

[5G時代の幕開けに向けた研究開発と実証]

4 5G 総合実証実験における取り組み



—5G 超高信頼・超低遅延通信のトラック隊列走行への適用—

吉野 仁 | ソフトバンク (株)

5G 移动通信システム

2020年の商用化に向けて第5世代移动通信システム(5G)の研究開発が行われている。5Gは従来の能力拡張である拡張モバイルブロードバンド通信(eMBB: enhanced Mobile BroadBand)に加えて、超高信頼・低遅延通信(URLLC: Ultra Reliable and Low Latency Communications)や超多数端末接続通信(mMTC: massive Machine Type Communications)を新たな領域としており、高度情報化社会の社会基盤として期待されている。特にURLLCとmMTCは新しい市場を開拓できる可能性があり、具体的な5Gの適用事例の確立が急務である。

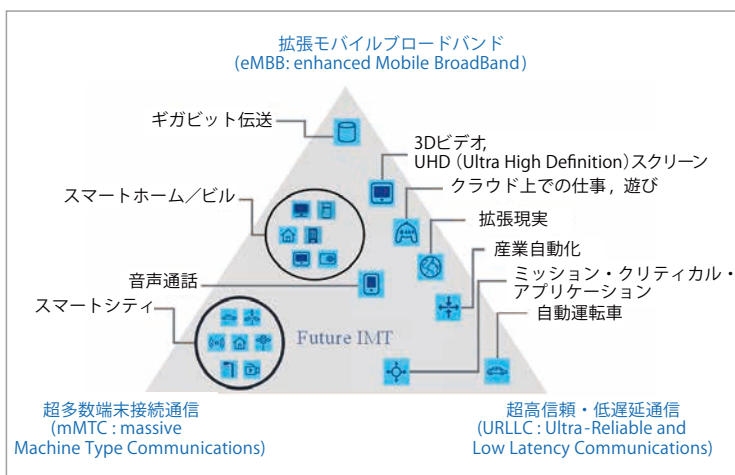
利用シナリオと無線能力

図-1に5G移动通信システムの利用シナリオを示す¹⁾。2020年以降の移动通信のさまざまな利用

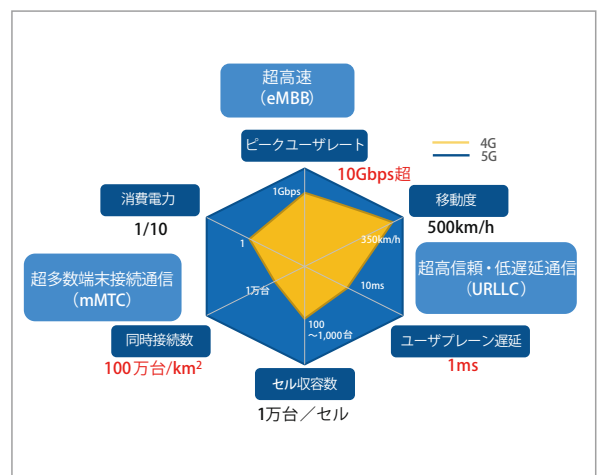
シナリオを想定して、通信の立場から分類し、大きく3つの通信分野に大別している。

従来のモバイルブロードバンド通信の拡張である「拡張モバイルブロードバンド通信(eMBB)」, 自動運転や産業機器の制御を想定したミッション・クリティカルな「超高信頼・低遅延通信(URLLC)」およびセンサネットワークやIoT(Internet of Things) 端末通信のような多数同時接続を想定した「超多数端末接続通信(mMTC)」である。実際の利用シナリオではこれら3つの通信要素を組み合わせた通信を用いる。4Gまでの移动通信システムでは、モバイルブロードバンド通信が主な対象であったが、5Gからは新たにURLLCとmMTCが新たな移动通信の領域として加えられた。2020年以降、5G移动通信が社会インフラとして使われることを想定している。

