

対列車ミリ波通信システムの検討

A Study of Millimeter Wave Communication System for Railway Trains



服部 鉄範*



中村 亮介*



栗田 明**



木村 尚史*

In recent years, aiming realization of the large-capacity radio communication between the ground equipment and the onboard equipment in railway fields, developments of millimeter band radio communication based on 40 GHz band are proceeding. The millimeter band radio communication system is expected to realize faster communications. Especially along the tunnel sections, it has the possibility to realize longer intervals between base stations than those along open sections, because reflection waves to the wall are assembled. In this paper, we report the test results and future feasibilities through the propagation tests which are implemented by the actual rolling stocks and maintenance cars along the Shinkansen tracks, aiming the acquisition of the fundamental data for the radio system design.

●キーワード：ミリ波、新幹線列車無線、大容量通信、指向性、伝搬試験

1. はじめに

近年、スマートフォンや無線LANの普及により、動画などの大容量コンテンツの伝送需要が高まっている。大容量伝送に対する需要が高まり、周波数資源が逼迫してきている中で、限りある周波数資源の有効利用の促進、未開拓の周波数領域に関する技術的検討が進められている。その中で、周波数帯域幅を広く確保できる可能性があり、大容量伝送の実現が期待できるミリ波の電波を用いた通信が注目されている。

鉄道分野においても、さらなる安全性・安定性の向上、旅客サービスの向上を目的として、大容量伝送への需要が高まっている。将来の新幹線列車無線システムで採用する通信方式として、ミリ波通信は有力な候補の1つであると考えられる。

本稿では、新幹線列車無線システムの現状について説明するとともに、ミリ波通信の特徴、及びミリ波通信を活用した新幹線列車無線システムの構成案について述べる。最後に、新幹線車両及び作業用車両において実施したミリ波フィールド基礎試験結果について報告する。

2. 現行の新幹線列車無線システム

新幹線列車無線システムは、指令員-乗務員間の情報伝達手段として、新幹線の安全・安定輸送の確保の点で極めて重要な役割を担っている。東北・上越新幹線の列車無線システムは、2002年にアナログ方式からデジタル方式へと更新されたことで、新幹線通告伝達システム、車内情報提供システム、車両技術支援システム、通信機器監視システ

ムなど、さまざまな新しい機能が実現されている。以下に、デジタル化で実現された新機能の概要について記載する。

(1) 新幹線通告伝達システム

新幹線運転台のモニタに、指令員から列車乗務員への指令通告や徐行情報などを表示するシステムのことである。

(2) 車内情報提供システム

新幹線車内のLEDに、新幹線運行情報及び新幹線に接続する在来線の列車の運行情報・ニュース・天気予報などを表示するシステムのことである。

(3) 車両技術支援システム

指令室及び車両所のモニタ端末より、運転中の新幹線車両機器の稼動状況をリアルタイムに確認できるシステムのことである。

(4) 通信機器監視システム

列車無線移動局装置に異常などが発生した場合に、通信機器監視回線を利用して指令室の端末に警報を発生させるシステムのことである。

上記システムの構築にあたっては、高速走行列車に搭載する車上局と地上局の間において、安定した無線通信を実現する必要がある。そのため、現行システムにおいては、移動体通信で広く使用されている空間波方式ではなく、新幹線沿線に敷設したLCX (Leaky Coaxial cable: 漏洩同軸ケーブル) と車上局アンテナ間で送受信を行うLCX方式が採用されている。なお、現行の東北・上越新幹線列車無線システムの伝送容量は384kbpsとなっている。

3. 将来の新幹線列車無線システム

将来の新幹線列車無線システムに関して、通信種別を業務用通信、お客さまサービス用通信の2種類に分類し、各通信の特徴及び要求条件について考察する。

(1) 業務用通信

ここでいう業務用通信とは、列車運行にかかわる音声通話・データ系通信のことを指す。安全・安定輸送の観点から、無線伝送品質に関して、全線にわたりきわめて高い信頼性が必要とされる。将来的な業務用通信のアプリケーション拡張のためには、さらなる伝送容量の拡大が必要と考えられる。

