

## 第5世代移動通信システムの鉄道運行業務への適用可能性検証

中村 一城\* 北野 隆康\*\* 川崎 邦弘\*\*\*  
近江 泰志# 藤嶋 堅三郎# 市川 駿#

### Verification of the Applicability of Fifth Generation Mobile Communication Systems to Railway Operations

Kazuki NAKAMURA Takayasu KITANO Kunihiro KAWASAKI  
Taishi OOMI Kenzaburo FUJISHIMA Shun ICHIKAWA

The 5th generation mobile communication system(5G), serviced by mobile network operators(MNO), is expected to dramatically improve the three characteristics of “enhanced Mobile Broadband(eMBB),” “Ultra-Reliable and Low Latency Communications(URLLC),” and “massive Machine Type Communication(mMTC),” compared to conventional mobile communication systems. The introduction of 5G services in railways is expected to lead to the introduction of new applications that could not be realized with conventional ground-to-train communication systems. Therefore, this paper reports the outlines of our ongoing research on the introduction of public 5G services provided by MNOs to railway operations and the results obtained so far.

キーワード：5G, 公衆網, 鉄道運行業務, ローカル 5G, FRMCS

### 1. はじめに

鉄道では、走行する列車と地上間の連絡手段である列車無線や近年導入が広がりつつある無線式列車制御システムなど、移動通信システムが欠かせないものとなっている。現在、鉄道の運行業務で使われている移動通信システムの多くは、鉄道事業者が自社で設計、構築、管理を行う自営網で構築されている。そのような中、2020年から通信事業者が段階的にサービス提供を始めた第5世代移動通信システム（5G）では、最終形において無線通信の性能が従来に比べて大きく向上する見込みとなっており、より多くの情報をリアルタイムで伝送できるなどの特徴を生かして、現行のアプリケーションの機能向上や新たなアプリケーションの導入が期待されている。また、現在自営網で構築されている移動通信システムに、通信事業者が提供する公衆5Gサービスを活用することができれば、設備の導入やメンテナンスに要する人的リソース、設備コスト等の削減が期待できる。その上、自営網と公衆網のハイブリッド構成や複数の通信事業者のサービスを利用するなど、複数の無線通信サービスを利用することにより、回線の冗長性が高まり、列車運行のオペラビリティ向上が期待される。

しかし、通信事業者が提供する一般のユーザと伝送路

を共有する公衆サービスを今後も導入線区の拡大が見込まれる無線式列車制御や将来の導入が期待される自動運転など、列車のさらなる安全・安定運行を実現するためのアプリケーションに活用する方法は現時点で確立されていない。そこで筆者らは、鉄道事業者が公衆5Gサービスを鉄道運行業務へ適用する手法の確立に向け、未知の部分が多い鉄道環境における5Gの伝送速度や遅延などの伝送品質を評価するとともに、具体的なアプリケーションを想定した検証に取り組んでいる<sup>1)2)</sup>。

本稿では、5Gの概要と国内外における鉄道での活用に向けた取組みを紹介したのち、筆者らが実施した伝送品質評価の結果について報告する。

### 2. 5Gの概要と国内におけるサービス展開

#### 2.1 5Gの概要

通信事業者がサービスを提供する移動通信システムは、1979年に開始された自動車電話サービスを起源として、約10年ごとに新たな仕様に基づくサービスが提供されてきた。現在では、ディスプレイを備えたスマートフォンやタブレットに代表されるように、映像やテキストなどの情報伝送も重要なサービスとなっている。

特に5Gが目されているのは、伝送する情報の対象が、従来の「人からアクセスされる情報の伝送」から、「人・モノが利用できる情報の伝送」へと移り、あらゆるモノをネットワークにつなぐことを基本的なコンセプトとしていることである。そのため、移動通信システムが世代更新のたびに機能向上の中心としてきた「超高速・

