

鉄道において ミリ波帯の電波を活用する



中村 一城
Kazuki Nakamura
情報通信技術研究部
通信ネットワーク研究室長



竹内 恵一
Keiichi Takeuchi
情報通信技術研究部
通信ネットワーク研究室
主任研究員

はじめに

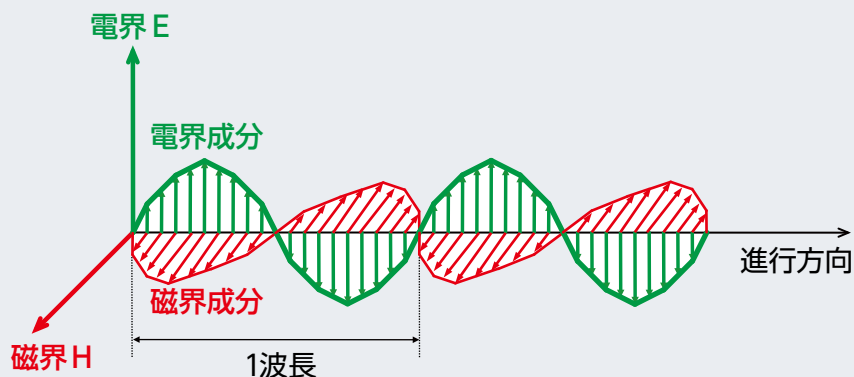
鉄道では、いろいろな場面で無線が利用されています。特に、走行する列車と地上との連絡には、無線による通信（無線通信）が欠かせません。無線通信は、文字のとおり「線では無く」、空間を伝わる電波や光を使って情報の伝送（通信）を行うものです。現在、走行する列車と地上間での情報伝送には、主に電波が使われています。電波は、電波法において300万MHz（＝3THz）以下の周波数の電磁波であると規定されており、電磁波とは、電界と磁界が互いに影響し合いながら光と同じ速さで空間を伝わっていく波のことをいいます（図1）。現在、列車運行に関わる情報の伝送を行うための無線通信システムとして、列車無線システムや無線式列車制御システムなどがありますが、主にVHF帯（周波数：30-300MHz）やUHF帯（周波数：300M-3GHz）の電波が使われています。これらの帯域では1チャンネルあたりに使用できる周波数の幅（周波数帯域）の制約から、数kbps～数100kbps程度の情報しか伝送することができません。使用できる周波数の幅が広がればより多くの情報を伝送できるため、より広い周波数帯域を確保

できる、ミリ波という新たな周波数帯が注目されています。鉄道総研では、これまで40GHz帯と90GHz帯のミリ波を対象に、鉄道への活用に向けた研究を行ってきました¹⁾。本稿では、それらの取り組みについて紹介します。

ミリ波とは

ミリ波とは、電波の周波数のうち30GHz～300GHzの周波数帯のことを指し、電波の波長が10mm（1cm）～1mmとなることからミリ波とよばれています（図2）。一般に、電波は周波数が高くなるほど、1チャンネルあたりに利用できる周波数帯域が広くなるという特徴があります。そのため、ミリ波では、現在列車の運行に関わる情報の伝送に使われている周波数帯に比べて、1チャンネルあたり1000倍近く広い帯域を利用することができます。また、波長が

図1 電磁波のイメージ



周波数		波長
3kHz	VLF ATC, 無線航行など	100km
30kHz	LF ATS, 誘導無線, 電波時計など	10km
300kHz	MF ATS, AMラジオ, 船舶航空用無線, 無線航行など	1km
3MHz	HF ATS-P, ワイヤレスカードシステム, RFIDタグ, AMラジオ, 船舶航空用無線, 医療応用など	100m
30MHz	VHF 列車無線, 業務用無線, FMラジオ, 公共用簡易無線, コードレス電話など	10m
300MHz	UHF 新幹線列車無線, 在来線列車無線, 防護無線, 無線式列車制御システム, 電子閉そく無線, その他各種業務用無線, 携帯電話, 無線LAN(2.45GHz), TV放送, コードレス電話, 特定小電力無線, GPS, レーダーなど	1m
3GHz	SHF マイクロ波通信, 衛星通信, 携帯電話, 無線LAN(5GHz), ETC, 衛星通信, レーダーなど	10cm
30GHz	ミリ波 ミリ波列車無線, 無線LAN, FWA, ITS, レーダー, 電波天文など	1cm
300GHz	サブミリ波	1mm
3THz		0.1mm

