

大規模掘削現場におけるローカル5G通信の技術実証 — 施工管理の視点からの実用性検証 —

伊藤圭佑^{*1}・藤本直也^{*1}

建設工事現場への高速通信技術の導入によって大容量通信が可能になり、BIM/CIMの利活用や4Kカメラ映像での現場監視による時間短縮・作業効率化が期待されている。なかでもローカル5G通信は次世代の高速通信手段として注目されているが、電波直進性の高さから障害物がある状況での通信に懸念がある。本稿では大規模掘削現場においてローカル5G通信による高速通信環境を構築し、障害物の影響低減策の効果とローカル5Gの適用性について検証したので報告する。

キーワード：ローカル5G, 高速通信, 施工管理効率化, 4Kカメラ

1. はじめに

近年の建設業においては労働人口の減少や作業員の高齢化に伴う人手不足、および2024年からの残業時間上限規制などへの対策として、現場作業の省人化・効率化が急務となっている。これらの課題に対してBIM/CIMの利活用による現場作業エリアでの書類作成・変更や4Kカメラ映像による現場監視、建設機械の遠隔操作・自動運転など先進技術による業務効率の改善に期待が寄せられている。

これらの技術の現場導入に際しては通信の安定性や低遅延性、大容量通信などの条件を満たす通信技術が要求され、なかでもローカル5G（以下L5Gと略記）は次世代の高速通信手段として注目されている。しかし、L5Gは電波の直進性が高く、建設現場のような障害物の多い場所

では電波が回り込まず通信に悪影響が生じる懸念がある。

本稿では大規模掘削工事の現場において、障害物の影響低減策を講じてL5Gを用いた高速通信環境を構築し、L5Gの建設工事への適用性と障害物の影響低減策の効果について検証を行った¹⁾ので、その結果を報告する。

2. L5Gの概要

L5Gは第5世代移動通信システム（5G）の一種である。現在広く普及しているWi-Fi通信および通信キャリア各社が一般向けに展開しているパブリック5GとL5Gの比較を図-1に示す。Wi-Fi通信の理論上最大速度はWi-Fi5で6.9Gbpsといわれ、利用に際し特別な免許等が必要ない。Wi-Fi5ではさらに図-2(a)に示すように通信の手続きが簡易であり、基地局の機器や対応デバイス