さらに、これらの利用シナリオから5Gに必要な無線能力を特定したものを図-2に示す。同図



■図-1 2020年以降の5Gの利用シナリオ



■図-2 5Gの無線能力

において、内側の橙色の六角形が4G、外側の青色の六角形が5Gの無線能力を表す。主な指標としては、ピークユーザレート、ユーザプレーン遅延、同時接続数、消費電力、セル収容数、移動度などがある。10Gbps以上のピークユーザレートは拡張モバイルブロードバンド通信（eMBB）のサポートに必要であり、また無線区間1ms以下の遅延およびブロック誤り率（BLER：Block Error Rate） 10^{-5} 以下を満たす信頼性は、超高信頼・低遅延通信（URLLC）のサポートに必要となる。さらに超多数端末接続通信（mMTC）のサポートには、無線端末装置の同時接続数100万台/km²が必要であるmMTCの分野では、無線端末の消費電力を4G比で1/10とすることを目標としている。5Gでは移動度に関しては高速列車での利用を考慮して500km/hにおける通信のサポートを目標としている^{1), 2)}。これらの無線能力を見ると、5Gは大変、高性能かつ高機能なシステムを目指していると思われるが、実際の応用事例（ユースケース）では、これらの能力や機能をすべて同時に必要とするケースはほとんどないことが分かる。

図-3に5Gの無線能力の考え方を示す。同図では、ビデオストリーミング、IoTセンサネットワーク、自動車の自動運転支援の3つの応用事例に必要なとされる無線能力の一例をレーダチャートに示している。ビデオストリーミングのケースではピークユーザレートについて大きな無線能力を必要とするが、ユーザのデータ通信の遅延（ユーザプレーン遅延）や消費電力の低減はあまり必要としない。一方、IoTセンサネットワークでは、たとえば温度、湿度、振動などの比較的情報量の少ないデータを長期間にわたって通信させる必要がある。また、橋梁に設置され老朽化を監視する振動センサの通信端末は、いったん設置されると、そう簡単に電池を取り換えるわけにはいかないことが多い。そのため、低消費電力の通信が重要となる。他方、自動車の自動運転支援のための通信では、車両の制御のための

メッセージのやりとりを行う場合、低遅延な通信が必要となるが、あまり高速なピークユーザレートは必要としない。このように、応用事例によって通信に要求される無線能力が大きく異なることが分かる。5Gでは応用事例に応じて、必要な無線能力を必要とだけ提供するという柔軟な無線システムを目指している。

このような柔軟な無線システムを実現する上で、無線技術においては、柔軟な無線フレーム構成技術、無線リソースマネジメント技術を、5G実現のための鍵となる技術としている。これらは、それぞれ異なる情報量、要求遅延や通信品質を持つアプリケーションで効率的に通信する上で必要な技術である。

セルラー系通信で提供される車車間通信

図-4にセルラー系通信で提供される2つの車車間通信の形態を示す。第1の形態は、通常のセルラー通信と同様に、基地局を介した車車間通信である。無線端末から基地局への上り回線（Uplink）と基地局から無線端末への下り回線（Downlink）からなる。Uuインタフェースとも呼ばれている。

基地局に設置された高性能アンテナや高性能無線機に助けられて比較的安定した通信が確保される。通信は移動通信ネットワーク（コアネットワーク）を介して行われるため、無線区間の伝送遅延に加えて移動通信ネットワーク内での伝送遅延がある

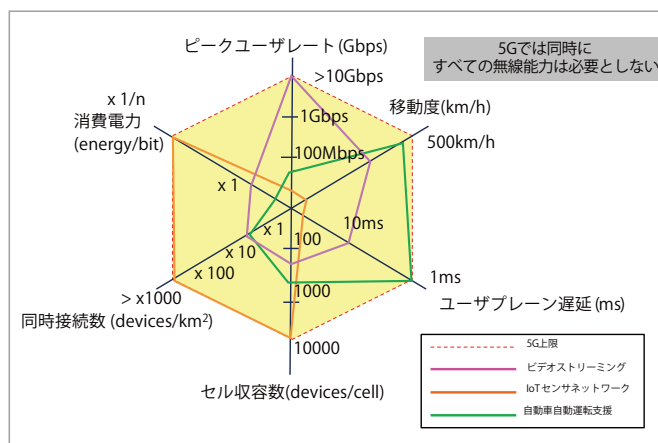
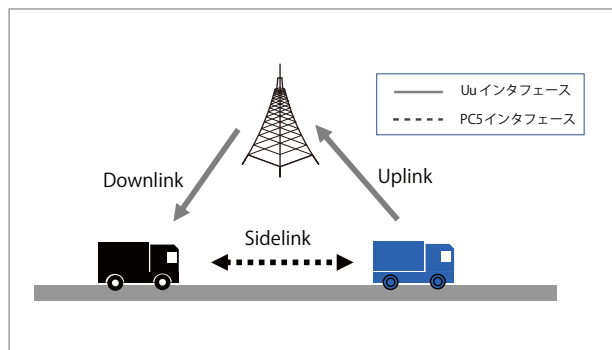