図2 周波数と主な用途（青字は鉄道で使われている無線システムの例）

短いために直進性が強く、遮蔽物の陰に回り込みにくいなどの特徴があります。そのため、電波を放射する範囲が狭いアンテナを用いることにより、鉄道敷地外への余分な電波の放射を抑え、鉄道外から飛来する電波による干渉を回避しやすくなるなど、鉄道環境での利用に適した利点があります。その一方で、伝搬距離が短く、降雨の影響を受けやすいという欠点もあります。

鉄道総研では、1980～2000年頃にもミリ波の活用に向けた研究を行っていましたが、当時はミリ波帯の部品が高価で、実現が難しいという課題がありました。その後、総務省の施策によるミリ波帯活用の推進や部品の製造技術の向上により、部品などのコストが下がったことなどもあり、近年では、60GHz帯を用いた無線LANが規格化/製品化されているほか、第5世代の移動通信システム(5G)で、ミリ波(厳密にはミリ波よりもわずかに低い周波数である28GHz帯ですが、ほぼミリ波に近いことからミリ波とよばれています)の電波が使用されています。将来的には、ミリ波の中でさらに高い周波数帯を携帯電話用に割り当てる計画があるなど、その活用がますます盛んになりつつあります。

鉄道においても、ホーム上の監視カメラの映

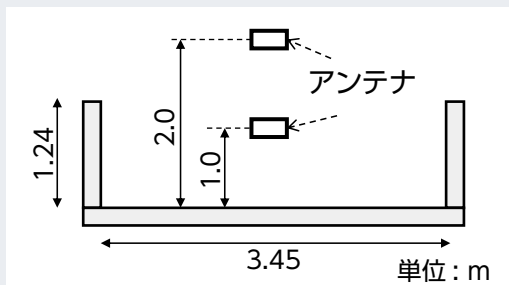
像を列車の運転席に伝送するシステムや車上で
の状態監視データの車両基地や駅で地上への伝送するシステム、レーダーで踏切の障害物を検知するシステムなどでミリ波帯の電波がすでに利用されています。

鉄道環境におけるミリ波の伝搬特性

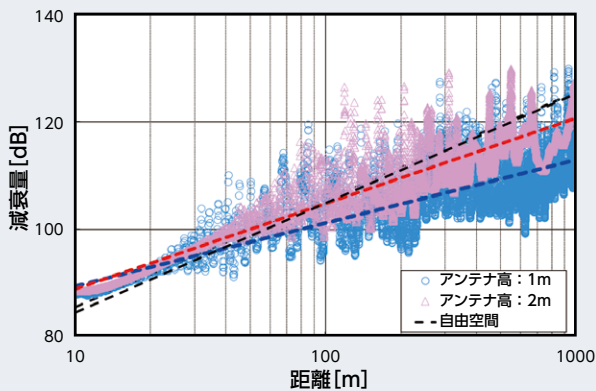
電波は、放射源から離れるに従い、その信号が弱くなる(減衰する)特徴を持っています。さらに、周辺構造物による反射や吸収などの影響を受けるため、環境によってその飛び方(電波伝搬特性^⑤)が異なります。そのため、無線システムを構築するためには、その環境に応じた電波伝搬特性を把握して、無線局(アンテナ)の設置間隔などを検討する必要があります。そこで、鉄道環境におけるミリ波の電波伝搬特性(減衰量)を実験とシミュレーションにより把握しました。それにより明らかになった特徴の