\* 情報通信技術研究部 通信ネットワーク研究室

\*\* 信号技術研究部 列車制御システム研究室

\*\*\* 旧 信号・情報技術研究部

# 株式会社日立製作所

大容量」の特徴に、「超低遅延・高信頼」「多数同時接続」の2つの特徴が加わっている<sup>3)</sup>。例えば、超高速の特徴に関しては、現在使用されている第3.9世代移動体通信システム（LTE）に比べて、約100倍以上となる20Gbpsのデータ通信の実現が予定されている。また、超低遅延・高信頼の特徴に関しては、遅延時間がLTEに比べて約1/10の1ms程度となる見込みである。さらに、多数同時接続においては、LTEでは数台であった同時接続台数が100万台/km<sup>2</sup>となり、身の回りのあらゆるものがネットワークに接続されることが想定されている。なお、これらの3つの特徴は、全てを同時に満足できるものではなく、そのいずれかに特化すると、他の2つの特徴は制約されることに留意が必要である。

国内では、5G サービス用として3.7GHz帯、4.5GHz帯、28GHz帯の周波数が割り当てられている。これらの周波数帯は、3.7GHz帯および4.5GHz帯をまとめてSub 6（サブシックス）、28GHz帯をミリ波と呼んで区別している（一般的にはミリ波は波長がmmオーダーとなる30GHz以上の周波数の電波をさすが、5Gの展開においては28GHz帯をミリ波と呼んでいる）。Sub 6とミリ波では、電波の伝搬特性や使用できる帯域幅などが異なるため、提供されるサービスエリアや性能が異なることに留意が必要である。

また、通信事業者による全国向け5Gサービスとは別に、地域の企業や自治体等が自らの建物や敷地内でスポット的に柔軟にネットワークを構築して利用する新しい仕組みとして、「ローカル5G」も制度化されている<sup>4)</sup>。ローカル5Gに使用する周波数は、全国向けネットワークと同じ周波数帯（4.5GHz帯、28GHz帯）となっており、全国サービス用のハードウェアを共通で利用可能である。

## 2.2 国内における5Gのサービス展開

日本国内では、2020年春から通信事業者による5Gの商用サービスが開始されており、通信事業者による違いはあるが、従来の4G/LTE向けの周波数の転用も行いながらサービスエリアの拡大が進んでいる。最も展開が早い通信事業者では、2022年3月現在で人口カバー率（500m四方のエリアの中で50%以上の場所で通信可

能なエリアの割合）が90%以上となっている。また、JR・私鉄を含む主要路線のホーム、駅構内および駅間を走行中の電車内での5Gエリア化を目指すなど、鉄道をターゲットとしたサービス展開も行われている。さらに、総務省が発表しているデジタル田園都市国家インフラ整備計画<sup>5)</sup>では、2023年度末に人口カバー率（500m四方エリアのうち5G通信ができるエリアの人口を総人口で除した割合）を95%、2025年度末には97%とする計画を掲げている。

## 3. 鉄道での5G活用に向けた研究開発動向

### 3.1 鉄道での5G活用が期待される場面

鉄道環境において5Gの活用が期待される場面としては、表1のようなものが考えられる。超高速・大容量通信の特徴を生かしたアプリケーションとしては、車上に設置した防犯カメラや車両の状態情報データ、車上センシングデータなどの情報の地上へのリアルタイム伝送や、地上から車上への旅客向けの高画質映像コンテンツの提供などが期待される。さらに、従来は、アプリケーションごとに別々に専用の無線通信システムを使用していたが、複数のアプリケーションを1つの無線通信システムで共用することで、無線設備の削減が期待される（図1）。

超低遅延通信については、無線による列車制御や自動運転における列車運行間隔のさらなる高密度化、超高速・大容量通信の特徴による高精度画像の伝送と組み合わせでの保守用車の遠隔操作などへの活用が期待される。

多数同時接続では、今後鉄道環境において多数の設置が見込まれる各種センサデータの同時収集や、多数の旅客に向けた情報提供などへの活用が期待される。

さらに、仮想的に前述した3つの特徴のいずれかに回線の性能を特化させたサービスの提供、または、専用回線と同等の帯域を保障したサービスの提供が可能な、ネットワークスライシング技術にも注目が集まっている。なお、ネットワークスライシングは技術としては確立しているが、通信事業者がどのような形でユーザにその機能を用いたサービスを提供するかについては現時点で未知であり、ユーザである鉄道事業者のニーズと通信

