

# 鉄道事業者のサステナビリティに貢献する無線解析ソリューション

後藤健太郎\*  
Kentaro Goto  
川手竜介†  
Ryusuke Kawate  
間宮拓朗‡  
Takuro Mamiya

小林裕二\*  
Yuji Kobayashi  
板谷建郎§  
Takeo Itaya

Advanced Radio Analysis Solutions for Railway Applications  
Contributing to Sustainability of Railway Operators

\*交通事業部  
†通信システムエンジニアリングセンター  
‡情報技術総合研究所  
§コミュニケーション・ネットワーク製作所

## 要 旨

鉄道事業者では設備削減や保守省力化を背景に無線式の列車制御システムを採用している。運行管理や保守のデータ利活用でも無線による情報伝送が重要になっている。

三菱電機は無線式列車制御のほか、自営網無線の大容量化・干渉対策や5G(第5世代移動通信システム)／ローカル5Gとの連携動作の開発を進めている。また、鉄道用無線システムの安定稼働のため、設計作業効率化と無線品質確保を目的に“電波見える化”シミュレーションによって無線基地局配置を検証・評価するシステムを開発した。これは設置後の現地試験や運用時の無線モニターとしても活用できる。さらに、三次元マップと沿線点群データの連携・高度化や、設計・試験・運用・保守に対応した循環型の無線解析ソリューションの実用化を進めて、鉄道事業者のサステナビリティに貢献する。

## 1. ま え が き

鉄道システムでは、運行管理、列車制御、旅客案内などの情報の伝達は安全・安定輸送の確保に重要である。以前から、列車制御システムでは閉そく区間(安全確保のため、他の列車の進入を防止して列車の衝突を回避する線路上の一定区間)を確保して進路を制御し、また、鉄道沿線に自営の情報ネットワークを構築して情報伝送を行うなど、外部からの妨害防止も考慮して有線による情報伝送が広く行われている。

一方、地上・車上間の情報伝送は移動体のため有線での接続が難しく、1960年代から空間波やLCX(Leaky Coaxial Cable)による列車無線が普及している。また、列車保安装置のATC(Automatic Train Control)では、レールから速度制御情報の送信、地上のトランスポンダから位置情報の送信などを行い、車上の受信器で受信する伝送路も活用している。情報処理・伝送技術の進歩によって、1990年代に列車制御に無線を利用する取組みが進められ、米国のIEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers)で規定されたCBTC(Communications-Based Train Control)や、国内では東日本旅客鉄道(株)のATACS(Advanced Train Administration and Communications System)の開発が行われて、2000年代以降に実用化された。無線式の列車制御システムでは、地上設備が削減でき、メンテナンス業務の軽減も期待できるため、省力化・省人化のニーズから展開されている。

海外では、アジアの主要都市を中心に人口増加や交通渋滞から都市鉄道の需要は多く、各地で新線開発が進んでおり、CBTCによる自動運転が普及している。欧州では、ERTMS/ETCS(European Rail Traffic Management System/European Train Control System)のレベル3として無線式列車制御が計画され、また、鉄道用無線システムとして、従来のGSM-R(Global System for Mobile communications-Railway)の後継となるFRMCS(Future Railway Mobile Communication System)の開発が進められている。このように、鉄道では列車制御のほか、運行管理や機器の稼働状態監視、メンテナンスなどのデータ伝送の分野でも無線技術の適用が拡大している。

当社では、鉄道分野での無線技術の適用拡大のため、無線式列車制御システムのほか、自営網無線の大容量化・干渉対策や5G／ローカル5Gとの連携動作の開発を進めている。鉄道用無線システムの安定稼働のため、設計作業の効率化と無線品質の確保を目的に、“電波見える化”シミュレーション技術<sup>(1)</sup>を活用して無線基地局などの設備配置を検証・評価するシステムを開発した。このシステムは無線基地局設置後のフィールド試験や運用開始後の無線モニターとしての活用も期待できるため、3Dマップと当社のMMSD(Mitsubishi Mobile Monitoring System for Diagnosis)<sup>(2)</sup>のデータとも連携させて、設計・試験・運用・保守を一元的に対応できる循環型の無線解析ソリューションとして実用化を進めている(図1)。