⑤ 電波伝搬特性

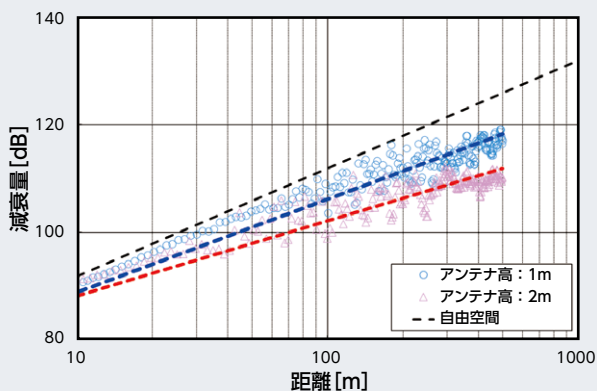
電波伝搬特性の表し方にはいくつかありますが、本稿では、計量単位令の別表第二に電磁波の減衰量として示されているデシベル [dB] (減衰前の電磁波の電力の減衰後の電磁波の電力に対する比の常用対数の十倍)で、距離に対する減衰量を表しています。



(a) 試験環境 (高架)



(b)-1 試験結果 (40GHz 帯)²⁾
(Copyright©2022 IEICE)



(b)-2 試験結果 (90GHz 帯)³⁾
(Copyright©2017 IEICE)

図3 高架環境における電波伝搬特性試験結果の例

例を以下に示します。

- (1) 両脇を防音壁に囲まれた高架区間においては、自由空間 (周囲に遮蔽や反射する物体がない理想的な空間) よりも距離による減衰は小さい。さらに防音壁とアンテナの高さの関係では、アンテナが低い方が減衰が小さく、より遠方まで強い信号が届く (図3)²⁾³⁾。
- (2) トンネル区間においても自由空間よりも距離による減衰は小さく、遠方まで強い信号が届く
- (3) 大地面がバラスト軌道よりもスラブ軌道の方が減衰が小さい
- (4) 降雪による電波の減衰は降雨による減衰よりも小さく、降雨の影響を考慮してシステムの設計を行えば降雪の影響を包含できる
- (5) 着雪した雪に含まれる水分により大きく減衰することから、アンテナ表面に着雪しないような対策が必要である

対列車通信システムへの活用

ミリ波のうち、これまで鉄道で使われたことのない90GHz帯を使った対列車通信システムを提案し、プロトタイプシステムを試作して検証試験を行いました (表1)。このプロトタイプシステムでは、光ファイバー無線 (Radio over Fiber : RoF) 技術[®]を採用しました。従来の無線システムでは、沿線に多数設置された地上無線局 (基地局) でそれぞれ生成していた無線信号を、光ファイバー無線技術を用いた無線システムでは、拠点となる機器室に設置された中央制御装置で無線信号を生成して、そのまま光ファイバーケーブルで沿線の地上無線局に配信し、地上無線局では、その信号を増幅してアンテナから送信します。これにより、多数必要な沿線の地上無線局には無線信号を生成するための装置が不要であることから構成を簡素化してコストの低減が期待できます (図4)。

実際の営業線に4つの地上無線局を設置し

表1 対列車通信システムの仕様

周波数	[地上→車上]95.1~96.3GHz(400MHz×4ch) [車上→地上]97.9~99.1GHz(400MHz×4ch)
変調方式	QPSK
アンテナ	[地上] 利得: 42dBi, 半値幅: 1.0° [車上] 利得: 36dBi, 半値幅: 2.1°
送信電力	40mW (4ch)

光ファイバー無線 (Radio over Fiber : RoF) 技術

無線周波数の信号を減衰の少ない光ファイバーで伝送する技術です。従来の無線システムでは、変調した無線周波数の信号を主に同軸ケーブルで伝送していたため、高い周波数になるほど、長い距離を伝送することが難しいという課題がありましたが、RoF技術により、変調した無線周波数の信号を長い距離伝送することが可能となりました。