(2) お客さまサービス用通信

ここでいうお客さまサービス用通信とは、お客さま向けインターネットなどの情報サービス系通信のことを指す。近年、スマートフォンやタブレットなどのモバイル端末が急速に普及してきており、新幹線乗客に対するサービス向上を考えた場合、大容量伝送の実現が必要と考えられる。

以上より、将来の新幹線列車無線システムにおいては、業務用通信、お客さまサービス用通信ともに、各々、必要十分な大容量伝送を実現できることが望ましいと考えられる。そこで本稿では、将来の新幹線列車無線システムに適用する通信方式候補の1つとして、その広帯域性から大容量伝送が可能なミリ波通信に着目して検討を実施する。

4. 鉄道分野におけるミリ波通信の応用例

鉄道分野（在来線）におけるミリ波通信の応用例として、例えば、ホーム映像伝送や、ニュース・天気予報などの情報伝送があげられる。本章ではこれらの応用例について紹介する。

(1) ホーム映像伝送

列車出発時のホーム安全確認を乗務員1人で行う場合の安全確認方法の1つとして、地上のカメラで撮影したホーム映像を乗務員室へ伝送するシステムがある。近年、この映像伝送にミリ波通信が応用されている。ホームにカメラとミリ波送信機を設置し、車内にミリ波受信機を設置することで、ミリ波通信による映像伝送を実現し、扉の開閉時や出発時のホーム安全確認を行っている。

(2) ニュース・天気予報などの情報伝送

ミリ波通信を用いることで、列車が駅に停車している短い時間に大容量の情報伝送を行うことができる。山手線・中央線の車内で放送されているトレインチャンネルのニュースや天気予報といった情報の配信にミリ波通信が活用されている。

上記の応用例は、大気による電波の減衰が大きい60GHz帯などを用いて行われているが、鉄道分野において対列車での大容量伝送の実現を目的として、近年、新たに大気による電波の減衰が比較的少ない40GHz帯に関する技術的検討が進められている²⁾。

5. ミリ波を用いた列車無線システム構成案

ミリ波は降雨による受信電力の減衰が懸念される一方で、周波数帯域幅を広く確保できるため大容量伝送が可能であり、また指向性については、ミリ波はその性質上、強い指向性を有したビームを形成可能である。したがって、伝搬環境が比較的直線に近く、見通しである場合には、電波が遠方の相手まで届きやすく、その特長を十分に活かすことが可能と考えられる。新幹線の走行環境は直線区間が多いことから、指向性の強いミリ波を用いた通信は、新幹線列車無線システムに比較的適した通信方式であると考えられる。

将来の新幹線列車無線システムとして、明かり区間・トンネル区間を問わず全区間においてミリ波通信を用いる構成案（全区間ミリ波構成案）と、明かり区間に関しては公衆網、その他トンネルなどの区間ではミリ波通信を活用する併用構成案（公衆網とミリ波の併用構成案）について説明する³⁾。

5.1 全区間ミリ波構成案

本構成案においては、ミリ波通信の想定通信距離である約1~3kmの間隔で基地局を設置することを想定する。ミリ波は指向性が強く、勾配変化点やカーブがある環境では伝搬距離が短くなると予想され、電波が到達しないエリアに関しては、局所的に低出力の基地局を設置するなどの対策が必要と考えられる。また、ミリ波のような高周波信号を同軸ケーブルで伝送する場合、伝送損失が極めて大きくなる懸念されるため、基地局間などの有線バックボーン部分に対しては、RoF (Radio on Fiber) を活用するなどの対策が考えられる。

本構成案においては、1種類の通信方式で全線をカバー可能という利点があるものの、勾配変化点やカーブの多い環境では、基地局を多く設置する必要があると考えられる。また、明かり区間においては降雨減衰の影響を考慮する必要がある。