本稿では、鉄道事業者のサステナビリティにも貢献する無線解析ソリューションとして、“電波見える化”シミュレーション技術、電波伝搬シミュレーションの適用事例、無線解析に関するシミュレーションの高度化への取組みについて述べる。さらに、鉄道用無線解析技術の今後の展望について述べる。



図1. 鉄道事業者のサステナビリティに貢献する無線解析ソリューション

## 2. 無線解析ソリューションの技術

この章では、無線解析ソリューションを実現する技術として、“電波見える化”シミュレーション技術について述べて、電波伝搬シミュレーションの無線基地局の置局設計への適用事例を述べる。さらに、MMSDの点群データを活用した効率的なモデル作成など、無線解析に関するシミュレーションの高速化、高精度化への取組みについて述べる。

### 2.1 “電波見える化”シミュレーション技術

無線機器の電波伝搬損失を求める手法としては奥村-秦式<sup>(3)(4)</sup>のような実測データから構築された統計モデルが簡便であり、各種無線システムのエリア設計などに幅広く活用されている。奥村-秦式では、開放地/郊外/中小都市/大都市等の類型化された統計モデル(数式)を用いて電波伝搬損失を推定できる。しかし、実際に鉄道無線システムで推定を行う環境は、単一のモデルでは表せないほど多様で複雑であることが多い。具体的には駅周辺は都市開発によって大きなビルが立ち並んで、駅から離れるとビルが少ないといったケースなどである。そこで当社は、実環境の3Dモデルを作成・使用して電波伝搬損失を光線近似で計算し可視化する電波見える化技術(シミュレーション手法)を自社開発し、継続的に改良を加えて無線システムの設計、保守等に役立てている。

当社では、電波伝搬損失の計算方法にはレイトレーシング法<sup>(5)</sup>を用いているため、電波の波長に比べて十分大きな物体や空間に対して電磁界理論に基づき高精度に推定できる。レイトレーシング法では、図2に示すように、電波を光線で表現し、送信アンテナから電波を発射する代わりに光線を発射し、その軌跡を追跡する。また、地面や建物で電波が反射・回折する物理現象は、光線の反射・回折に近似して解析が実行される。さらに、地面や建物の電気特性や形状を考慮して電磁界の変化を算出しており、多種多様な実環境を反映した推定が可能である。レイトレーシング法で使用する実環境の起伏や建物等を考慮した3Dモデルの作成には、実環境を正確に模擬するデータが必要不可欠であり、地形データには国土地理院が発行する数値標高モデルを、建物データには市販の電子住宅データを用いている。なお、この3Dモデルの作成要領については、2.2節(1)で詳述する。

### 2.2 電波伝搬シミュレーションによる無線基地局の置局設計

無線式列車制御システムで、無線基地局の置局設計は、最も重要な設計の一つである。器具箱や機器室、アンテナを取り付ける鋼管柱、同軸ケーブル等は、敷設後に弱電界等の問題が判明した際、追加や移設に莫大(ばくだい)な費用や時間

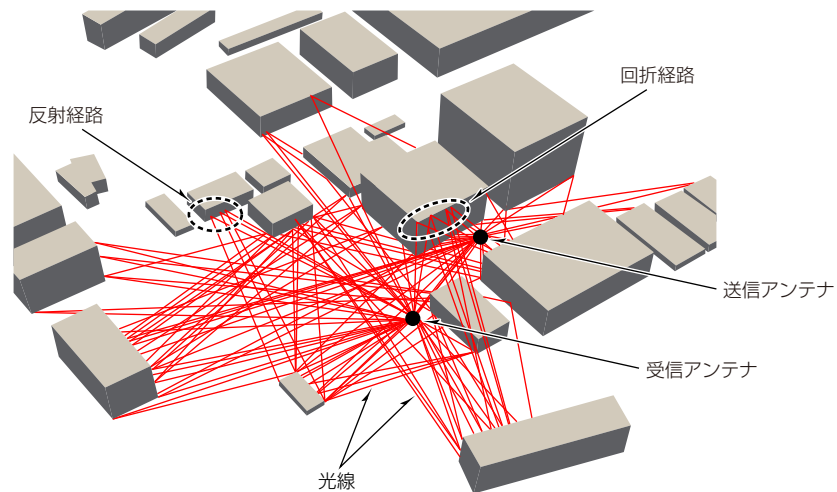


図2. レイトレーシング法の概要イメージ<sup>(1)</sup>

が必要になる。敷設前の設計段階で、詳細な電波伝搬シミュレーションによる置局設計は、敷設後の問題を極力少なくすることを目指している。電波伝搬シミュレーションは、次の手順で実施している。