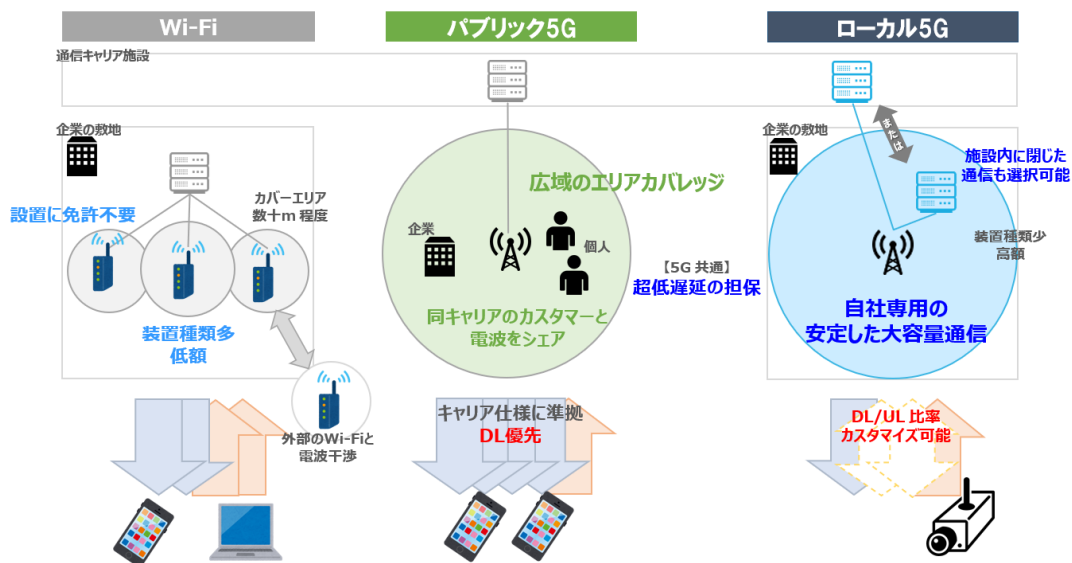


図-1 Wi-Fi, パブリック5G, L5Gの比較

*1 フロンティア研究部



図-2 Wi-Fi と 5G の通信手順

も豊富で低コストに設置・運用が可能である。その一方で、第三者が発信した電波により待ち時間が多く発生する、電波が輻輳する状況が発生する等の懸念がある。

これに対し 5G 通信は、最高伝送速度 10Gbps、1ms 程度の超低遅延、同時接続台数 100 万台 / km² といった理論上の最大性能を有する高速通信技術である²⁾。図-2 (b) に示すような通信手順を行うため通信トラフィックが完全に制御されているうえ SIM カードの使用によってセキュリティが確保されている反面、5GC (5th Generation Core network)、DU (Distributed Unit)、CU (Central Unit) といった装置が必要になる。なお、5G の超低遅延はこの通信手順を高速で行う仕組みにより実現している。5G を受信するためには対応している専用端末を使用する必要があるが、通信キャリア各社が契約者向けに提供しているパブリック 5G は各社施設から広域に通信エリアを展開しており、通信パケットの比率はダウンリンク (DL) に比重が置かれている。

一方、L5G は基地局の設置に際して利用者自身で免許の取得 (代行可能) が必要なものの、前述の 5G 通信が持つ特徴である安定した大容量通信に加えてアップリンク (UL) / ダウンリンク (DL) 比率のカスタマイズが可能になる。特に UL の比率を上げることによって、4K カメラ映像による監視業務や現場作業エリアでの CAD 図面編集等の通信容量の大きなデータの運用が可能となることが期待される。

なお、本件で採用した L5G は sub6 (4.8GHz 帯)、準同期型 (TDD1, 下り 4: 上り 4) のものを採用した。

L5G の基地局を設置する手順は以下の通りである。

- ①要件の洗い出し
L5G 導入の目的, エリアや要求性能等要件の整理
- ②無線エリア設計
上記要件を元にエリアの設計, 使用機器の選定
- ③総務省総合通信基盤局との打合せ
導入計画を提示. 電波干渉のある周辺事業者についての情報収集
- ④事業者間調整 (干渉が予想される場合)
状況に応じて基地局設置, 合意形成等

- ⑤無線局, 特定無線局 免許申請
上記書類等に加え, 発注者の同意書も必要
- ⑥免許状交付 (申請から交付まで約 2 か月)
- ⑦無線従事者の専任
「第三級陸上特殊無線技士」以上の資格保有者を選任
- ⑧運用開始 (免許交付から 6 か月以内)
IMSI (利用者識別番号) の申請, 取得と SIM カードの準備, ネットワークを構築

3. 装置構成

図-3 に現場の俯瞰図および各中継点の位置を示す。ベージュ色の範囲が掘削面 (深さ約 20m)、掘削面中央の格子状部分が鉄骨造の作業構台である。現場には通信基地局となる A 地点, および通信の中継地点となる B ~ E 地点を配置した。各地点間の距離は最大で A-D 地点間の 184m である。

A 地点の事務所屋上付近に設置したアンテナから現場へ向けて L5G の電波を発信したが、基地局と掘削面の高低差および作業構台による遮蔽の影響によって L5G の電

