

東海道新幹線におけるミリ波方式列車無線の開発

—新幹線トンネル内のミリ波電波の伝搬特性—

丹下 智之* 松村 善洋 笹木 栄志 西山 武志 (東海旅客鉄道株式会社)
井倉 裕之 荒川 智樹 (日本電気株式会社)

Development of Train Radio System Utilizing Millimeter Wave on Tokaido Shinkansen:
Propagation Characteristics in Tunnel
Tomoyuki Tange*, Yoshihiro Matsumura,
Eishi Sasaki, Takeshi Nishiyama, (Central Japan Railway Company)
Hiroyuki Igura, Tomoki Arakawa (NEC Corporation)

A train radio system utilizing leaky coaxial cables has currently been used for communication between ground and onboard on Tokaido Shinkansen. To have high-capacity communication link for safety and stable operation and efficient maintenance, Central Japan Railway Company has developed new train radio system utilizing millimeter wave. This paper describes results of measurements to have millimeter-wave propagation property in tunnels on the Shinkansen.

キーワード: 45GHz, ミリ波, 無線通信, 新幹線, 列車無線, トンネル
(45GHz, Millimeter-Wave, Wireless communication, Shinkansen, Train radio, Tunnel)

1. まえがき

東海道新幹線は、次期列車無線に 45 GHz 帯のミリ波を用いた方式を採用する予定である⁽¹⁾。ミリ波帯は従来の UHF 帯の鉄道無線に比べて広い周波数帯域を確保できるため、大容量通信に適している⁽²⁾⁽³⁾。

東海道新幹線は直線や緩い曲線区間が多いので、ミリ波方式列車無線に指向性の高いアンテナを採用し、電波到達距離を伸ばすことで地上局数を削減し、導入コストの低減を図っている⁽⁴⁾。

曲線区間においては、線路が直線的なエリアの外に出してしまうことから通信可能範囲が短くなるが、鉄道沿線で通信実験を行った結果とシミュレーション評価により、最適な地上局配置を検討してきた⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

車両基地など、狭い範囲に電波遮蔽物となる列車が多編成留置されている箇所においては、リフレクタを用いて、ミリ波帯の電波の通信エリアを適切に構築する方法に着目し、少数の地上局で車両基地の留置列車全てと通信する方法が実現できることを、レイトレースシミュレーションおよび実測により示した⁽⁷⁾。

トンネル区間については、これまでに 50GHz 帯の基礎的な伝搬試験が東海道新幹線の新丹那トンネルにおいて行われている⁽⁸⁾本稿では、次期列車無線で採用する 45GHz 帯の

電波を用いて、東海道新幹線に存在するトンネル内の伝搬特性を測定した結果について報告する。

2.測定対象のトンネルの選定

東海道新幹線のトンネル区間における 45GHz 帯電波の伝搬特性の測定は、東海道新幹線内で最も長いトンネル内直線区間を持つ新丹那トンネルと、東海道新幹線内で最も長いトンネル内曲線区間を持つ南郷山トンネルで実施した。

新丹那トンネルでは過去に 50GHz 帯の伝搬試験が実施されている⁽²⁾が、周波数の異なる 45GHz 帯のトンネル内直線区間における伝搬特性を正確に把握するために、測定対象トンネルとして選定した。

南郷山トンネルは、新丹那トンネルでの測定では得られないトンネル内曲線区間における伝搬特性を把握するために測定対象トンネルとして選定した。

3.新丹那トンネルにおける伝搬試験

〈3・1〉新丹那トンネルの特徴 新丹那トンネルの形状を図 1 に示す。このトンネルは、熱海駅と三島駅の間であり、東海道新幹線の中で最長の 7,959m を有する。