表1 5Gの特徴と鉄道での活用が期待される場面

5Gの特徴	仕様	鉄道での活用が期待される場面
超高速・大容量 (enhanced Mobile Broadband: eMBB)	最高伝送速度 20Gbps	・車上-地上間の高画質画像伝送（業務用、旅客サービス用）
高信頼・超低遅延 (Ultra-Reliable and Low Latency Communications: URLLC)	遅延時間 1ms程度	・列車制御（自動運転） ・保守用車遠隔制御
多数同時接続 (massive Machine Type Communication: mMTC)	接続機器数 100万台/km <sup>2</sup>	・沿線環境監視 ・設備監視

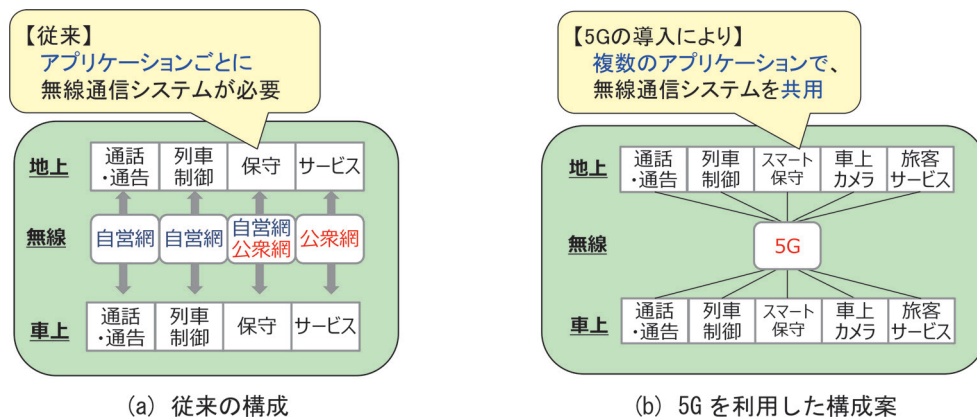


図1 地上-車上間通信における無線システムの構成イメージ

事業者における事業展開の方針にもよるため、今後の動向を注視していく必要がある。

### 3.2 鉄道環境における研究開発動向

#### 3.2.1 国内における動向

鉄道における5Gの活用に向けては、各鉄道事業者において通信事業者などと連携した実証実験が行われている<sup>6~11)</sup>。実証実験の多くは、「超高速・大容量通信」の特徴を使い、移動中の高画質の動画伝送を対象とした評価を行っている。これらの実証実験では、Sub 6とミリ波のそれぞれの周波数帯において、高速走行する新幹線車内と沿線に仮設された地上局との間で、4Kや8K画質の映像の伝送に成功したことが報告されている。これらの実験等により、車内の防犯カメラ映像や将来の自動運転で重要な役割を果たすと考えられる前方監視カメラの映像を、高画質で地上に伝送できる可能性が示されたものと考えられる。

また、2018年度から2019年度には、(一社)日本鉄道電気技術協会を事務局として、鉄道事業者、通信事業者、有識者らを委員とする「5Gの活用に向けた検討会」(主査：三瓶政一 大阪大学教授)が組織され、従来鉄道事業者が自社で構築・管理する自営網で運用してきた列車無線などの保安通信設備や、無線式列車制御システムにおける無線システムなどの信号保安設備に5Gを活用することを目指した検討が行われた。特に、鉄道事業者と通信事業者と一緒に鉄道の無線通信システムの将来について議論したことで、通信事業者が提供する移動通信サービスを導入する際に、鉄道事業者と通信事業者が調整すべき事項などが整理され、「鉄道に活用しても差し支えない」との提言がまとめられた<sup>12)</sup>。この提言は、5Gの鉄道への活用に向けた大きな前進であった。

#### 3.2.2 海外における動向

海外、特に欧州では、第2世代の携帯電話システムの技術をベースに、鉄道専用機能を付加した移動通信システム GSM-R (Global System for Mobile communications -

