橋を通過する車両全体の様子を示しており、図20は黄色枠で示した搬送物と歩道橋の隙間を拡大表示したものである。

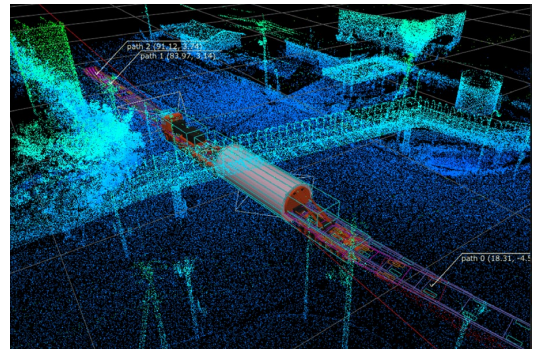
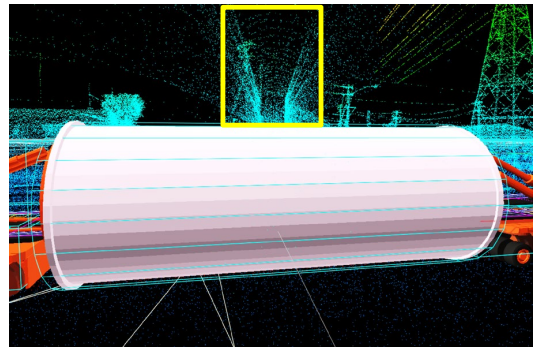


図 19 シミュレーション状況 遠影



黄色枠内に輸送物と歩道橋の離隔を確認

図 20 歩道橋通過時の交差部 近影

4. まとめおよび今後の展開

本報では、点群データおよび BIM/CIM 情報を活用した 3 次元輸送シミュレーションシステムの開発と、4 つの現場への適用結果を報告した。本システムは、実測点群や設計 BIM をもとに現実空間を高精度に再現し、車両・積荷の動的挙動を可視化できる点を特徴とする。これにより、2 次元図面では困難だった立体的な経路把握や接触リスクの抽出を可能とし、搬入可否や車両選定、警備計画など多様な判断支援に寄与した。

市街地、住宅街、施工前段階、風力発電設備の 4 事例を通じ、3 次元的な干渉検証により「通行可否」「安全範囲」「最適車両」「クリアランス条件」を定量的に把握できることを確認した。また、軌跡図作成工数は従来比 1/10 に削減され、計画検討や関係者間の合意形成を大幅に効率化した。

社内での利用拡大を目的として BPO (Business Process Outsourcing) を通じて各部門に結果を提供するとともに、ユーザ自身が操作可能なインターフェースへの改良を進める。これにより、輸送計画業務の効率化と技術支援を促進し、建設業界におけるデジタルトランスフォーメーション (DX) およびグリーントランスフォーメーション (GX) の推進に貢献していく。

参考文献

- 1) 安武祐太, 石本幸暉, 佐藤海斗 陸上風力発電設備輸送シミュレーション システム～セグメンテーション技術を活用した自動モデリング～, 日本建築学会大会学術講演梗概集, PP. 187-188, 2024. 9
- 2) 吉田勇介, 中村太三, 八代成美, 北田敦也, 西宮直志 陸上風力発電設備輸送シミュレーションシステムの開発 (その 1) -市街地での輸送シミュレーション-, 令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会, VI-72, 2024. 9
- 3) 小林修, 安武祐太, 石本幸暉, 佐藤海斗 陸上風力発電設備輸送シミュレーションシステムの開発 (その 2) -山間部での輸送シミュレーション-, 令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会, VI-73, 2024. 9