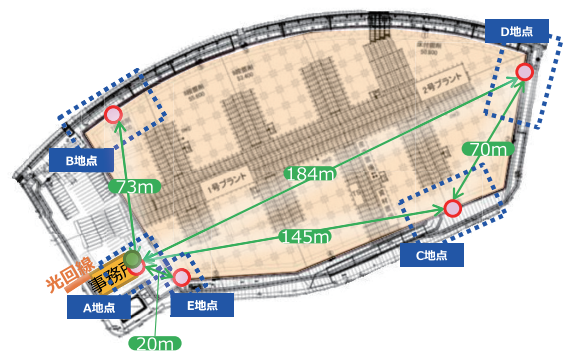


図-3 現場俯瞰図と各中継点の位置

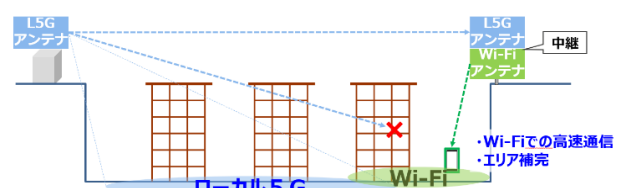
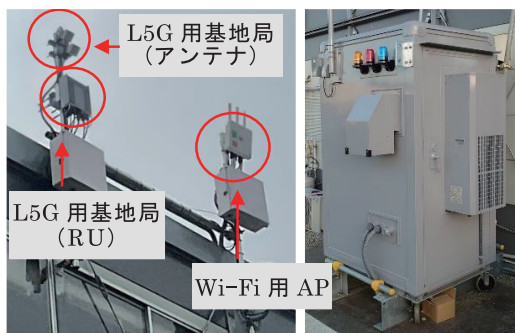


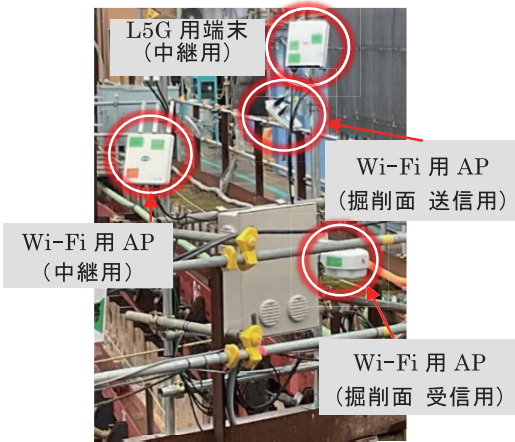
図-4 現場断面図と通信ルート概念図 (L5G, L5G → Wi-Fi 中継)

波を受信することが困難になることが予想された。L5G には中継が可能な装置がないため、図-4 に示すように事務所から発信された L5G の電波を中継地点の端末にて受信し、有線接続した Wi-Fi アクセスポイント (AP) から掘削面に向けて Wi-Fi 通信を行う通信経路 (L5G → Wi-Fi 中継) を採用した。検証における比較のため、事務所から各中継地点間は L5G 通信の他に Wi-Fi 通信でデータのやり取りを行う方式 (Wi-Fi → Wi-Fi 中継) でも通信ができるように機器を配置した。

機器の設置状況を写真-1 (a) ~ (c), 使用した機器の名称および型番を表-1 に示す。各中継地点では事務所



(a) 事務所屋上付近 (b) 設備収納 BOX



(c) 中継地点

写真-1 各所機器設置状況

表-1 設置機器詳細

設置箇所	機器名称	型番
事務所屋上付近 A 地点	L5G 用基地局	X65-3545FTD OutdoorRU
	L5G 用端末 (中継通信用)	XC-WN930J-01
中継地点 B ~ E	Wi-Fi 用 AP (中継通信用)	PCWL-0410
	Wi-Fi 用 AP (掘削面用)	AP-374 ANT-4x4-D100

からの L5G 通信 (または Wi-Fi 通信) の電波を中継用アンテナで受信し、中継 BOX を介して掘削面の Wi-Fi アンテナにデータを中継することで掘削面に Wi-Fi 通信環境を構築している。なお、中継地点 E のみ基地局である A 地点と有線接続されており、有線接続での測定も一部行った。