Railway) による列車無線システムが標準化されており、国境を越えて相互直通運転する路線を中心に多くの国で使用されている。しかし、導入からすでに20年以上が経過しており、2030年を目途にサービスが停止される予定となっている。そこで、国際鉄道連合(UIC)のFRMCS (Future Railway Mobile Communication System) プロジェクトにおいて、5G含む複数の通信システムをシームレスに活用する新たな対列車通信システムの検討が行われている。このプロジェクトでは、欧州電気通信標準化機構(ETSI)や移動通信システムの標準化を行っている3GPP (3rd Generation Partnership Project) と連携し、鉄道特有の機能を5Gの仕様に反映するための活動も行っている。

FRMCSにおいては、図1に示すような5Gだけを使用するのではなく、複数の無線通信システムを組み合わせることで、所望の無伝送品質を満足させるためのシステム構成が検討されている(図2)<sup>13)14)</sup>。さらに、FRMCSでは、シナリオごとに求められる遅延および信頼性の性能要求がまとめられており(表2)、3GPPの技術報告書(Technical Report: TR)としても発行されている<sup>15)</sup>。これらのシナリオと要求品質は、日本での5Gの適用に向けた検討においても参考になるものと考えている。さらに欧州では、2020年末からFRMCSの各種仕様の実証を行う5GRailプロジェクトを開始して、実現に向けた取り組みが進められている<sup>16)</sup>。

なお欧州では、5Gの適用を見据えて従来のGSM-R

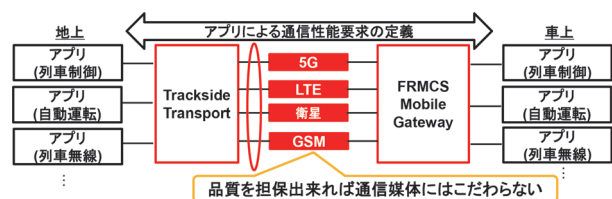


図2 FRMCSにおける次世代通信システムの構成案 (Copyright(C) 2022 IEICE)<sup>14)</sup>

表2 3GPP TR（技術報告書）で定義されている FRMCS の主なシナリオと要求品質の例<sup>15)</sup>

シナリオ	エンド-エンド間の遅延	ネットワーク層でのパケット到達率	最高速度	ユーザ体感データレート	3GPP TRの要求品質から想定される具体的アプリケーションの例
運行業務用音声通話	≤100ms	99.9%	≤500km/h	100kbps-300kbps	列車無線
監視目的の重大な映像の伝送	≤100ms	99.9%	≤500km/h	10Mbps	車内監視
列車の安全に直結する非常に重大な映像の伝送	≤100ms	99.9%	≤500km/h	10Mbps-20Mbps	列車前方監視 遠隔制御システム
	≤10ms	99.9%	≤40km/h	10Mbps-30Mbps	
列車の状態情報など、一般的なデータの伝送	≤500ms	99.9%	≤500km/h	1Mbps-10Mbps	列車状態モニタ 設備状態監視
列車の運行管理に関する重大なデータの伝送	≤500ms	99.9999%	≤500km/h	10kbps-500kbps	運行管理システム
高度な運行制御や完全自動運転などに用いる非常に重大なデータの伝送	≤100ms	99.9999%	≤500km/h	100kbps-1Mbps	列車制御システム 自動運転システム
	≤10ms	99.9999%	≤40km/h	100kbps-1Mbps	

※表中の値は、鉄道用の通信網を利用することを想定して設定された目標値

で使用されていた周波数帯を拡張するとともに、1,900MHz帯を新たに鉄道専用として割り当てることが決定した。

このように、FRMCSは、欧州での導入を主たるターゲットとしたプロジェクトではあるが、UICにおけるプロジェクトであること、中国やオーストラリアなどのアジア・太平洋地域においてもFRMCSを基にした次世代鉄道移動通信システムの検討を行うという動きがあることから、我が国への波及効果についても引き続き動向を注視し、必要に応じて日本からの提案を行うことも視野に入れて研究開発を進める予定である。