図-3 応用事例ごとの所要無線能力（例）

が、それでも4Gにおいて数十から百ミリ秒の比較的低い伝送遅延で通信が可能である。5Gになると基地局直下にMEC (Mobile Edge Computing) サーバを置いて通信を折り返して、十数ミリ秒以下の遅延で通信することも可能となる。

第2の形態は、基地局を介さずに車載無線端末間で直接通信をする形態である。Sidelinkと呼ばれる通信回線である。PC5インタフェースとも呼ばれている。車載無線端末が直接通信するため、割り込み車の有無や通信環境（アンテナ設置場所など）により通信品質が劣化する場合がある。しかしながら、移動通信ネットワークを介さずに無線端末間で直接通信するため、数ミリ秒以下の伝送遅延で通信が可能である。さらに、Sidelinkでは、無線リソース（通信に割り当てる無線周波数帯域幅や時分割のスロット数など）の管理を、(1) 基地局側で行うモードと(2) 無線端末側で自律的に行うモードがある。上記(1)の場合、効率的なリソース管理が可能となり輻射や混信／干渉の軽減が可能となる。一方、上記(2)の場合、基地局圏外においても通信が可能となる。

トラックの隊列走行は高速道路などの通信環境が整備された路線でまず実用化されると考えると、上述した2つのセルラー系通信は、トラック隊列走行の車車間通信の冗長性を確保する上で有効であると考えられる。隊列走行では通信の多重化（2重系もしくは3重系）が必要であるが、少なくとも通信回線の2重化はセルラー系通信のみで構成することが可能である。



■図-4 セルラー系通信の2つの車車間通信

5Gのトラック隊列走行への適用

トラック隊列走行では、数台のトラックが隊列車群を形成し走行する。先頭車両が有人でドライバーにより運転される。後続車両は無人で先頭車両に追従する自動運転である。トラック隊列走行では、車車間の通信を用いて隊列車群を一体に制御する。

レーダなどを用いて先行車両と後続車との車間距離を測定し、速度に応じた安全な車間距離を保持する適応車間距離制御（ACC：Adaptive Cruise Control）はすでに実用化され多くの車両に搭載されている。しかし、車間距離情報だけの制御では前方を走る車の減速度の発生開始から車間距離が変化するまでに時間的に大きな遅れが生じる。後続車の減速が発生するまでにはさらに遅れが生じる。このためACCだけで追突を防止するには長い車間距離が必要である。一方、協調型適応車間距離制御（CACC：Cooperative ACC）では車車間通信を用いて前方車両の速度や位置の情報を後続車に伝送し車速を制御するため、前方車両が急制動したときの車間距離制御性を大幅に改善することができる。また、制御の遅れによるハンチングの少ない安定した走行も可能となる。さらなる燃費低減、道路の交通容量の増大のためには、安全を確保しつつ車間距離の短縮と隊列車両数の増大が必要で、低遅延かつ高信頼の通信を実現できる5G URLLCのこの分野への活用が期待される。

さらに、トラックの隊列走行では、複数のトラックが1つの隊列を形成し、その隊列が1つの制御システムとなっている。この制御システムにおいては、操作量と状態量が、無線回線を介して複数のトラックをまたぐことになる。各トラックの積載量や、加速性能、ブレーキ性能、操舵性能には、ばらつきがあるので、将来、隊列のより安定した最適制御を行うためには、低遅延・高信頼の5G URLLC通信が、制御システム内の制御情報のやりとりに必要になると考えられる。

トラック隊列走行実験

想定する応用事例

5G 通信をトラック隊列走行へ適用する実証実験は総務省の 5G 実証実験の 1 つとして実施されている³⁾。この実証実験では、図-5 および図-6 に示す応用事例に取り組んでいる。