トンネル内には、両端の約 240m の曲線区間を除いて、

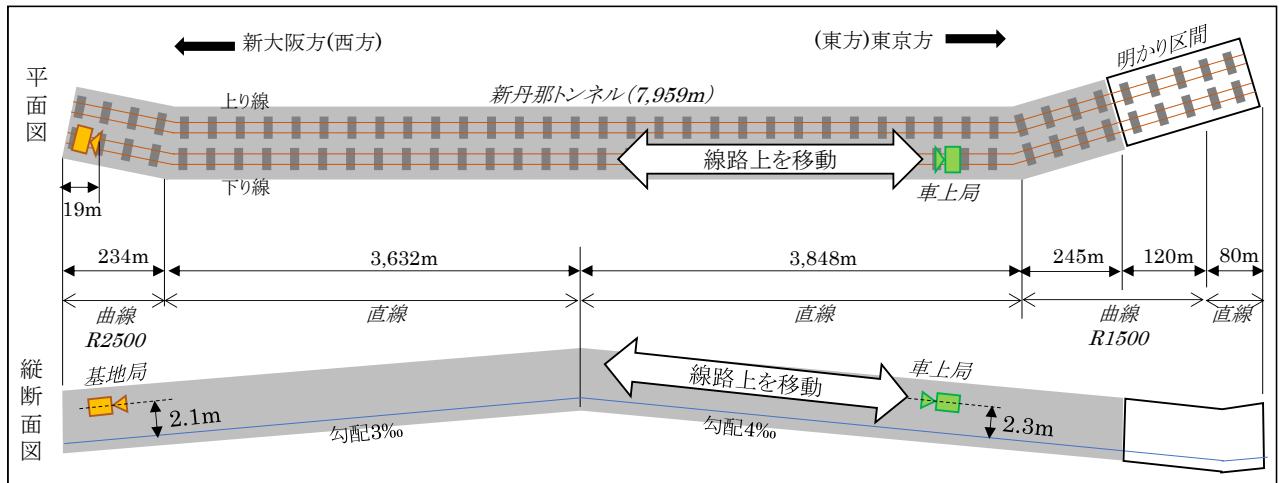


図 1 新丹那トンネルの形状と測定機器の配置

Figure 1. Geometry and Equipment Layout of Shin-Tanna Tunnel

7,480mの直線区間があり、トンネルの中央部に凸型の勾配の変化点がある。新大阪方の坑口からトンネルの中を眺めると、凸型の勾配変化点付近までの約 4,300mが見通し区間、それより向こうは見通し外区間となる。

〈3・2〉測定機器の諸元と配置 測定には、表 1 に示す諸元を有する無線機を用いた。無線機は、次期列車無線で使用予定の無線機と同等の周波数の電波の送受機能とアンテナ利得及び半値角を持ち、受信電界強度の測定機能を有している。

表 1 新丹那トンネル測定時の無線機の諸元

Table 1. Radio Performance on Shin-Tanna Tunnel

送信電力	10dBm(10mW)
周波数	45GHz帯
アンテナ利得	33dBi(レンズアンテナ)
アンテナ半値角	約3度

地上側の無線機（以下、基地局という）は、トロ上のアルミラックの上に設置し、レール面からの高さを 2.1m とした。車上側の無線機（以下、車上局という）は、保守用車に搭載し、レール面からの高さを 2.3m とした。図 2 に無線機の実際の設置の様子を示す。

無線機のトンネル内の配置を図 1 に示す。基地局はトンネル新大阪方坑口から 19m 内側に入った下り線左右レールの間に設置し、測定中は設置位置を固定したままにした。車上局を搭載した保守用車は下り線に配置した。

車上局は、トンネルの新大阪方坑口に置いた基地局付近から、反対側（東京方）坑口を出た明かり区間 200m 先まで測定した。車上局を移動させる際、受信電界強度を連続的に測定した。

〈3・3〉測定結果 測定結果を図 3 に示す。横軸に基地局と車上局間の距離を、縦軸に基地局が受信した電界強度を示す。

図 3 に(a)~(d)で示す通り、測定区間を 4 つに区切り、そ



図 2 無線機の設置の様子

Figure 2. Installation of Radio Equipment

それぞれの区間の減衰係数を確認した。基地局から 1000m までの区間(a)においては、自由空間伝搬減衰とほぼ同等の減衰が見られた。基地局から 1000m 以上離れ、かつ見通し内の直線区間(b)における減衰は、自由空間伝搬減衰の傾向からやや乖離した傾向を示し、減衰係数は、約 1.2dB/km であった。トンネル中央部にある凸型の勾配変化点を越えた後の見通し外の直線区間(c)における減衰係数は、約 4.4dB/km であった。

得られた電界強度の変化の傾向は、過去に 50GHz 帯で報告されていたもの²⁾と同様であったが、減衰係数の値はわずかに異なった。これは、周波数の違い、アンテナビームパターンの違い、測定機器配置の違いに起因するものと思われる。