L5G で構築した通信環境を外部のネットワークに接続するには、基地局に必要な機材とともに外部接続用ルータの設置が必要になる。本検証においては基地局としての機能に必要な装置のうち、事務所屋上付近のアンテナ、RU (Radio Unit) 以外の装置 (DU (Distributed Unit), CU (Central Unit), 光ブロードバンドルータ, スイッチ) を A 地点の設備収納 BOX に格納している。これら基地局周辺の機器は「ギガらく 5G」³⁾ として NTT 東日本のサービスパッケージとなっている。これは空調を具備したシェルタであるため屋外に設置可能であり、L5G 用の移動基地局として運用できる仕様となっている。なお、基地局は事務所の光回線を介して外部ネットワークに接続され、5GC はクラウド化されている。

なお、前項にて述べた L5G の伝送速度や遅延時間は理論上の最大値であり、本件の機器構成では DL は約 1000Mbps, UL は約 450Mbps が最大速度として想定された^{*1}。

4. 検証内容と結果

本検証では現場に展開した L5G 通信の通信速度・遅延時間の測定、および L5G → Wi-Fi 中継について施工業者の視点に立って施工管理アプリを用いた通信速度の測定を行った。

4.1 L5G 通信の通信速度・遅延時間測定

図-5 のように現場の掘削面に設定した測定点において A 地点と L5G 通信を結び、インターネットに接続して通信速度 [bps] および遅延時間 [ms] を測定した。

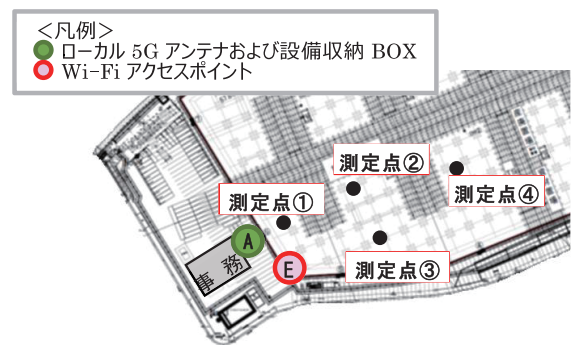


図-5 通信速度 測定点 (E 地点付近)

*1 メーカーの公称値

4.1.1 直接受信の測定

まず、中継地点E付近の測定点におけるL5Gの通信速度を表-2に示す。比較として同じ地点で測定したL5G→Wi-Fi中継、およびWi-Fi→Wi-Fi中継での通信速度を併記する。測定にはL5Gを直接受信可能な端末(FCNT SD001)を用いた。測定の結果、各点においてUL・DL共に、L5Gの通信速度は、L5G→Wi-Fi中継やWi-Fi→Wi-Fi中継等の通信経路末端がWi-Fi通信である方式よりも高速通信が可能であることを確認した。4Kカメラ1台の運用に約25Mbps必要であり、測定地点③を例とした場合、上りでは約11台運用可能な通信速度を示した。

表-2 通信速度 測定結果 [Mbps] (E地点付近)

測定点	UL/DL	L5G	L5G→Wi-Fi中継	Wi-Fi→Wi-Fi中継
①	UL	302	236	126
	DL	384	252	78
②	UL	266	186	45
	DL	327	200	67
③	UL	277	226	125
	DL	317	207	94
④	UL	211	85	32
	DL	209	79	45

4.1.2 構台影の測定

事務所から見て作業構台の影となっている範囲でのL5Gの通信速度を図-6、表-3に示す。比較として同じ地点で測定したL5G→Wi-Fi中継の測定結果を併記する。これらの測定点では、当初懸念されたようにL5Gの通信速度が大きく下がったものの、受信自体は可能であることを確認した。また、L5GからWi-Fiに中継する通信方式は表-2の測定結果と同等の通信速度を示し、かつL5Gよりも高い数値を示した。作業構台の影となって事務所からの電波の通りに悪影響を及ぼさず環境であっても、中継地点を介することでWi-Fiの通信速度までなら高速通信を維持できることを確認した。