図-5 の応用事例において通信の要求条件は大別すると 2 つある。1 つは車両制御系情報（速度、車両の位置など）の通信に必要な小容量低遅延通信である。他方は隊列走行を監視するビデオ監視系情報（車両の周囲状況の監視など）の通信に必要な大容量低遅延通信である。前者においてはさらに高信頼性も必要となる。図-6 の応用事例においては、移動通信事業者のコアネットワークを通した遅延を低遅延にすることが必要であり、かつ、従来のセルラー

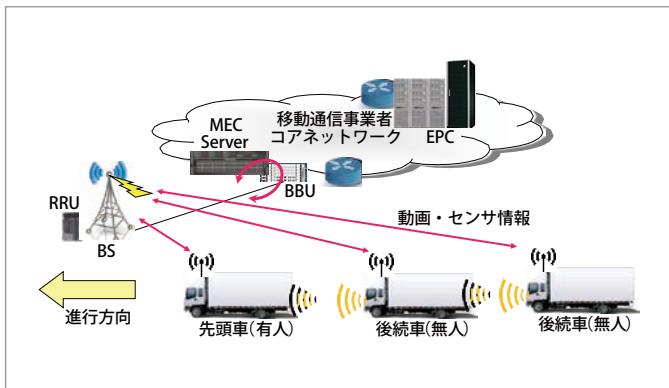
通信の基地局経由の通信（Uplink と Downlink）が必要となる。基地局を経由した通信で、車両監視のための大容量低遅延のビデオ通信と、車両の遠隔操作のための小容量低遅延通信が必要となる。

テストコースでの試験結果

日本自動車研究所の城里テストコースで、(1) 基地局経由の車車間通信（図-7）と (2) 車車間直接通信の実験を行った（図-8）。5G 無線機は、5G NR（New Radio）ベースの無線仕様に準拠した。

基地局経由の車車間通信

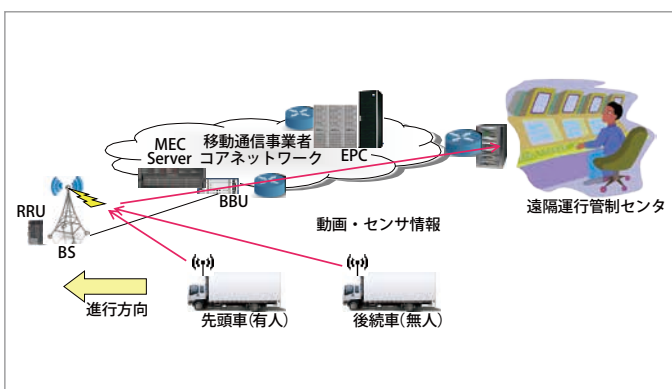
図-9 に伝送遅延特性（CCDF：相補累積分布関数）を示す。同図より上下回線とも 99.99% 以下の確率で片道の無線区間伝送遅延 1ms 以下、ネットワーク往復の End-to-End 遅延 3.0ms 以下を達成していることが分かる。



■ 図-5 隊列走行ユースケース 1（車両制御と後続車周辺のビデオ監視）



■ 図-7 基地局経由の通信（基地局の外観）



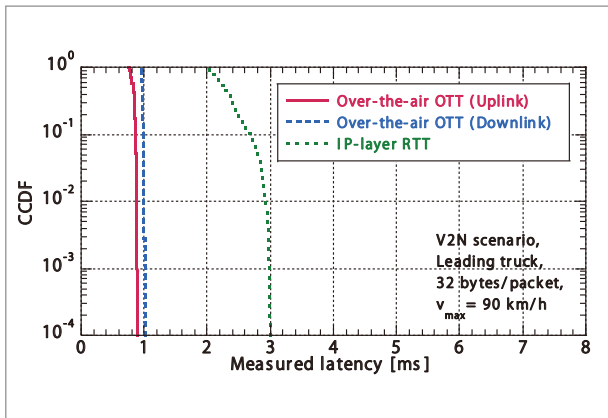
■ 図-6 隊列走行ユースケース 2（車両の遠隔監視と遠隔操作）



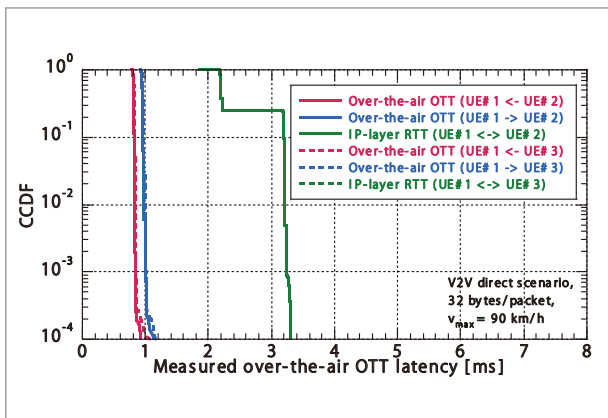
■ 図-8 車車間直接通信（ビデオ伝送実験）

車車間直接通信 (5G-NR Sidelink)