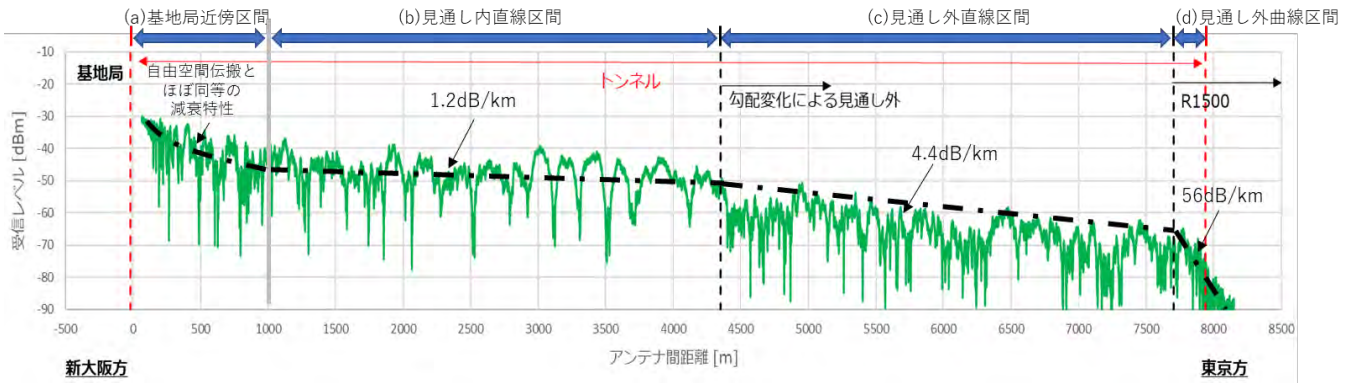


図 3 新丹那トンネルにおける受信電界強度の測定結果

Table 3. Measured Reception Level on Shin-Tanna Tunnel

4.南郷山トンネルにおける伝搬試験

〈4・1〉南郷山トンネルの特徴 南郷山トンネルの形状を図 4 に示す。このトンネルは、小田原駅と熱海駅の間であり、東海道新幹線の中で二番目に長い 5,170m を有する。

トンネル内には、半径 2,995m の曲線区間が 2,028m あり、トンネルの中央部に凸型の勾配の変化点がある。トンネル内曲線区間の長さは東海道新幹線内で最長である。新大阪方の坑口からトンネルの中を眺めると、凸型の勾配変化点付近までの約 2,400m が見通し区間、それより向こうは見通し外区間となる。

〈4・2〉測定機器の諸元と配置 測定には、表 2 に示す諸元を有する無線機を用いた。新丹那トンネルで用いた無線機とは、送信電力が異なることに注意されたい。

基地局はアルミラックの上に設置し、トンネル壁面付近のバラスト上に設置し、レール面からの高さを 1.5m とした。車上局は、トロ上のアルミラックの上に設置し、レール面からの高さを 0.7m とした。

ル面からの高さを 0.7m とした。

無線機のトンネル内の配置を図 4 に示す。基地局はトンネル新大阪方坑口付近に設置し、測定中は設置位置を固定したままにした。車上局を搭載したトロは下り線に配置した。