#### 4. 鉄道運行業務への5G活用に向けた伝送品質評価

前章で述べたように、鉄道における5Gの性能評価については、既に一部の鉄道事業者と通信事業者が連携し、超高速・大容量通信の特徴を用いて旅客サービス等を意識した画像伝送等の実証実験が行われ、その有効性が示されている。一方で、無線式列車制御や将来の自動運転など、列車のさらなる安全・安定運行を実現するために必要な5Gの性能評価は、現時点で十分に行われていない。そこで、筆者らは、5Gを列車の安全・安定運行に関わる情報の伝送に適用することを目指した検討を行うこととした。検討にあたっては、一般ユーザの影響を切り離れた5Gの真の実力値を把握する必要がある、また、様々な伝送環境や条件を自由に設定した検証を行う事が望まれる。そこで最初のステップとして、システムの動作や検証条件を任意に設定した評価を実施できるよう、ローカル5Gシステムを鉄道総研国立研究所の構内に構築し、5Gの性能や適用可能性について検討を行うこととした。

#### 4.1 鉄道総研所内ローカル5Gシステムの概要

鉄道総研所内試験線沿線に構築したローカル5Gシステムは、ノンスタンドアローン（NSA）方式で構成しており、データの伝送には28GHz帯の5Gを使用しているが、基地局と端末での制御信号のやり取りのためのネットワーク（アンカー）には、2.5GHz帯の自営BWA（自営LTE）システムを使用している。

ローカル5Gのシステムは、その利用が自己の土地内に限定されていることから、システムの構築に際しては、サービスエリアを鉄道総研国立研究所内に限定しつつ、所内試験線を走行する列車との間で通信が可能となるよう2つのアンテナを設置し、それぞれの位置や種類、向きなどを決定した（図3）。

#### 4.2 評価方法

評価にあたっては、図2で示したFRMCSで検討されているネットワーク構成を参考に、Trackside Transport（地上側）、FRMCS Mobile Gateway（車上）に該当する高信頼通信プラットフォーム<sup>17)</sup>を含む品質評価システムを構築した（図4）。高信頼通信プラットフォームは、車上側、地上側（サーバ側）のそれぞれにおいて、アプリケーションと通信システムの間で、送信時にはアプリケーションが求める通信品質に合わせて優先度を制



図3 ローカル5Gの設置状況

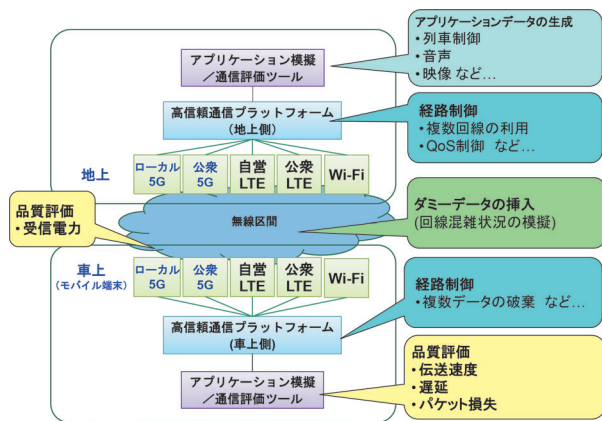


図4 品質評価システムの構成  
(地上→車上传送品質評価の例：車上→地上も同様)  
(Copyright(C) 2022 IEICE)<sup>14)</sup>

御するとともに、複数の通信システムが利用可能な場合には、それらを利用することで所望の伝送品質を満足できるようにデータの伝送を制御する。また、受信時には、複数の通信システムを経由して届いたデータの中から必要なデータのみを抽出し、適切にアプリケーションに渡す動作を行うものである。

また、品質評価システムでは、送信側の「アプリ模擬/通信評価ツール」にて、アプリケーションを想定した模擬パケットを生成し、受信側の「アプリ模擬/通信評価ツール」に届いたパケットにより、その伝送品質を評価する。主な評価項目は、データの伝送速度、伝送遅延時間、パケット損失率とした。なお、同時に無線部分における受信電力も記録した。さらに評価においては、想定するアプリケーションとして、模擬したデータのみを単独で伝送した場合だけでなく、ダミー負荷をかけることで他のユーザと回線を共有している状況を想定した伝送品質の評価も行った。