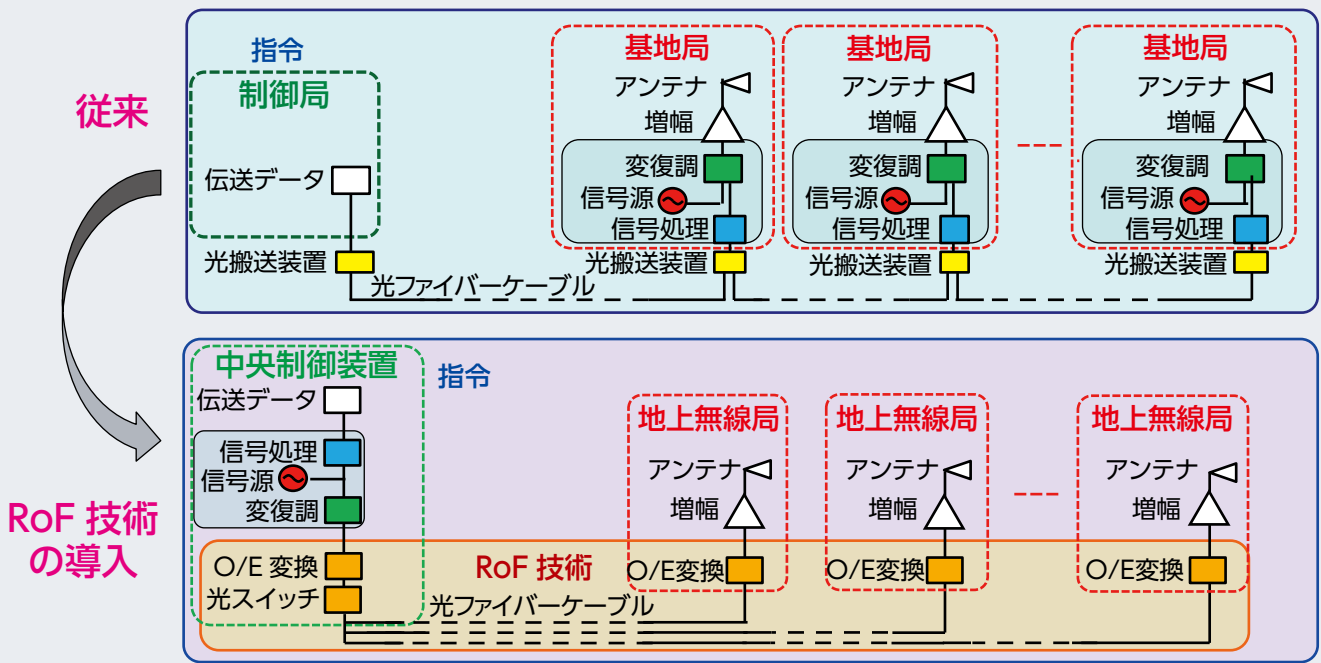


図4 RoF技術を用いた場合の構成イメージ

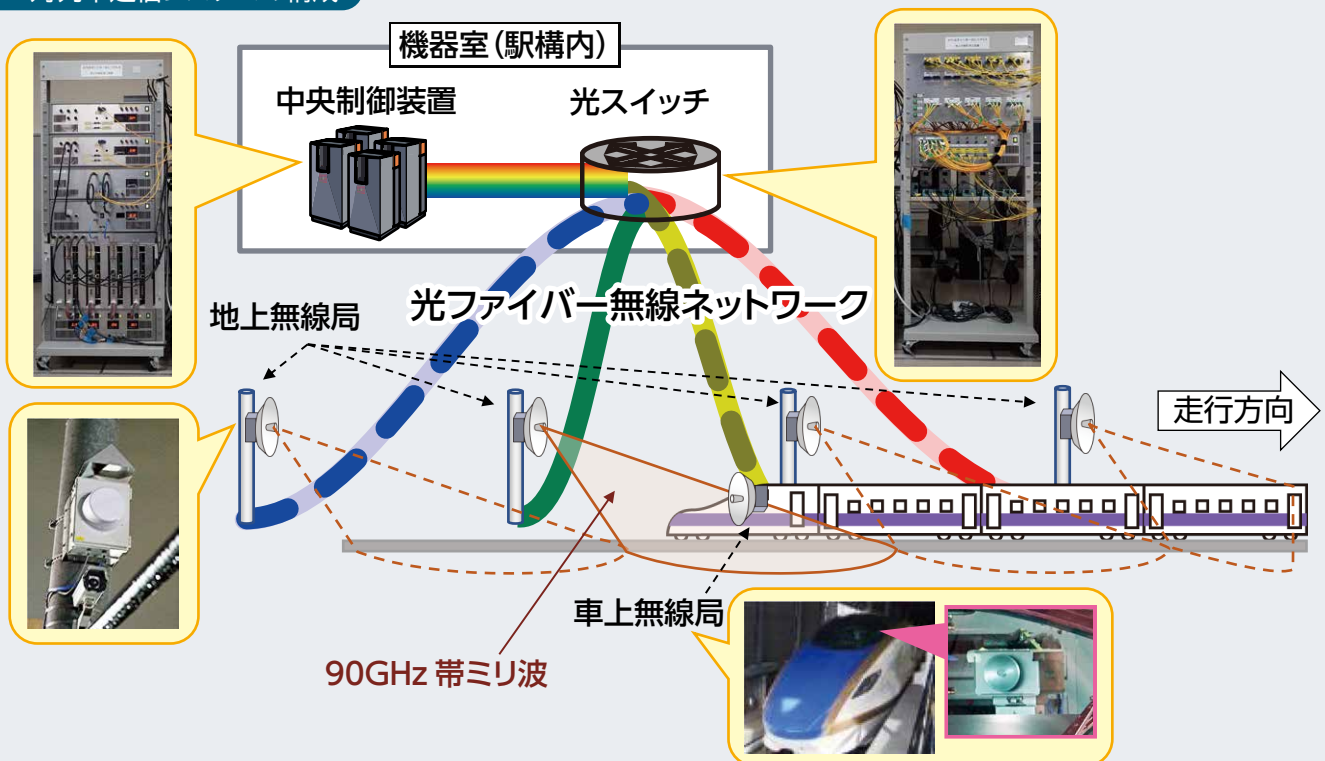
(図5), 地上から約240km/hで通過する列車に対してデータ伝送を実施した結果, 駅部の曲線で電波が十分に届かなかった範囲を除き, 列車の移動に合わせて光スイッチで地上無線局を高速に切り替えることで, 切り替え時においてもデータ伝送が途切れることなく, 最大約1.5Gbpsの伝送速度でデータ伝送が可能であることを世界で初めて実証し(図6), 対列車通

信システムとして活用できる可能性が高いことを示しました⁴⁾。

線路内障害物検知システムへの活用

ミリ波は直進性が強いことから, 無線通信だけでなく物体を検知するレーダーとしても活用することができます。ここでは, 90GHz帯ミリ波を用いた線路内障害物の検出や人の位置を

図5 対列車通信システムの構成



把握するシステムについて紹介します。前述した対列車通信システムと同様に、90GHz帯ミリ波とRoF技術を組み合わせたレーダー装置のプロトタイプシステムを用いてその実現可能性について検証を行い、次のことがわかりました。

(1) 本線上における線路内へ侵入した人や障害物を対象とした実験(図7)により、約200m遠方から線路内に侵入する人やレール上に置かれたコンクリート片を検出可能である(図8)⁵⁾。

(2) 線路内の作業員の位置を把握することを想定した実験(表2)により、作業員の位置をおおむね検出可能であるが、アンテナの延長線上に人や障害物が重なる状況では、影となる位置で検出できないことがあり(図9)、死角をなくすには複数のレーダーを角度を変えて配置する必要がある⁶⁾。