- (1) モデル作成
- (2) パラメーター設定
- (3) シミュレーション実施
- (4) 結果表示

図3に電波伝搬シミュレーションの手順の一例を示す。

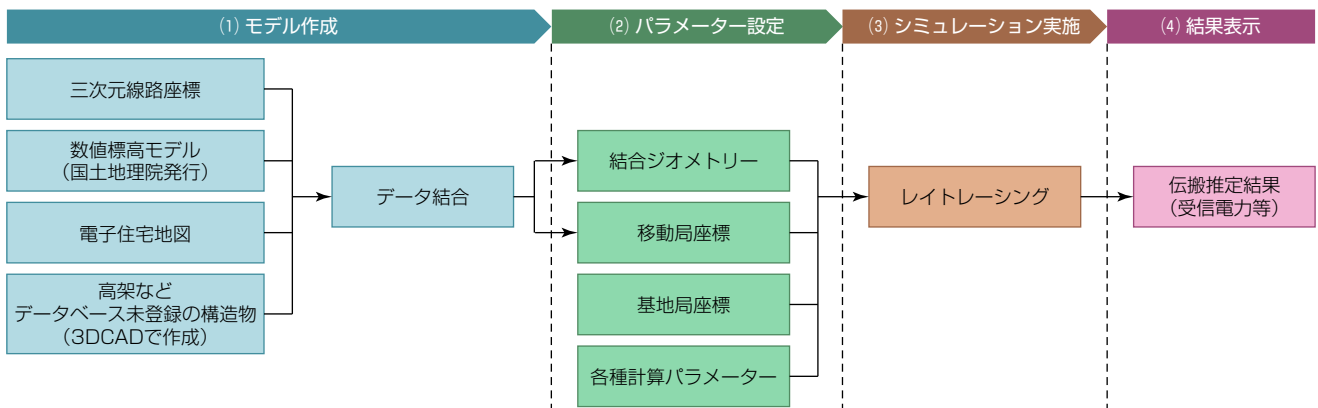


図3. 電波伝搬シミュレーションの手順の一例(市街地3Dジオメトリーを用いた計算機シミュレーション)<sup>(1)</sup>

(1) モデル作成

電子地図データ等を活用してジオメトリー(3Dモデル)を作成する。レイトレーシング法で使用するジオメトリーは、電波伝搬モデルの精度を向上させるため、実環境を正確に模擬するデータが必要不可欠である。市街地3Dジオメトリーは、地形、建物、線路などの要素から成り立っており、これらのデータを組み合わせてジオメトリーを作成する。

地形は、図4に示すように、国土地理院が発行する5m解像度の数値標高モデルを用いる。

建物は、市販の電子住宅データを取り込んでいる。ただし、駅舎や線路上を跨(またが)る道路のデータは存在しないため、3Dモデル作成ツールを用いて、駅情報や航空写真等を参照して作成する。

線路は、図5に示すように、電子住宅データから線路の位置を抽出している。

(2) パラメーター設定

鉄道環境での電波伝搬では、アンテナの放射パターンやアンテナ設置角度等を反映することで様々な線路形状に対応しつつ高精度な電波伝搬の推定が可能である。さらに、実環境の電波伝搬特性に近づけるため、送信電力、距離減衰、反射係数、回折係数、建物の複素誘電率、送信周波数等の設定をすることを可能にしている。