表 2 南郷山トンネル測定時の無線機の諸元

Table 2. Radio Performance on Nangoyama Tunnel

送信電力	17.8dBm(60mW)
周波数	45GHz帯
アンテナ利得	33dBi(レンズアンテナ)
アンテナ半値角	約3度

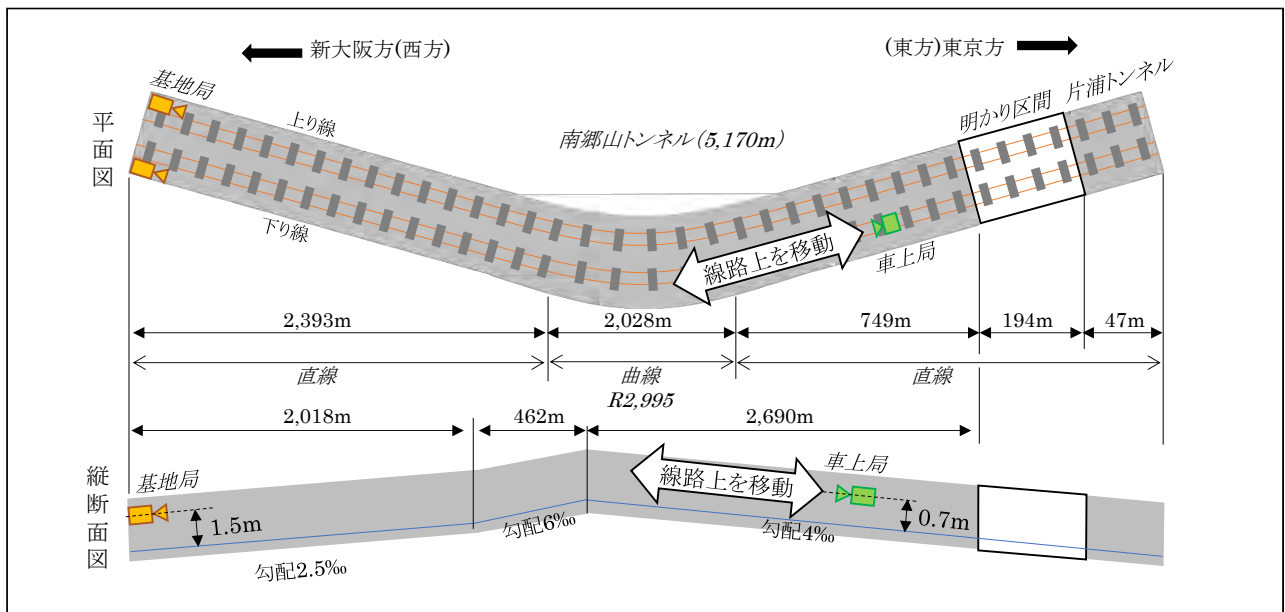


図 4 南郷山トンネルの形状と測定機器の配置

Figure 4. Geometry and Equipment Layout of Nangoyama Tunnel

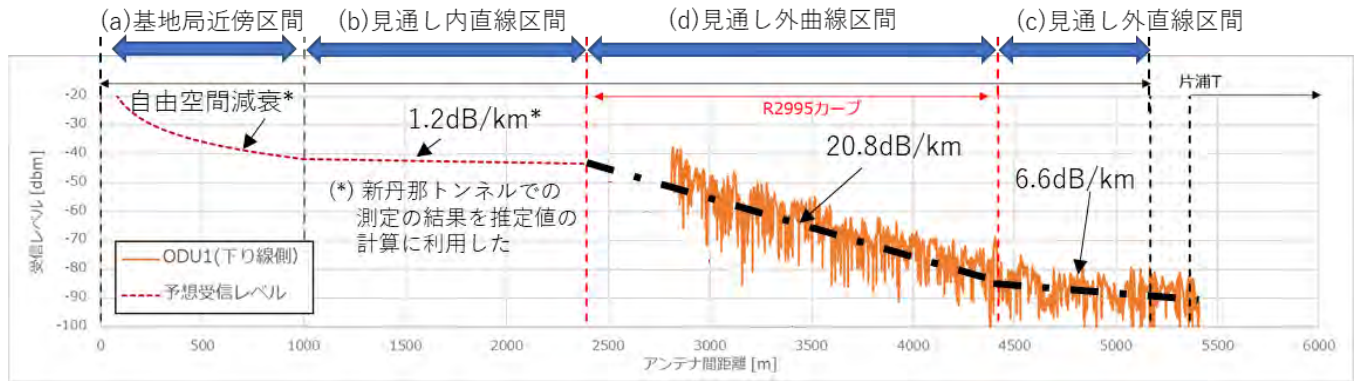


図 5 南郷山トンネルにおける受信電界強度の測定結果

Table 5. Measured Reception Level on Nangoyama Tunnel

新丹那トンネルでの測定において把握できなかった曲線区間の伝搬特性を南郷山トンネルにおいて確認するために、車上局は、トンネルの新大阪方坑口に置いた基地局から約 2700m の位置から、反対側（東京方）坑口を出た先にある片浦トンネルの内側 47m まで測定した。車上局を移動させる際、受信電界強度を連続的に測定した。