これらの結果より、提案したシステムが、線路内障害物の検出や人の位置を把握するシステムとして適用できる可能性が高いことを示すことができました。

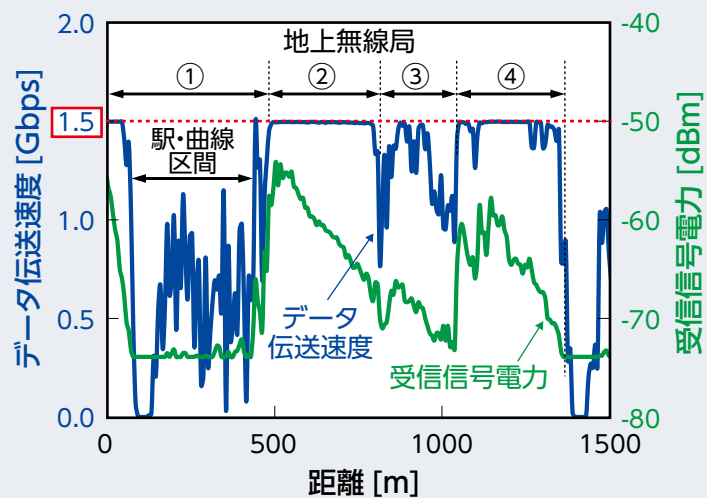
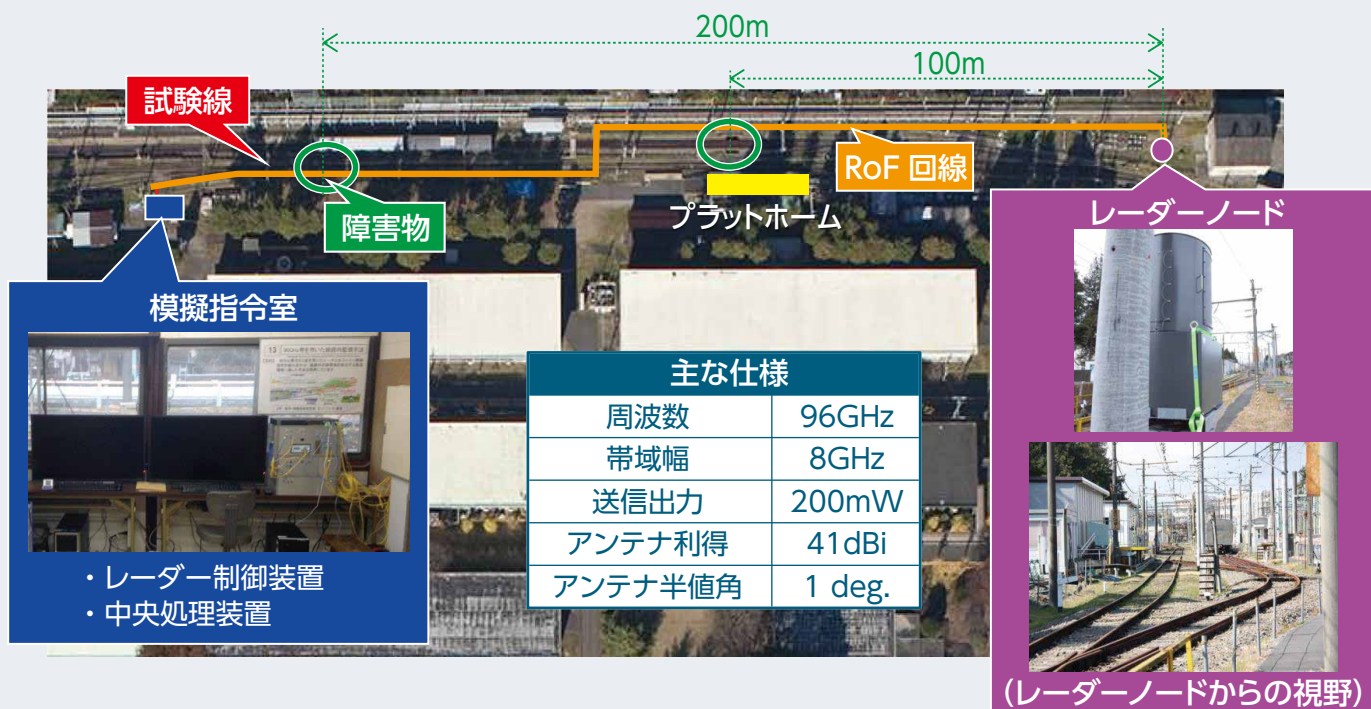