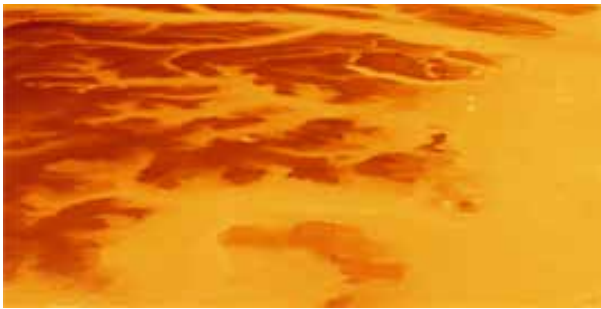


図4. 数値標高モデル(国土地理院)

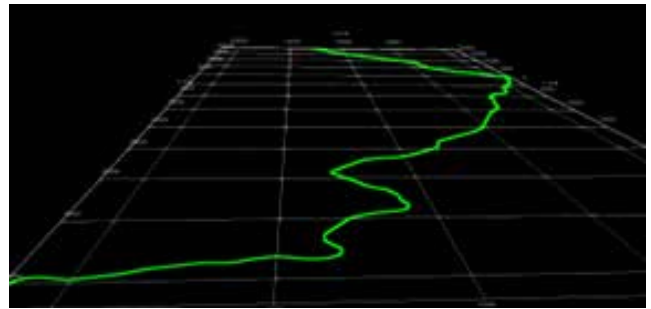


図5. 線路データ<sup>(1)</sup>

(3) シミュレーション実施

図3に示すように、(1)(2)で作成したデータを用いて計算機によるシミュレーションを実施し、受信電力の結果を得る。

(4) 結果表示

シミュレーション結果の可視化方法は、図6に示すような電波の強弱を色彩で3D出力する方法と、図7に示すような横軸を列車の走行位置(キロ程)に変換し、縦軸を電波の強弱にしてグラフとして出力する方法がある。前者では、電波の強弱をジオメトリ上で位置で示すことができ、直感的に大まかな強弱の分布を把握するのに適している。後者では線路に沿って複数の地上側の無線機からの出力レベルを重ねてプロットし、受信電力の詳細を考慮した回線設計をすることが可能になる。