5.2 公衆網とミリ波の併用構成案

近年、都市部を中心に、LTEやWiMAXといった公衆網の普及が進んでいる。そこで、本構成案においては、一例

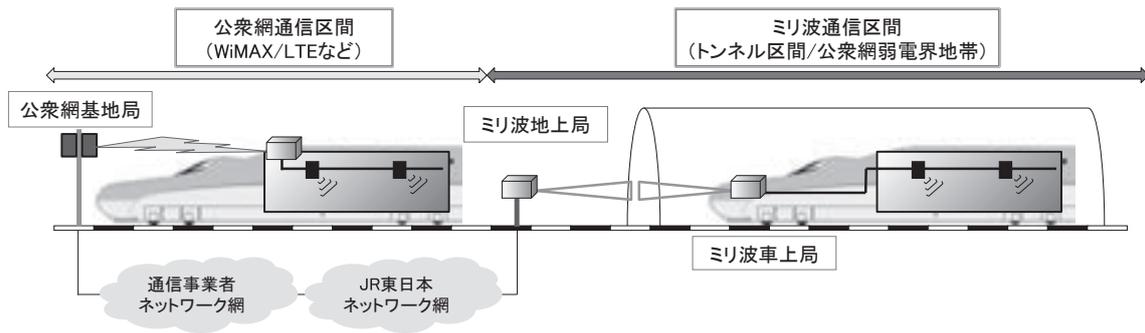


図1 公衆網とミリ波の併用構成案

として公衆網が届きやすいと想定される明かり区間では公衆網を活用し、公衆網が届きにくいと想定されるトンネル内や山間部などの区間において、ミリ波通信を活用する併用型の構成案について説明する。

公衆網とミリ波の併用構成案について図1に示す。なお、公衆網やミリ波通信により受信した情報を、車内のモバイルルータを用いてWi-Fiの情報に変換した後、ユーザに提供することを想定している。車上局において公衆網とミリ波通信の切り替えを自動で行うことで、ユーザは、車外通信メディアの切り替わり（公衆網⇄ミリ波）を意識することなく通信が可能と考えられる。

6. ミリ波フィールド基礎試験

新幹線沿線でのミリ波を用いた列車無線システムの無線回線及びシステム設計の基礎データの取得を目的として新幹線車両により実施した大容量通信試験及び作業用車両によりトンネル内で実施した通信試験の結果について報告する。

6.1 新幹線車両における大容量通信試験

6.1.1 試験目的

過去に、40GHz帯ミリ波を使用した100Mbps無線通信のフィールド試験結果に関する報告がなされている⁴⁾。本報告によれば、トンネル区間では基地局から約3kmまでの範囲において、明かり区間では約1.5kmまでの範囲において100Mbpsの通信が達成できたとされている。しかしながら、本報告における移動局の走行速度は、15km/hや100km/h程度にとどまっており、新幹線車両の高速走行環境下における100Mbps級の大容量通信の試験が行われたという報告はない。

そこで、将来の新幹線列車無線システムの実現に向け、システム構築の可能性を評価するため、まず新幹線車両の高速走行環境下において100Mbpsのミリ波による大容量通信試験を実施した⁵⁾。

6.1.2 試験条件

(1) 伝搬環境

地上局は東北新幹線二戸駅付近の明かり区間に設置した。また地上局設置場所付近の新幹線軌道の形状は、曲率半径4000mのカーブ区間となっている。

(2) 通信諸元

ミリ波大容量通信試験の諸元を表1に示す。地上局を送信側、車上局を受信側に設定し、A→B（地上局→車上局）の形で最大通信速度100Mbpsの無線通信試験を実施した。地上局側は2本のアンテナから送信を行う送信ダイバーシチ構成とし、車上局側は2本のアンテナを用いて受信を行う受信ダイバーシチ構成とした。また、アンテナはカセグレンアンテナを使用した。