### 4.3 評価結果

#### 4.3.1 ローカル5Gの性能確認

最初に、構築したローカル5Gと自営LTE単体の性能確認を行った。走行する列車上で地上→車上の伝送速度と地上→車上→地上の往復の遅延時間（ラウンドトリップタイム：RTT）を測定した結果を図5、6に示す。その結果、図5に示すように基地局に近い位置であれば、1台の端末のみで基地局を占有した場合には、概ね仕様に近い伝送速度（仕様値：530Mbps）が得られることを確認した。また、ハンドオーバー（ローカル5G：330-360m付近、自営LTE：260-290m前付近）で、スループットの低下が見られている。また、図6より、ハンドオーバーが行われるまでの範囲では、ローカル5GのRTTが自営LTEに比べて約1/3となり、さらにその変動も

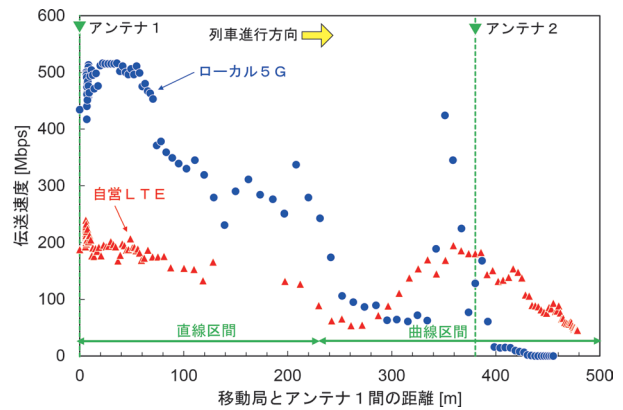


図5 下りスループットの測定結果  
(Copyright(C) 2022 IEICE)<sup>14)</sup>

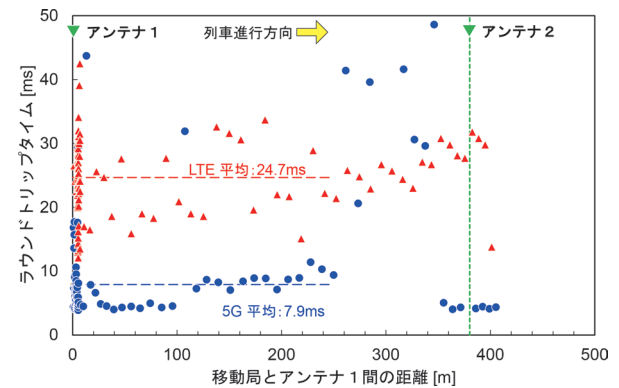


図6 RTTの測定例 (Copyright(C) 2022 IEICE)<sup>14)</sup>

表3 評価を実施した想定アプリケーション

#	アプリケーション	パケットサイズ (Bytes)	送信間隔 (ms)	想定伝送速度 (kbps)	所望伝送品質 (PLR)
1	列車制御	256	200	10.24	$<10^{-6}$
2	列車無線 (音声)	256	20	102.4	$<10^{-3}$
3	映像	1,232	1	9,856.0	$<10^{-3}$

小さい結果であったが、ローカル5Gのハンドオーバー時には、RTTが40ms以上となっていた。これは、基地局からの受信信号電力の低下とNSA方式のためにハンドオーバーで時間を要するなどの複合要因によるものと想定される。なお、ローカル5Gのみでデータ伝送を行った際のハンドオーバーによるスループット低下については、高信頼通信プラットフォームを用いて、ローカル5Gと自営LTEで同時にデータを伝送することで、その低下を抑えて安定した通信が実現できることが確認されている<sup>17)</sup>。

#### 4.3.2 アプリケーションを想定した伝送品質の評価

本項では、ローカル5Gを用いて鉄道のアプリケーションを想定した伝送品質の評価を行った結果を報告す

る。今回の試験において評価の対象としたアプリケーションは、列車制御、列車無線（音声）、画像伝送とし、それぞれを想定したデータを模擬的に生成して、ローカル 5G により伝送することで実施した。想定したアプリケーションと作成した模擬パケットのサイズ、伝送周期、所望伝送品質を表 3 に示す。試験は、安定して基地局からの信号が得られる地点に端末を固定して行い、公衆網における回線混雑時を想定して、回線に意図的に負荷（地上→車上：500Mbps、車上→地上：100Mbps）をかけた試験も実施した。