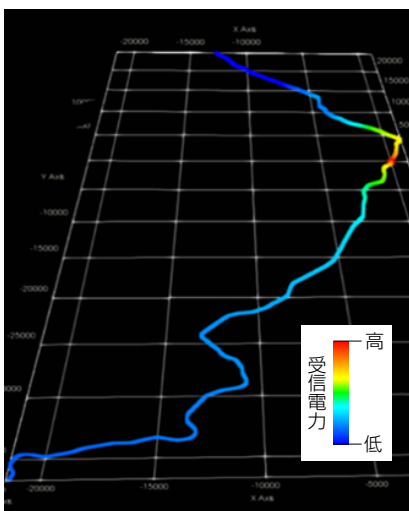


図6. 色彩でマッピングした3D市街地モデル<sup>(1)</sup>

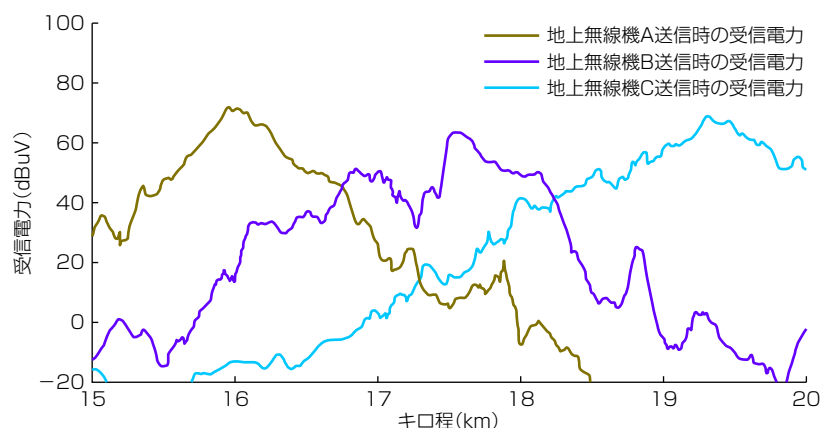


図7. 強度でマッピングしたキロ程グラフ<sup>(1)</sup>

2.3 シミュレーションの高速化、高精度化への取組み

鉄道無線システムはエリアが広範囲に及ぶため、設計作業や保守作業の作業量が膨大になる。これらの作業時間の短縮にはシミュレーション技術の更なる高速化と高精度化が有効であり、その取組みを進めている。例えば、電波伝搬損失を計算するレイトレーシング法については、演算量が多いため、送信点から発射する光線群の角度範囲と角度分布の制御に更なる工夫を加えて高速化を試みている<sup>(6)</sup>。また、全受信点のうちレイトレーシング法で受信電力を計算する受信点を疎として点数を減らして、残りの大半の受信点の受信電力は、機械学習を活用した電波伝搬損失推定モデルで補間する高速化手法を開発中である<sup>(7)</sup>。

また、MMSDの点群データを活用して3Dモデルを効率的に作成し、シミュレーションを高度化する取組みも進めている<sup>(8)</sup>。ここでは、MMSDを活用した効率的で高精度な沿線モデルの作成と、ローカル5Gエリアシミュレーションの事例を述べる。

### 2.3.1 MMSDによる沿線モデルの作成

2.2節で述べたとおり、駅舎は電子住宅地図データには存在しないため、従来は航空写真等を参照してモデルを作成していた。しかし、航空写真や構内図等だけでは、正確な電波環境を再現できるモデルの作成には限界があった。駅構内には、売店や事務室、柱、階段、エレベーター、エスカレーター等の設備があり、これらは電波の遮蔽物になるため、高精度な電波伝搬解析を行うためにはこれら構造物を含めた3Dモデルを作成する必要がある。

そこで、当社のMMSDで走行して取得する3D点群データを活用して詳細な駅舎モデルを作成し、シミュレーションを実施した。図8に3D点群データを取得するMMSD車両を示す。図9に点群データを活用したシミュレーション用の駅詳細モデルの作成例を示す。図9(a)に示す点群データと駅詳細モデルAのデータを加工して、(b)に示すシミュレーション用に適した駅詳細モデルBを生成する。

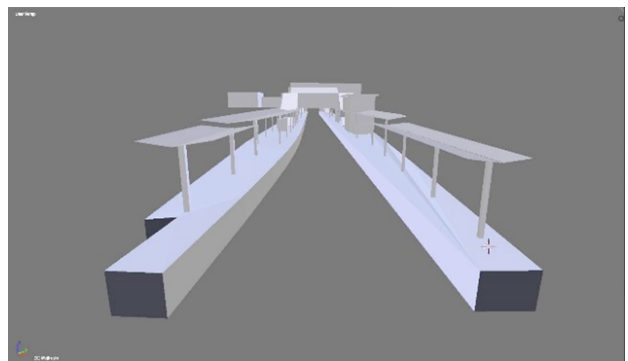
図10では、この駅詳細モデルBを利用してシミュレーションしている。駅ホーム区間での電界測定結果及び駅詳細モデルなし／駅詳細モデルありで比較したグラフを示す。駅詳細モデルがない場合、遮蔽物が少ないことから電界強度が高くなっていることが読み取れる。一方、駅詳細モデルがある場合、遮蔽物がある分電界強度が低く、電界測定結果にも近くなっていることが分かる。MMSDの点群データを活用した正確なモデル化によって、駅構内の詳細な電波伝搬シミュレーションが可能になり、より精度の高い置局設計が可能になる。