表1 新幹線車両による通信試験の諸元

項目	諸元
搬送波周波数	40GHz帯
アンテナ数	地上局2(送信) 車上局2(受信)
変調方式	64QAM-OFDM
伝送速度	100Mbps
送信出力	10mW
使用車両	新幹線車両
伝搬環境	明かり区間

6.1.3 試験結果

受信電力、フレーム誤り率に関する試験結果を図2に示す。ここで、フレーム誤り率のグラフの縦軸E.F.は、エラーフリーであることを表す。一定以上の電力が受信できた地上局-車上局間距離0km～1.2kmの間でエラーフリーとなった区間に関しては、高速走行時においても良好な通信性能が得られていることがわかる。

なお、試験条件の制約上、地上局アンテナを防音壁の外側に設置したことから、地上局アンテナと車上局アンテナのメインローブが長い時間向き合う形で試験を実施することができなかった。また、車上局アンテナを新幹線車両の乗務員室に設置したことから、乗務員室の窓通過による電波の減衰

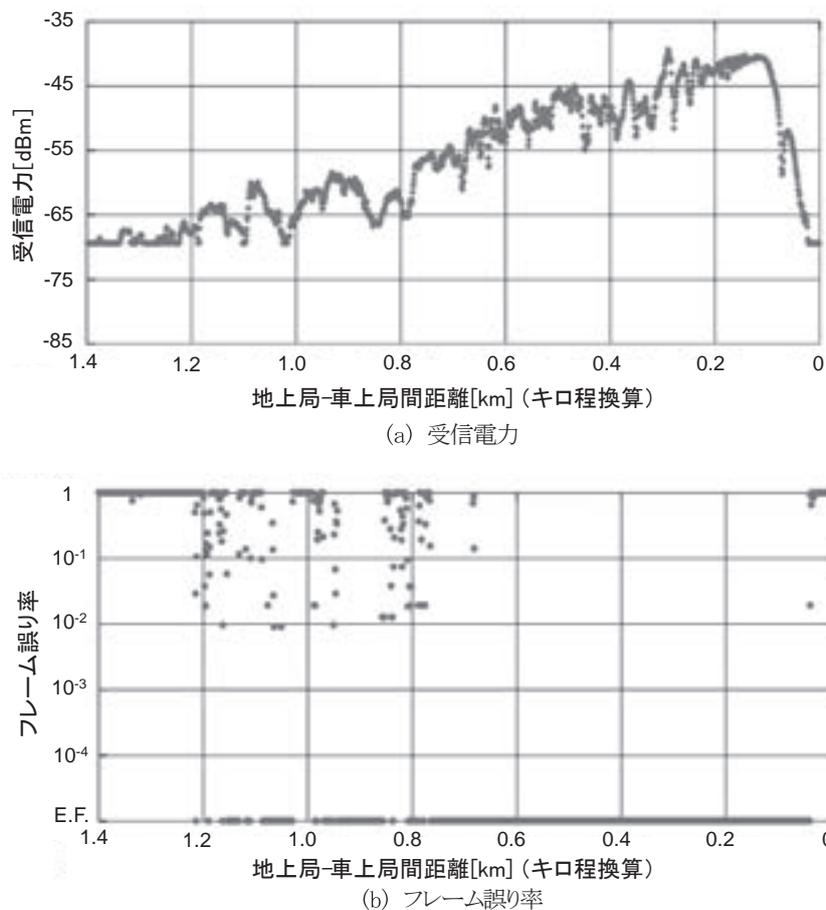


図2 新幹線車両によるミリ波通信試験結果

が発生していた。このように、試験条件の制約上、電波伝搬の観点からはあまり理想的とは言い難い条件での試験であったことから、通信可能区間が比較的短い結果になったと推定される。

実運用においては、地上局アンテナを防音壁内側の場所に設置することも想定される。その場合には、軌道方向に対して平行に近い形で地上局のメインローブを向けることができ、車上局アンテナと向き合う時間が長くなることで、通信可能区間が拡大すると考えられる。