図6 試験結果

おわりに

本稿では、鉄道におけるミリ波の活用に向けた、鉄道総研の取り組みについて紹介しました。鉄道において無線の活用は不可欠であり、今後増えると予想される情報伝送容量のニーズを満足させるためには、ミリ波の活用が大きく期待されています。40GHz帯ミリ波については、2027年の運用開始を目指して、東海道新幹線の列車無線に導入されることが決まっています⁷⁾。さらに、60GHz帯の活用に向けた検討も

図7 障害物検知システム(侵入者, 障害物用)の構成⁵⁾



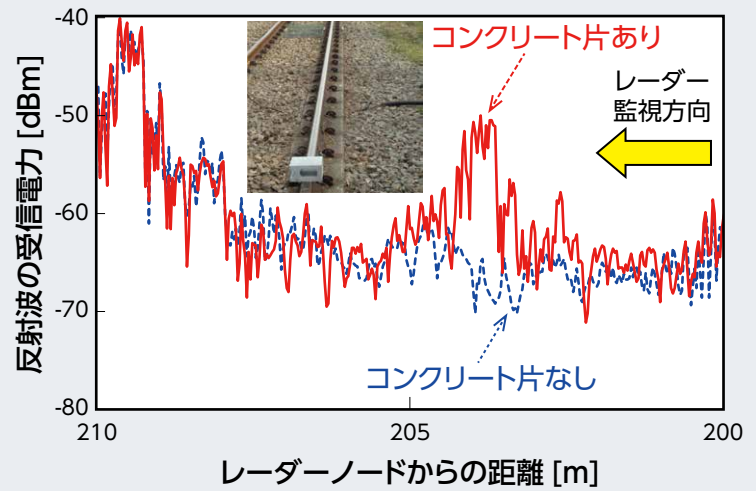
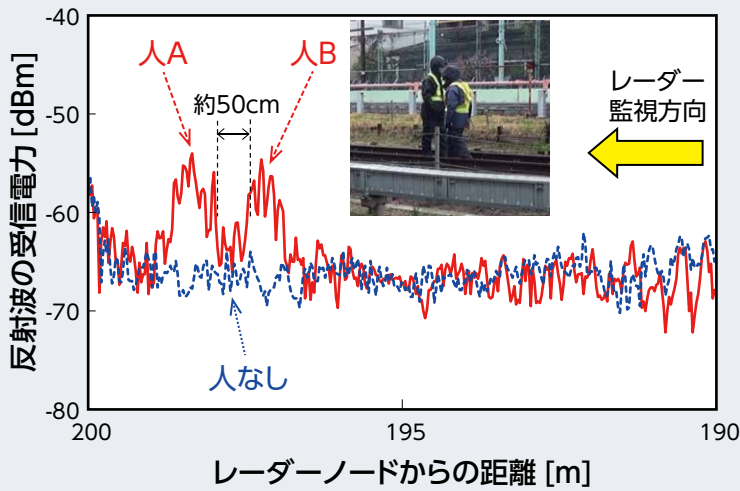


図8 線路内に侵入した人やコンクリート片の検出結果⁵⁾

行われています⁸⁾。このように、鉄道におけるミリ波の活用は今後も増えていくものと考えられ、鉄道総研においても、引き続きミリ波の鉄道での活用に向けた取り組みを進めていく予定です。

なお、本稿で紹介した成果の一部は、総務省における「電波資源拡大のための研究開発」において、株式会社日立国際電気、国立研究開発法人情報通信研究機構、国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 電子航法研究所との共同研究により得られたものです。[RRR]