表-3 通信速度 測定結果 [Mbps] (障害物遮蔽エリア)

測定点	UL/DL	L5G	L5G→Wi-Fi中継
⑤	UL	109	148
	DL	117	200
⑥	UL	60	157
	DL	78	239
⑦	UL	99	125
	DL	87	213

4.1.3 遅延時間の測定

次に、掘削面から中継地点Eを介してインターネット上の測定サーバと通信を行い、各通信方式で約2か月に渡って通信遅延時間を測定した。この測定結果の一例を図-7に示す。平均的な遅延時間はインターネットでの遅延が大きいため、どの測定結果も大きな差は見られなかったが、L5G→Wi-Fi中継の場合は若干遅延時間が大きくなっていった。このようにインターネットを併用する場合にはL5Gの特徴である超低遅延は効果が低下するといえる。

しかし、L5Gは他の無線通信と比べ遅延の振れ幅が最も小さく遅延時間が安定していたため、遠隔操作などに無線通信を利用する場合には、より安定性の高いL5Gの利用が推奨される。

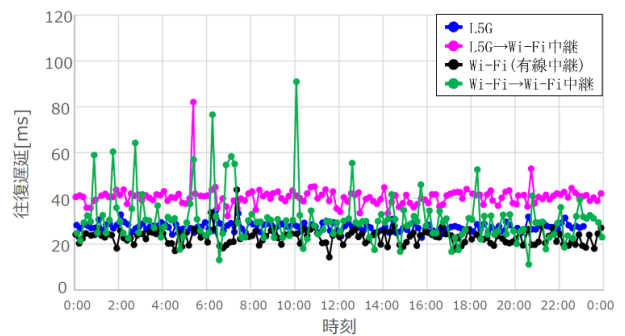


図-7 インターネット往復遅延時間測定結果

4.2 4Kカメラ映像による性能確認

地上の中継地点B～Eに4Kカメラ(Panasonic WV-X1571LNJ)を配置して掘削面を見下ろす映像を撮影し、L5G通信によって事務所へ4K映像を伝送する検証を行った。この検討では映像による監視・巡視等を運用すると想定した場合、状況把握のために必要な解像度の確保にL5Gの通信性能が有効であるかの確認を行った。

基本となる映像の撮影設定は、解像度を4K、フレームレートを30fps、ビットレート上限を24Mbpsとした。

① データ伝送距離による比較

4Kカメラを中継地点の内、事務所から最も遠いD点(距離184m)および最も近いE点(20m)に配置して撮影した映像のキャプチャ画像を写真-2(a), (b)に示す。事務所からの直線距離は明確に差があるものの、4K映像の画質等には影響しなかった。なお、写真-2に示す画面のキャプチャは解像度を落として表示している。



(a) D地点(事務所から最も遠い)



(b) E地点(事務所から最も近い)

写真-2 4K映像比較(データ伝送距離)

② ビットレートによる比較

中継地点Cに4Kカメラを設置し、ビットレートの上限を通常24Mbpsで撮影する映像と4Mbpsに下げて撮影する映像の2パターンを撮影した。両者をズームしたものを写真-3(a), (b)に示す。ビットレート上限が24Mbpsの場合では鉄筋一本一本が確認できるのに対し、4Mbpsではぼやけているなど対象物の解像度に差が出ている。監視・巡視に用いるには映像を明瞭に保つためビットレート上限をできるだけ高い数値で維持する必要がある。現場にカメラを10台近く置くような場合を考えるとWi-Fi通信では要求性能を満たせず、L5Gのような高速通信が必要になることを確認した。



(a) ビットレート上限:24Mbps



(b) ビットレート上限:4Mbps

写真-3 4K映像比較(ビットレート上限)

4.3 施工管理アプリケーションでの動作検証

施工管理の視点から、より管理業務に近いファイル転送による検証を行った。検証の概念図を図-8に示す。掘削面にて各中継地点と通信を行える位置に測定点①~④を新たに設定し、各点で次の測定を行った。