その結果、列車制御を想定した試験では、回線の混雑時においても所望の伝送品質（パケット損失率：PLR が  $10^{-6}$  未満）でデータの伝送ができることを確認した。一方で、列車無線を想定した試験では、ローカル 5G 単独ではパケット損失が所望の伝送品質を満足できなかった。そこで、品質改善に有効と考えられる方法の一つである、高信頼通信プラットフォーム<sup>17)</sup> を利用したローカル 5G と自営 LTE の同時使用による評価を実施した。その結果、伝送品質が改善し、所望の伝送品質（PLR が  $10^{-3}$  未満）を満足できることを確認した。これらの結果より、列車制御や列車無線などのアプリケーションについては、高信頼通信プラットフォームを利用して、複数の無線システムを利用することで、公衆の 5G サービスを使用した場合でも所望の伝送品質を満足できる可能性があることが分かった。なお、画像の伝送については、所望伝送品質を満足できなかったが、高信頼通信プラットフォームを用いてローカル 5G と自営 LTE を同時に使用することにより、パケット損失が減少することが確認されており、今後 SA 方式の展開や複数の周波数を束ねたキャリアアグリケーションなどによるシステムの伝送品質の向上により、所望伝送品質の達成が期待される。

#### 4.3.3 無線部分の優先制御による伝送品質評価

本項では、無線部分での優先制御機能の効果を検証した結果を報告する<sup>16)18)</sup>。通常、基地局装置においては、

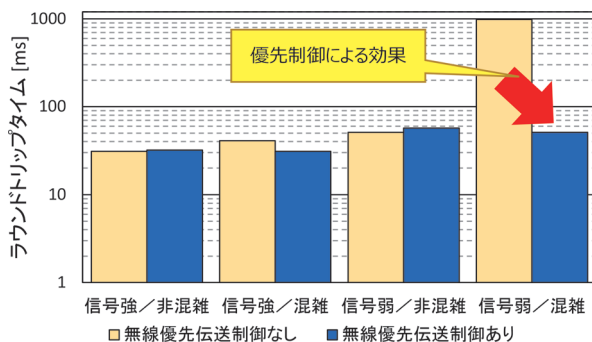


図 7 無線区間における優先制御の効果（自営 LTE の例）<sup>18)</sup>

QoS Class Identifier (QCI) と呼ばれる値の変更により、無線区間でのパケット優先制御が可能となっている。今回使用したローカル 5G の基地局装置では当該機能が実装されていなかったため、自営 LTE の基地局装置においてその機能の検証を行った。検証は基地局からの信号が高い（強い）エリアと低い（弱い）エリアで静止した状態で行った。また、それぞれのエリアにおいて、模擬パケットの送信により回線の混雑を模擬した状態と混雑していない状況での検証を行った。検証に用いた指標は改善混雑による遅延の影響を見るため RTT とした。試験結果を図 7 に示す。図 7 より、回線が混雑していない状況では、信号の強弱に関係なく優先制御の効果は見られないが、回線が混雑している状況では、優先制御の効果が見られた。特に受信信号が弱く、回線が混雑している状況においてその効果が大きく、本試験環境においては、RTT が 1/10 以下に低減される結果が得られた。今回の結果は、LTE において行ったが、当該機能は 5G においても実装される見込みとなっている。そのため、今後通信事業者において当該優先制御サービスが提供されることで、その程度は未知ではあるが伝送遅延の低減効果はあるものと考えられ、鉄道運行业務への活用も大いに期待できる。

## 5. まとめ

本報告では、5G の概要と国内外における動向を紹介するとともに、公衆 5G サービスの鉄道運行业務への適用可能性を検証するための最初のステップとして、ローカル 5G システムを用いた検証試験を行い、その結果について述べた。そして、技術的には鉄道運行业務へ適用できる可能性が高いことを示した。

今後は、Sub 6、SA 方式、公衆網の 5G サービスを利用した検証など、適用可能性評価の深度化、ローカル 5G の鉄道環境での活用方法などの検討を進めるとともに、鉄道事業者が 5G を適用する際の手順等をまとめたガイドラインの作成を進める予定である。