図8. 3D点群データを取得するためのMMSD車両



(a) 点群データ+駅詳細モデルA



(b) (a)から作成したシミュレーション用の駅詳細モデルB

図9. 点群データを活用したシミュレーション用の駅詳細モデルの作成例

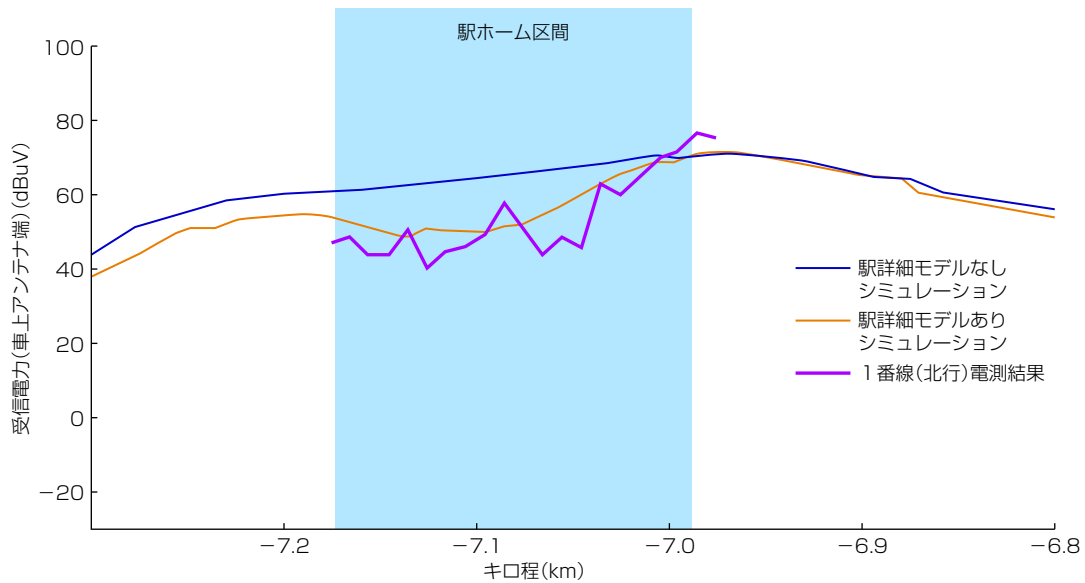


図10. 駅ホーム区間での電界強度グラフ

### 2.3.2 MMSDでのローカル5Gエリアシミュレーション

これまで述べてきたシミュレーション手法は、昨今、活用が注目されているローカル5Gのエリアシミュレーションでも適用できる。次にその事例を述べる。

ローカル5Gは基地局1局のカバーエリアが数百m程度と非常に狭く、基地局設置数が増える(=費用が増える)課題があることから、できるだけ少ない基地局で必要なエリアをカバーすることが求められる。また、ローカル5Gは自己の敷地内での使用が法律で義務付けられており、他者の敷地に電波が漏洩(ろうえい)しないようにカバーエリアを設計する必要がある。そのため、ローカル5Gエリアシミュレーションには、先に述べた要件を満たして、最小数の基地局での最適なカバーエリア設計が必要になる。

ローカル5Gエリアシミュレーションの手順を次に述べる。基本的なシミュレーション手順は、2.2節に述べた無線基地局の置局設計シミュレーションと同様で、以下の(1)~(3)の順にシミュレーションを実施する。

- (1) モデル作成
- (2) パラメーター設定
- (3) シミュレーション実施と結果表示

ローカル5Gの特徴として、それぞれ次の点に注意する必要がある。

- (1) モデル作成

鉄道向け無線システムのカバーエリアの設計は、線路上の受信位置(キロ程)とその位置での受信電界強度を使用して行うことが一般的である。しかし、ローカル5Gは他者の敷地に電波が漏洩しないようにカバーエリアを設計するため、線路以外の場所(他者の敷地)についてもエリアシミュレーションで受信電界強度を確認する必要がある。

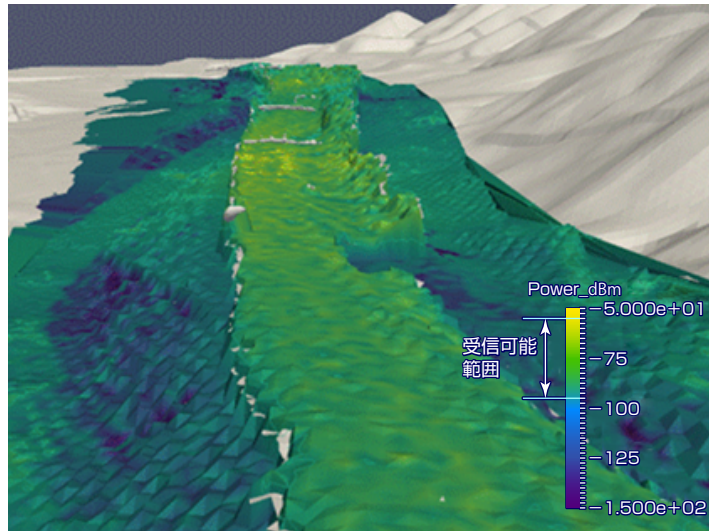
- (2) パラメーター設定

他者の敷地への電波の漏洩度合いを確認するため、線路とその周辺の地形に対して精度の高い3Dモデルを作成し、シミュレーションを行う必要がある。この条件を満たすため、MMSDによる線路内の点群データの活用や、構造物による反射・透過・回折のパラメーター設定を行い、3Dモデルを作成する必要がある。