6.2 作業用車両によるトンネル区間通信試験

6.2.1 試験目的

前節の評価結果を踏まえ、次のステップとしてミリ波で長距離通信が可能と想定されるトンネル内での通信の状況を確認するため、実際の新幹線トンネル内で試験及び評価を行った。今回は、トンネル区間における基礎データ取得を目的とし、直線区間が比較的長く、勾配変化点も存在しないトンネル区間において、作業用車両を用いたミリ波通信試験を実施した⁶⁾。

6.2.2 試験条件

(1) 伝搬環境

本試験は、東北新幹線区間のいわて沼宮内駅・二戸駅間にあるトンネル長25808mの岩手一戸トンネルの一部区間において実施した。地上局設置場所から直線区間が続いた後、距離7.2~9.8kmの区間に曲率半径R=8000mの曲線区間及びその緩和曲線が存在する。なお、勾配は10%の下り坂となっている。

(2) 通信諸元

本試験の通信諸元を表2に示す。車上局が2本のアンテナから送信し、地上局が2本のアンテナで受信する送受信ダイ

表2 作業用車両によるトンネル通信試験の諸元

項目	諸元
搬送波周波数	40GHz帯
アンテナ数	車上局2(送信) 地上局2(受信)
変調方式	64QAM-OFDM
伝送速度	100Mbps
送信出力	10mW
使用車両	作業用車両
伝搬環境	トンネル区間

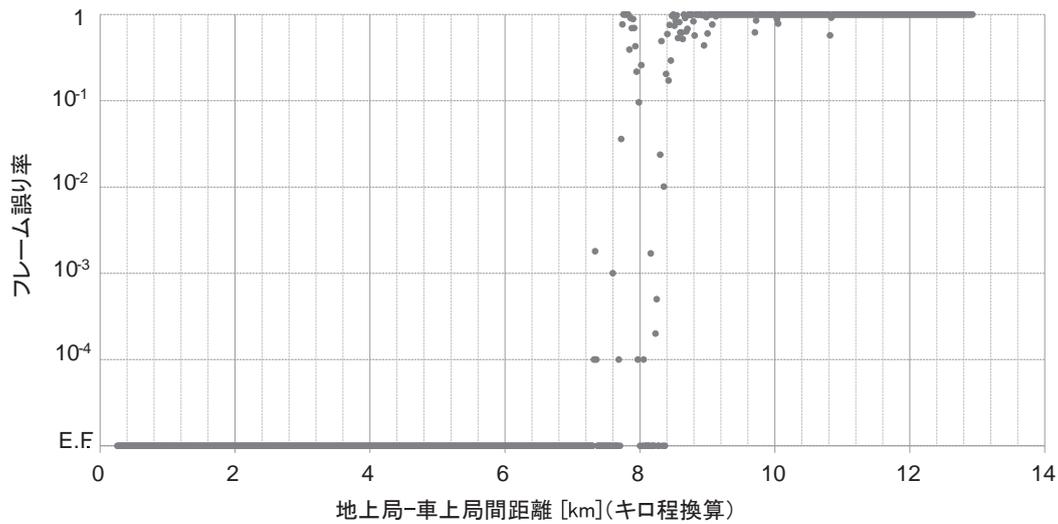


図3 作業用車両によるミリ波伝搬試験結果 (その1)

パーシチ構成とした。建築限界を考慮した実運用を想定し、地上局アンテナはトンネル壁面に近接する形で縦置きに2本設置した。また、車上局アンテナは作業用車両の運搬台車上に横置きに2本設置した。

6.2.3 試験結果

フレーム誤り率に関する試験結果を図3に示す。同図のフレーム誤り率のグラフの縦軸E.F.は、エラーフリーであることを表す。感度点以上の電力受信区間では誤り無く通信でき、曲線区間開始地点(距離7.2km)まで安定した通信が確認された。これは曲線区間に作業用車両が入ることにより、直接波が見通し外となり、回折波が支配的な環境に移行したためと考えられる。