- (1) L5G → Wi-Fi 中継を受信し、施工管理アプリケーション(BIM 360)を用いたファイルのUL・DL時間測定(iPadを使用)
- (2) L5G通信を直接受信し、通信速度を再測定(L5Gを受信可能な端末FCNT SD001を使用。この項目は4.1とは異なる測定点であるため、L5G直接受信の測定も同時に行った。)

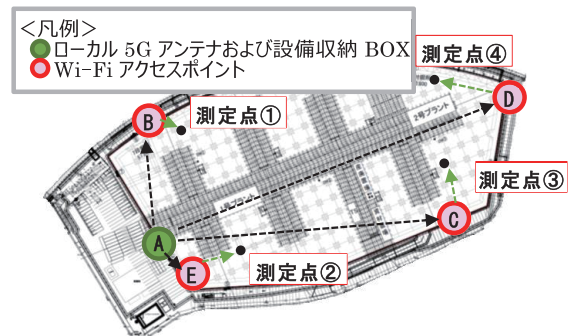


図-8 通信速度測定点(施工管理アプリ検証)

特に (1) の検証について 4.1 の検証では L5G 対応の専用端末で通信速度を測定したのに対し、こちらでは iPad のアプリで約 220MB のファイルをクラウドにアップロード・ダウンロードするのに要した時間を測定し通信速度を算出した。また、比較のために全経路を Wi-Fi 通信に置き替えた通信方式、および通信キャリアの 4G 通信でも iPad のアプリを用いた測定を行った。

測定の結果を表-4 に示す。網掛けの数値に関してはキャリアのパブリック 5G 通信を受信したため今回の考察の範囲には含まないものとする。

L5G の直接受信に関しては事務所との距離が近い測定点①、②では高速通信が可能であることを確認した。一方で作業構台の影になっている測定点③、④では通信速度が大きく下がりながらも L5G 通信の直接受信自体は可能であった。

L5G → Wi-Fi 中継の測定結果に関しては、各点の Wi-Fi → Wi-Fi 中継、通信キャリアの 4G 通信と比較して短時間でデータ伝送が行われ、通信速度に換算した場合により高速であることを確認した。測定点①～③では L5G 直接受信と比較すると通信速度は低下したが、測定に使用した端末の性能による差を含んでいることに加えて、L5G の通信速度が大幅に落ちる作業構台の影となるエリアをカバーしていること、通信経路の末端が Wi-Fi 通信であることによって既存デバイスでも受信可能になることなど運用上の利点が大いだと結論付けた。また、作業構台の影である測定点④においては、4.1.2 の結果と同様に障害物の遮蔽で L5G 直接受信の通信速度が大幅に下がった一方、中継地点を介した通信 (L5G → Wi-Fi 中継) では Wi-Fi 通信と同等の通信速度となり、障害物の影響低減策として期待された通信経路確保の効果が確認された。

L5G を含む通信方式は総じて既存の Wi-Fi のみで構築

表-4 通信速度・伝送時間 測定結果 (施工管理アプリ検証)

測定点	UL/ DL	L5G 通信専用端末測定値		L5G → Wi-Fi 中継 iPad の測定値		Wi-Fi → Wi-Fi 中継 iPad の測定値		通信キャリア4G 通信 iPad の測定値	
		通信速度 [Mbps]	伝送時間 [sec]	通信速度 [Mbps]	伝送時間 [sec]	通信速度 [Mbps]	伝送時間 [sec]	通信速度 [Mbps]	伝送時間 [sec]
①	UL	115	23	78	24	74	210	9	
	DL	175	17	107	31	58	68	27	
②	UL	200	22	84	26	70	291	6	
	DL	361	27	66	35	52	19	96	
③	UL	97	25	73	29	63	137	13	
	DL	133	18	99	25	73	34	53	
④	UL	35	24	76	36	51	341	5	
	DL	78	11	160	101	18	11	160	