## 文献

- 1) 中村一城、北野隆康、川崎邦弘、近江泰志、藤嶋堅三郎、奥村太一：鉄道における 5G の活用に向けた検討、第 58 回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集、802、2021
- 2) 中村一城：鉄道における 5G の活用に関する研究開発の動向、JERA、Vol.64、No.8、pp.8-11、2021
- 3) 総務省：令和 2 年度情報通信白書、2020
- 4) 総務省：ローカル 5G 導入に関するガイドライン、2022
- 5) 総務省：デジタル田園都市国家インフラ整備計画、2022
- 6) KDDI ニュースリリース：世界で初めて「5G」を用いた走行

- 列車での 8K/4K 映像伝送, 連続ハンドオーバー実験に成功, <https://news.kddi.com/kddi/corporate/newsrelease/2017/12/01/2812.html>, 2017.12.1 (参照日: 2022 年 7 月 3 日)
- 7) NTT ドコモニュースリリース: 5G を用いた SL 大樹への超高精細ライブ映像伝送に成功, [https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/technology/rd/topics/2018/topics\\_181128\\_01.pdf](https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/technology/rd/topics/2018/topics_181128_01.pdf), 2018.11.28 (参照日: 2022 年 7 月 3 日)
- 8) NEC プレスリリース: NEC, NTT コミュニケーションズ・NTT ドコモ・東武鉄道による 5G を用いた列車への高精細映像伝送実験に貢献, [https://jpn.nec.com/press/201902/20190205\\_01.html](https://jpn.nec.com/press/201902/20190205_01.html), 2019.2.5 (参照日: 2022 年 7 月 3 日)
- 9) JR 西日本ニュースリリース: 第 5 世代移動通信システム (5G) 実証実験, [https://www.westjr.co.jp/press/article/2019/04/page\\_14132.html](https://www.westjr.co.jp/press/article/2019/04/page_14132.html), 2019.4.11 (参照日: 2022 年 7 月 3 日)
- 10) JR 東海ニュースリリース: 東海道新幹線における 5G 無線通信実験について, [https://jr-central.co.jp/news/release/\\_pdf/000040020.pdf](https://jr-central.co.jp/news/release/_pdf/000040020.pdf), 2019.9.30 (参照日: 2022 年 7 月 3 日)
- 11) JR 東日本ニュースリリース: 時速 360km で走行する ALFA-X で 5G 通信に成功, [https://www.jreast.co.jp/press/2020/20210128\\_ho01.pdf](https://www.jreast.co.jp/press/2020/20210128_ho01.pdf), 2021.1.28 (参照日: 2022 年 7 月 3 日)
- 12) 児玉利光, 太田正毅, 羽田野裕史, 北村知: 5G の鉄道活用にに向けた検討, JERA, Vol.63, No.7, pp.40-44, 2020
- 13) ETSI: Rail Telecommunications (RT); Future Rail Mobile Communication System (FRMCS); Study on system architecture, ETSI TR 103 459 V1.2.1, 2020.
- 14) 中村一城, 北野隆康, 小川祥吾, 竹内恵一, 流王智子, 川崎邦弘 “鉄道運行業務への公衆 5G 活用に向けたローカル 5G を用いた基礎検討,” 信学技報, vol.122, no.6, RCS2022-95, pp.128-133, 2022
- 15) 3GPP: Mobile Communication System for Railways, 3GPP TS 22.289, V17.0.0, 2019.
- 16) 5GRail プロジェクトホームページ: <https://5grail.eu/>, (参照日: 2022 年 7 月 3 日)
- 17) 石野正典, 鈴木拓, 五十嵐悠一, 近江泰志, 藤嶋堅三郎, 中村一城, 北野隆康, “鉄道向け公衆網活用高信頼通信プラットフォームの検討,” 信学技報, vol.122, no.6, RCS2022-1, pp.1-6, 2022
- 18) K.Nakamura, T.Kitano, S.Ogawa, K.Takeuchi, K.Kawasaki, T.Ohmi, K.Fujishima, T.Kunifuji, K.Bekki, “Study of applicability of 5G technology to train control systems,” 13th World Congress Railway Research(WCRR 2022), IP 19 - 1, 2022.