実用化に向けては、曲線区間の位置を考慮した地上局アンテナ設置及び指向性の検討が重要と考えられる。

6.2.4 試験結果に対する検討

(1) 伝搬減衰の傾き

前項のフレーム誤り率試験では、直線区間から曲線区間へ移行する距離7.2km以遠で、受信電力が大きく減少した。そこで、トンネル内での曲線区間を通りすぎた後のミリ波の伝搬特性について確認するため、送信電力を上げた測定を実施した。試験条件としては、地上局を送信側、車上局を受信側に設定したA→B(地上局→車上局)の通信とし、無変調波を用いて、1アンテナからの送信を1アンテナで受信する形で実施した。その結果を図4に示す。

この図より、曲線区間終了後は、伝搬減衰の傾きが改善していることがわかる。これは、曲線区間において直接波が見通し外となり回折波に移行し、回折波が徐々に弱まり、曲

線区間を過ぎた付近からはトンネルの壁面反射波が支配的な伝搬環境に移行したものと推測される。

(2) 急な受信電力の落ち込み

次にトンネル区間試験結果の図4において曲線区間の7.9km付近で観測された受信電力の急激な落ち込みについて検討を行った。具体的にはアンテナの指向性が関係していると推測した検討を行った。

図5にアンテナ相対利得と送受信距離の関係について示す。この図はアンテナの指向性に基づいて、アンテナパターンの影響がトンネル内の位置によってどのように影響しているかを示したものである。

この図より、トンネル環境とアンテナ指向性を考慮に入れると、アンテナパターンの第1ヌル点の影響(受信電力が局所的に低下する点)により距離7.9km付近での相対利得が落ち込んでおり、これは図4での同地点での受信電力の落ち込み点と状況が一致していることから、急な受信電力の落ち込みはヌル点の影響と推定できる。

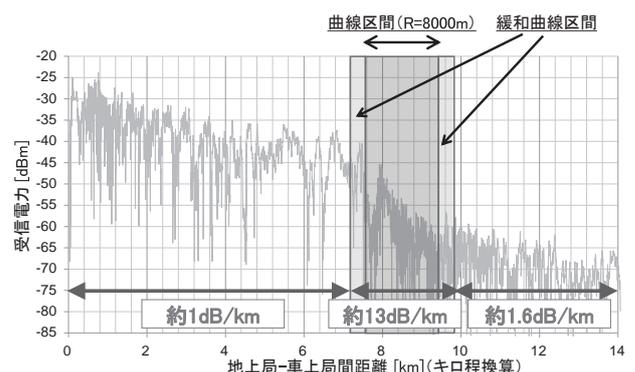


図4 作業用車両によるミリ波伝搬試験結果 (その2)