した通信よりも高速であった。特に作業場から事務所へのファイル UL 時間が短くなることでその場で資料の修正が可能になり、事務所への移動時間が削減されることで業務効率化に繋がることを確認した。

5. 検証結果のまとめと考察

本検証において構築した L5G 通信および L5G → Wi-Fi 中継についての測定結果と考察を次にまとめる。

5.1 L5G 直接受信について

事務所屋上付近のアンテナから現場全域へ向けて L5G の電波を発信し通信環境を構築した。この電波は地上から約 20m 下の掘削面においてアンテナとの間に障害物がない条件であれば、10 台程の 4K カメラ映像を同時に転送できる性能で受信可能であった。この時、同じ地点で中継地点から受信した Wi-Fi 通信と比較すると明確に通信速度で勝る結果となった。

4K カメラの映像による比較からは監視・巡視作業に利用するにあたり高ビットレート上限を維持する必要性を確認した。特に巡視作業の省力化を必要とする土木工事の現場においては、広範囲をカバーするために多数の 4K カメラを配置してネットワークに接続して運用する必要があり、L5G の高速通信・多数同時接続等の特性が合致している。

また、L5G は電波の直進性のために障害物に弱いとされていたが、遮蔽の影響で当初は受信できない懸念のあった作業構台の影となる場所でも通信速度は低下するものの直接受信が可能であった。この理由については今後の検討課題であるが、壁面での反射や電波の回り込み等により受信できた可能性が考えられる。

上記内容より、L5G 通信が建設現場に対する一定の適用性を有することを確認した。

5.2 L5G → Wi-Fi 中継について

障害物の影響低減策として、事務所のアンテナから発信される L5G の電波を地上に設置した中継地点で受信し、Wi-Fi のアンテナに接続して掘削面に通信環境を構築する L5G → Wi-Fi 中継を採用した。実際の測定結果から、L5G の速度が明確に低下する障害物の影になる範囲でも Wi-Fi の通信速度までなら高速通信を維持することを確認した。これにより L5G の適用上の課題とされている条件をカバーできること、Wi-Fi 通信に中継することで既存デバイスでも受信可能になることから、期待され

た以上の性能と利用可能性を示した。

なお、本検証における L5G 通信速度の測定値が理論上の最大値を下回った要因について、想定されるものを以下に述べる。

①帯域幅の違い

理論値はミリ波帯(28GHz 帯)での運用を想定しており、最大で約 400MHz であるのに対し、今回の L5G は sub6 帯 (4.8GHz 帯) であるので最大で約 100MHz^{4)*2} となり、帯域幅が狭い分だけ同時に伝送できるデータ量が減るため通信速度が低下すると考えられる。

②アンテナの違い

理論値で想定しているアンテナはキャリア 5G で使用するような大型の基地局アンテナであり、ストリーム数(同時に利用できる通信経路の数)は最大 8 である一方、今回の L5G で使用したアンテナは簡易的であるためストリーム数は最大 2 となっている。経路の数が多いほど通信は速くなるため、今回の構成では通信速度が理論値より劣ることが想定される。

③変調方式の違い

変調方式とは、電気通信の基本信号の上にデータを乗せる際の変換する方式を指す。理論上の最大性能は変調方式として 1 シンボルあたり 10 ビット ($2^{10}=1024$) の情報を送れる 1024QAM³ を採用しているが、現状の L5G は 1 シンボルあたり 8 ビット ($2^8=256$) の情報を送れる 256QAM を採用しており、時間あたりに送ることのできるデータ量が理論値よりも少ない。

④ UL/UD 比率の違い

理論上の最大通信速度はキャリア 5G と同様の UL/DL 比率 (1:4) の場合の DL の速度を想定しているため、UL/DL 比率 1:1 としている今回の L5G 通信では UL に通信の比率を割いている分だけ最大速度が小さくなると考えられる。