〈4・3〉測定結果 測定結果を図 5 に示す。横軸に基地局と車上局間の距離を、縦軸に基地局が受信した電界強度を実線で示す。

測定の結果、(d)見通し外の曲線半径 2995m の区間において一定の割合での電波減衰が見られ、減衰係数 20.8dB/km が得られた。また、曲線区間通過後の(c)見通し外直線区間では、減衰係数 6.6dB/km が得られた。

新丹那トンネルで得られた(a)基地局近傍区間、(b)見通し内直線区間、(c)見通し外直線区間での伝搬特性に加え、東海道新幹線で最も長いトンネル内曲線区間を持つ南郷山トンネルにおける(d)見通し外曲線区間における伝搬特性を把握できたことで、東海道新幹線トンネル内における置局設計に必要な情報が収集できた。

なお、図中の点線は、新丹那トンネルで得られた結果から、受信電界強度を理論計算した推定値である。(a)基地局近傍では自由空間減衰を、(b)見通し内直線区間では 1.2dB/km の減衰係数を考慮して得た推定値は、(d)見通し外曲線区間の実測結果の近似曲線を外挿した値と同程度であり、見通し内の伝搬の傾向は、新丹那トンネルで得られた傾向と同等のものであったと推測する。

トンネル内では、基地局近傍区間を除き、見通し内直線区間であっても、勾配による見通し外直線区間であっても、さらに、見通し外曲線区間であっても、自由空間減衰ではなく距離に比例して電波が減衰している。減衰率はそれぞれの区間で異なる。

これは、空気などによる電波吸収はあるものの、トンネル内壁における電波の反射により、電波の拡散が抑えられたものと考えられる。また、見通し外曲線区間における減衰係数 20.8dB/km は、見通し外直線区間における電波減衰

係数 4.4dB/km より大きくなっている。これは、トンネル内壁での反射率が 100%ではないことと、トンネル内壁での反射回数の違いによるものだと考えられる。曲線区間の曲率半径によって、電波減衰係数が異なることが予想される。

さらに、曲率半径から、電波の反射回数を推定することによって、トンネル内壁の反射率を推定することができ、それにより、曲率半径毎の電波減衰係数を推定することができると考えられる。

5. まとめ

東海道新幹線内の新丹那トンネルと南郷山トンネルにおいて 45GHz 帯の電波の伝搬測定を実施し、トンネル内の区間毎の伝搬特性を把握した。今後、得られた伝搬特性を踏まえてトンネル内の置局設計を進める。

文 献

- (1) 東海旅客鉄道株式会社, 「東海道新幹線におけるミリ波方式列車無線の整備について」, JR 東海ニュースリリース, 2021.9.22 https://jr-central.co.jp/news/release/_pdf/000041438.pdf (参照 2022.10.3)
- (2) 佐々木伸, 山村博, 川村武彦, 「ミリ波による対列車通信」, 鉄道総研報告 Vol.3 No.5, May 1989
- (3) 山村博, 林秀一, 鈴木尚子, 佐々木達也, 「大容量ミリ波無線システム」, 鉄道総研報告 Vol.9 No.11, Nov.1995
- (4) 柴垣信彦, 佐藤洋介, 石川恭介, 加島謙一, 「W 帯を利用した次世代列車無線システムの検討と国際標準化動向—RoF とミリ波を用いた新しい電波システム—」, 信学技報, RCS2017-10, Apr.2017
- (5) 松村善洋, 丹下智之, 西山武志, 井倉裕之, 荒川智樹, 岩倉功貴, 中村一城, 眞田幸俊 「鉄道における曲線区間の 45GHz 帯電波伝搬特性測定結果とシミュレーション評価の比較」, 信学技報, RCS-2020-129, Nov.2020
- (6) 松村善洋, 丹下智之, 西山武志, 笹木栄志, 岩本功貴, 中村一城, 荒川智樹, 井倉裕之, 眞田幸俊, 「ミリ波の新幹線環境での活用を想定した 45GHz 帯伝搬特性の曲線区間での測定・解析及び適切な地上局配置間隔」, 信学論(B), Vol.J105-B, no.3, Mar.2022
- (7) 白井大貴, 丹下智之, 松村善洋, 井倉裕之, 荒川智樹, 「リフレクタに依るミリ波方式列車無線の通信エリア拡大」, 信学技報, RCS2022-5(2022-4), April.2022