- (3) シミュレーション実施と結果表示

シミュレーション結果は、線路以外の場所についても電界強度の可視化が必要になる。実際のシミュレーション結果を図11に示す(事例は道路上のローカル5Gエリアシミュレーション結果である)。

今後、鉄道向けにローカル5Gの導入が加速すると考えられ、効率的かつ高精度なローカル5Gエリアシミュレーションを実施する必要がある。当社はこのローカル5Gエリアシミュレーションを使用することで、最小数の基地局で最適なカバーエリアを提供する鉄道向けローカル5Gシステムの実現に貢献する。



出典：国土地理院ウェブサイト(<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>)  
 数値標高モデル(国土地理院)を基に当社作成

図11. シミュレーション結果(道路の事例)

### 3. 今後の展望

鉄道システムでの無線技術の応用は、列車制御のほか、運行管理やメンテナンスなどのデータ利活用でも重要性が増しており、今後も適用範囲が拡大していくと考えられる。無線は鉄道のような移動体通信に適している。技術革新によって伝送容量・伝送速度は飛躍的に向上し、サイバーセキュリティ対策など情報の秘匿性も高くなり、利便性も高まっている。

2章では、主に、設計や試験に活用できる鉄道用無線解析に関するシミュレーション技術を述べたが、これらの技術は設備稼働後の運用や保守への応用・展開も可能であり、現在、取り組んでいるところである。

今後、無線通信のログデータや現地環境データ(沿線設備状況や実際の電界測定データ)を精度良く取り込んで、データ分析することによって、電波環境監視や電波環境変化予兆への活用も期待できる。設計、試験、運用、保守をサイクルとして、設備設置後の運用、保守から得られるデータ・知見を、次の設計、試験にフィードバックすることで、循環型の無線解析ソリューションを実現し、更なる高度化を目指す。

### 4. むすび

鉄道分野での無線解析ソリューションとして、“電波見える化”シミュレーション技術、電波伝搬シミュレーションの適用事例、無線解析に関するシミュレーションの高速化・高精度化への取り組みについて述べて、さらに鉄道用無線技術の今後の展望について述べた。

無線技術は、今後も鉄道の様々な業務領域に展開され、応用範囲が拡大することが見込まれる。通信品質を担保し、安定した稼働を維持するための無線解析ソリューションを提供し、持続的な鉄道の安全、安心、安定輸送を実現して、鉄道事業者のサステナビリティに貢献したい。

### 参考文献

- (1) 山形卓矢, ほか: 鉄道無線用電波見える化技術の開発, 第57回鉄道サイバネ・シンポジウム (2020)
- (2) 須合健一, ほか: “MMSD”を活用した鉄道沿線設備・施設の計測・解析サービス, 三菱電機技報, **94**, No.12, 674~677 (2020)
- (3) Hata, M.: Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services, IEEE Trans. Veh. Technol., **29**, No.3, 317~325 (1980)
- (4) 奥村善久, ほか: 移動通信の基礎, 社団法人 電子情報通信学会 (1986)
- (5) 今井哲朗: 電波伝搬解析のためのレイトレーシング法, コロナ社 (2016)
- (6) 岩谷茉衣子, ほか: 市街地環境におけるレイトレーシング法の高速度化の検討, 2023年電子情報通信学会総合大会, B-1-26 (2023)
- (7) 清水健矢, ほか: 市街地環境におけるセマンティックセグメンテーションを活用した伝搬損失推定, 2023年電子情報通信学会総合大会, B-1-48 (2023)
- (8) 清水健矢, ほか: 鉄道環境における点群データを用いた3次元モデリング, 2022年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-9 (2022)