図-10 に伝送遅延特性 (CCDF) を示す. 同図より Sidelink において, 先頭車から後続車 (BL: Backward Link) および後続車から先頭車 (FL: Forward Link) とともに 99.9% 以上の確率で片道の無線区間伝送遅延 1ms 以下を達成していることが分かる. また, 99.99% の確率で, 往復の End-to-End 遅延 3.3 ms 以下を達成していることが分かる.



■ 図-9 伝送遅延特性 (CCDF) (基地局経由通信)



■ 図-10 伝送遅延特性 (CCDF) (車車間直接通信)

新東名高速道路における隊列走行実験

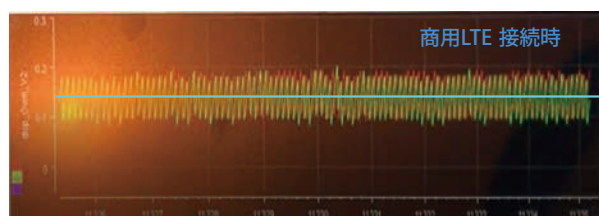
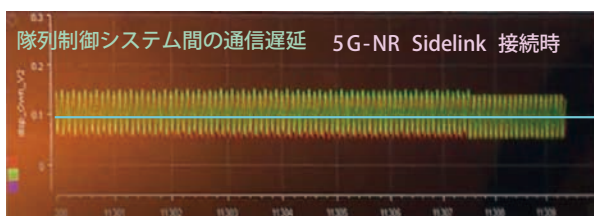
本実験では, 5G 無線機を実際のトラック隊列走行の CACC 装置と結合し, 制御メッセージを 5G-NR Sidelink で伝送した. 実際の走行環境として, 新東名高速道路において, 5G トラック隊列走行を行った (図-11 (a), (b)). 図-12 に CACC 装置から見た伝送遅延を示す. 縦軸は CACC 装置内部で観測された伝送遅延, 横軸は走行距離である. 実験



■ 図-11(a) 新東名高速道路 5G CACC 実験



■ 図-11(b) 新東名高速道路 5G CACC 実験



■ 図-12 ECU から見た伝送遅延 (5G-NR と 4G LTE の比較)

は商用の4G LTE ネットワークと比較して行った。CACC 装置内部での伝送遅延 (100ms 程度) も含まれているため、4G LTE では 150ms, 5G-NR では 100ms の遅延が観測されている。両者を比較すると、5G-NR Sidelink は E2E で 50ms 程度、通信伝送遅延が短縮できることが分かる。

現行の CACC 装置内部の伝送遅延 (100ms 程度) と比較して、5G-NR の伝送遅延 (3ms) がほとんど無視できるレベルであることも分かる。今後の隊列走行の高度化 (車間距離の短縮や、さらなる走行の安定性確保) に向けて、5G-NR Sidelink の低遅延性と高信頼性が貢献できることを確認した。

参考文献

- 1) ITU-R, IMT Vision - Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond, Recommendation ITU-R M.2083, ITU-R (Sep. 2015).
- 2) 5GMF : 5GMF White Paper "5G Mobile Communications Systems for 2020 and Beyond," Ver.1.01 (July 2016).
- 3) 総務省 : 5G 総合実証試験の開始, 報道資料, http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban14_02000297.html (2017年5月).

(2019年11月19日受付)

■吉野 仁 hitoshi.yoshino@softbank.co.jp

1986年理科大・工・電気卒業。1988年同大学院工学研究科修士課程了。2009年ソフトバンク(株)入社。以来、移動通信システムの研究に従事。現在、同社先端技術戦略部担当部長。博士(工学)(東工大)。電子情報通信学会, IEEE各会員。