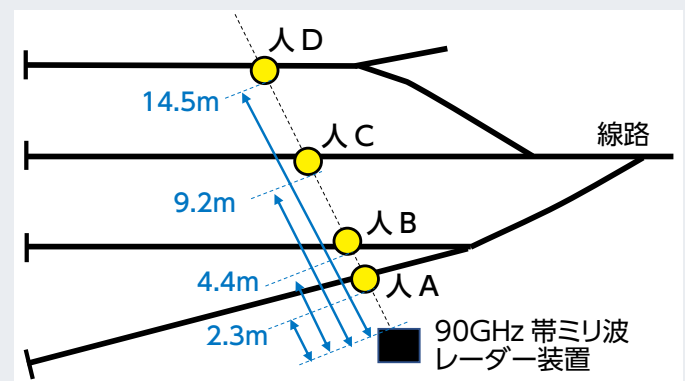
文献

- 川崎邦弘, 中村一城: ミリ波技術の鉄道応用に関する動向, 鉄道総研報告, Vol.30, No.1, pp.51-54, 2016
- 中村一城, 岩澤永照, 岩本功貴, 河村裕介, 山口大介, 北野隆康, 川崎邦弘, 吉田正太郎, 高橋応明: 鉄道環境におけるミリ波の電波伝搬特性, 信学技報, vol.121, no.370, AP2021-161, pp.16-19, 2022
- 沢田浩和, 石津健太郎, 児島史秀, 小川博世, 岩澤永照, 中村一城, 川崎邦弘, 渡邊充, 柴垣信彦: 高架橋環境における90GHz帯鉄道通信伝搬特性, 信学技報, Vol.116, No.481, SRW2016-99, pp.171-176, 2016
- 鉄道総研: 世界初、90GHz帯を用いて時速240kmで走行する列車と地上間で毎秒1.5ギガビットのデータ伝送に成功, ニュースリリース (2019年1月29日), https://www.rtri.or.jp/press/is5f1i0000009urq-att/20190129_001.pdf (入手日: 2023/03/25)
- 中村一城, 岩澤永照, 川崎邦弘, 佐藤洋介, 加島謙一, 柴垣信彦: 90GHz帯ミリ波を用いた線路内非金属障害物の検出実験, 第23回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2016), 2016
- 竹内恵一, 中村一城, 岩澤永照, 岩城詞也, 小澤圭広, 河村裕介: 90GHz帯ミリ波レーダーによる線路内の作業員の位置検知, 鉄道総研報告, Vol.33, No.7, pp.23-28, 2019
- JR東海: 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, ニュースリリース (2021年9月22日), https://jr-central.co.jp/news/release/_pdf/000041438.pdf (入手日: 2023/03/25)
- 阪神電鉄: 鉄道車両と地上間でミリ波を使った伝送試験の実施について ~ミリ波の鉄道運営への活用を検討します~, ニュースリリース (2021年9月22日), <https://www.hanshin.co.jp/press/detail/001064.html> (入手日: 2023/03/25)

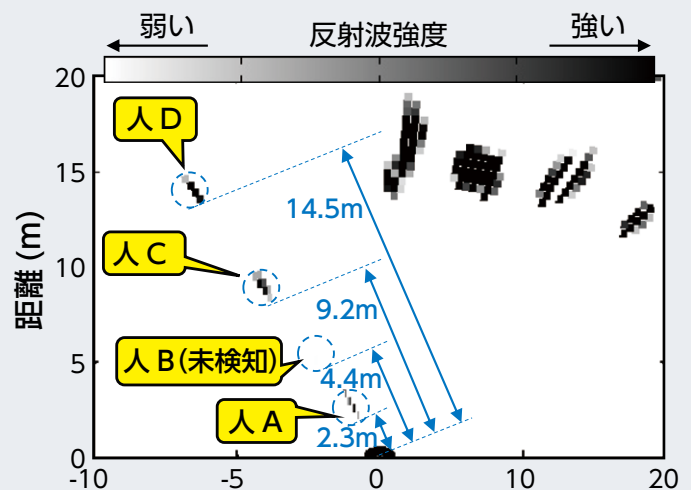
表2 線路内監視システムの仕様 (作業員位置把握用)⁶⁾

送信電力	50mW (+17dBm)
中心周波数	96GHz
周波数帯域幅	1GHz
アンテナ利得	41dBi
アンテナ半値幅	1deg.
アンテナ回転周期	4sec.

図9 作業員の位置検知試験の条件と結果⁶⁾



(a) 試験条件



(b) 検知結果