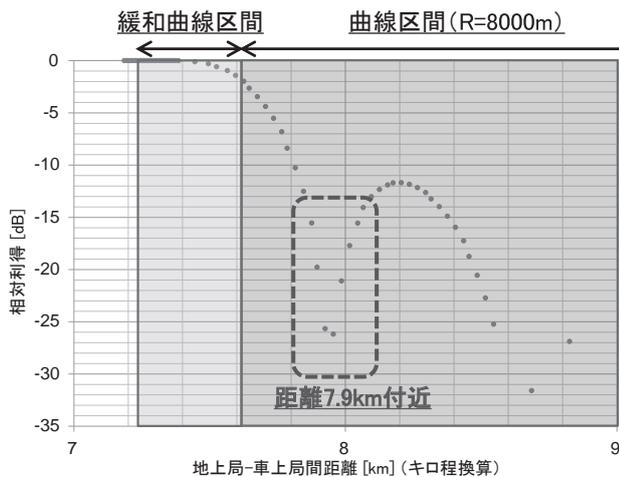


図5 送受信距離とアンテナ利得の関係

7. ミリ波通信システム構築に向けた課題

新幹線においてミリ波を用いた列車無線システムを構築していく上では、まだ幾つかの課題がある。それらについて概要を記述する。

7.1 アンテナ指向性に関する課題

アンテナについては、適切な種別のアンテナを選定した上で、指向性として半値角を小さくすることで、放射方向の伝搬距離を長くすることが可能であるが、曲線区間などでは送受信アンテナの指向性が合わなくなるので、環境に応じて適切に半値角を設定する必要がある。

7.2 機器設置方法に関する課題

地上側及び車上側それぞれのミリ波アンテナ及び通信機器の設置にあたっては下記を考慮して検討する必要がある。

(1) 地上側の設置方法

他設備との干渉を考慮し、アンテナ高さ及び角度を適切に設定する必要がある。特にトンネル内においては建築限界条件が厳しいため、設置可能箇所の制約が大きい。

(2) 車上側の設置方法

既存車両へ搭載する場合、車両内にアンテナを設置する必要があるが、窓の透過損を十分に考慮した無線回線設計が求められる。また運転台にアンテナを設置する場合には運転士の視界を遮らないように考慮する必要がある。車両内の取り付け箇所に応じてカセグレン、ホーン、平面などのアンテナの採用を検討する必要がある。さらに新造車両に設置する場合には、車内だけでなく車両の外側にアンテナを設置することが望ましいが、車体表面の材質による電波の遮蔽及び高速走行時における防圧性能の課題を解決する必要がある。

7.3 基地局間隔に関する課題

新幹線沿線へのミリ波基地局の設置にあたっては伝搬試験の結果を踏まえ、明かり区間、トンネル区間などの条件を考慮の上、基地局間隔を適切に定める必要がある。

8. おわりに

本稿では、ミリ波通信を活用した新幹線列車無線システムの構成案について述べるとともに、新幹線の高速走行環境下におけるミリ波フィールド基礎試験結果について報告した。試験結果より、感度点以上の電力が受信できた区間に関しては、新幹線車両による高速走行環境下においても良好な通信性能を得ることができた。次にトンネル区間のミリ波伝搬試験結果についても報告した。システム導入にあたっては、アンテナ指向性や多様な設置環境などを考慮したアンテナの設置及び指向性の検討が重要と考えられ、今後さらに検討の深度化を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 厚澤誠、西村佳久、吉田勝弘、“東北上越新幹線デジタル列車無線システムの開発、” JR EAST Technical Review、No.5、pp.59-64、2003
- 2) “周波数再編アクションプラン（平成25年10月改定版）”
- 3) 立石幸也、服部鉄範、川崎邦弘、“鉄道におけるミリ波通信、” 信学技報、MWP2013-48、pp.7-12、Nov. 2013
- 4) 塚本薫、加藤泰典、梅田周作、河原伸幸、長山博幸、川崎邦弘、中村一城、辻宏之、岡崎彰浩、石津文雄、“40GHz帯を用いた移動体無線通信システムのフィールド試験、” 信学技報、RCS2013-149、pp.43-48、Oct. 2013
- 5) 栗田明、服部鉄範、殖栗英介、工藤司、“鉄道におけるミリ波通信に関する一検討、” 平成26年電学産業応用部門全大5-24、Aug. 2014
- 6) 栗田明、服部鉄範、殖栗英介、工藤司、塚本薫、岡崎彰浩、“トンネル区間におけるミリ波伝搬試験結果、” 信学ソ大、no.B-5-26、Sept. 2014

※本稿の記載においては下記文献の内容を引用した。
服部鉄範、栗田明、殖栗英介、工藤司、塚本薫、岡崎彰浩、“鉄道における対列車ミリ波通信の伝搬試験、” 信学技報、RCS2014-210、pp.79-84、Nov. 2014、Copyright©2015 IEICE