6. まとめと今後の課題

本報告では大規模掘削工事を施工中の工事現場において、L5G の建設現場への適用性と障害物の影響低減策の効果について検証を行った。結果としては、L5G が現場業務の効率化のための先進技術に要求される高速・安定通信等の性能を有すること、必要な対策を講じることによって障害物の存在する環境でも Wi-Fi の通信速度まで

なら高速通信が可能であることが確認され、L5G 通信は現場の通信環境として運用可能であると結論付けた。

建設業への L5G 普及にあたっては、主に次に述べる 3 つの課題の解決が急務となる。

①運用にかかるコスト

L5G を運用するための機器・設備は未だ非常に高額である。現実的に運用できるようになるには、さらなる技術開発による価格の低下が待たれる。

② L5G 受信可能デバイスの整備

現在市場に普及している多くのスマートフォン、タブレット等のデバイスはそもそも L5G を受信できない。5G 本来の高速通信、安定回線等の利点を活用するためには、施工管理に使用できる 5G 対応デバイスが増えていく必要がある。

③装置が大きく設置にクレーンが必要

本検証に用いた設備収納 BOX は公衆電話ボックスと同等の大きさで重量が約 900kg あり、現場への設置には 4t ユニックによる揚重作業が必要になった。こちらも機器の小型化による設置・運用の簡便化が強く望まれる。

上記の課題等が解決されることが前提であるが、将来的には建設現場に L5G を展開することによって、現場で図面編集・資料作成が可能になって事務所との往復移動がなくなり、現場監視への 4K カメラ映像の採用で巡視の機会が削減し得ることを本検証により確認した。さらに、現場業務の効率化・省人化の技術が現実的なコストで運用可能になることによって、当社が目標として掲げている DX ビジョン 2030⁵⁾ のような建設業の業務形態の変革が可能になることが期待される。

参考文献

- 1) 伊藤圭佑, 藤本直也, 武石学, 増山大史, 山村英次: 大規模掘削現場におけるローカル 5G の適用性と効果検証, 令和 5 年度土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会, VI-246, 2023
- 2) 総務省; ローカル 5G の普及展開に向けて, p. 5, https://www.soumu.go.jp/main_content/000802944.pdf (2023.10 入手)
- 3) NTT 東日本; マネージド・ローカル 5G サービス ギガラク 5G, <https://business.ntt-east.co.jp/service/gigaraku5g/> (2023.9 入手)
- 4) 第 5 世代モバイル推進フォーラム (5GMF); 5GMF 白書 ミリ波普及による 5G の高度化 第 2.0 版, p. 51, Fig. 7-1 ローカル 5G の割り当て周波数帯,

*2 総務省の周波数割当てによりローカル 5G の sub6 帯・屋外使用の場合には周波数帯域は 4.8~4.9GHz と規定があり、帯域幅としては最大で 100MHz になる。

*3 Quadrature Amplitude Modulation (直交振幅変調) の略称

https://5gmf.jp/wp/wp-content/uploads/2023/07/5g-whitepaper-mmw_r2.pdf (2023.10 入手)

- 5) 安藤ハザマ;安藤ハザマグループ中期経営計画 2025, p.16,
https://www.ad-hzm.co.jp/assets/pdf/ir/plan/HAZAMA-ANDO_VISION2030_Medium-TermManagementPlan.pdf (2023.9 入手)

Technology demonstration of local 5G communication at a large-scale excavation site
- Practicality verification from a construction management perspective -

Keisuke ITO, Naoya FUJIMOTO

The introduction of high-speed communication technology to construction sites enables high-capacity communication, and the utilization of BIM/CIM and on-site monitoring with 4K camera images is expected to shorten work time and improve work efficiency. Local 5G communication is attracting particular attention as a next-generation high-speed communication method. However, there are concerns about communication in situations where obstacles are present due to the acute straightness of radio wave. In this paper, we report on the construction of a high-speed communication environment using local 5G communication at a large-scale excavation site and the verification of the effectiveness of measures to reduce the influence of obstacles and the applicability of local 5G.