
5Gミリ波は東京において良好に動作していた

都内のミリ波のパフォーマンスに関する 第三者によるベンチマーク調査

2022年6月

作成者

シグナルズ・リサーチ・グループ



www.signalsresearch.com

調査依頼元: クアルコム

この報告書は、シグナルズ・リサーチ・グループが10年以上に渡って行ってきたベンチマーク調査の測定方法を利用して作成されたものであり、当社は調査の実施者として、掲載されている調査結果と分析に関して保証いたします。

シグナルズ・リサーチ・グループは、パフォーマンス関連のベンチマーク調査を含む無線通信関連のコンサルティング・サービスを提供しているほか、シグナルズ・アヘッド・リサーチ・ニュースレター(www.signalsresearch.com)も発行しております。

調査結果概要

2022年4月下旬にシグナルズ・リサーチ・グループ (SRG) は日本の東京で5Gミリ波のパフォーマンスに関するベンチマーク調査を実施しました。この調査はクアルコム社に代わって当社がおこなう4回目のベンチマーク調査となります。通信事業者が2019年に最初の5Gネットワークを立ち上げて以来、当社でも独自に5Gミリ波に関する調査をいくつか進めてきました。こうした調査をおこなう利点は新機能や既存機能の性能向上といった技術の進化を追うことができるということです。また、当社が行うミリ波の測定は、もはや米国内に限られたものではありません。昨年ヨーロッパ(フィンランド・ヘルシンキ)にて初の5Gミリ波ベンチマーク調査を行いました。そして喜ばしいことに今回は東京で、数社の通信事業者のネットワークを使用して5Gミリ波の測定をおこないました。

この調査に関して微妙な点があるとしたら、それは終わりが無いということです。少なくとも当社ではそのように認識しています。現在、業界は市場導入の観点からも技術の進歩の観点からも、5Gの初期段階にあります。3GPPのリリース15は普及段階にある一方で、リリース16以降に関連する機能はまだ初期の段階です。産業向けの活用例に見られるような新しいユースケースが登場しつつあるだけでなく、新しいリリースに含まれる新機能の導入や、現在使用されているネットワークの機能を充実させる目的でベンダーが提供する機能拡張の導入も控えています。近い将来の5Gミリ波に実装されるであろう特徴の中で最も魅力的だと考えられるものとしては、アップリンク方向における最大4バンドのキャリア・アグリゲーション(4x100 MHz)のサポート、固定無線アクセスのユースケースを対象としたCPE向けのミリ波スタンドアロン(SA)ネットワーク、5Gミリ波とミッドバンドおよび5GアセットとNR-DC(新しい無線技術を用いたデュアルコネクティビティ)との統合などが挙げられます。NR-DCを用いてミッドバンドと5Gミリ波スペクトルをモバイル機器が同時に活用することで、データ速度の向上、エリアカバレッジの改善、5Gミリ波エリア出入り時の優れたモビリティの提供が可能になります。

東京で実施されたベンチマーク調査の主な結果は以下の通りです。

- アップリンク方向の5Gミリ波キャリアアグリゲーション(2x100 MHz)は、その帯域幅に加えて、データ速度にも大きな影響を及ぼしました。具体的には、5Gミリ波の2つの周波数帯を同時に使用することによって、1つの周波数帯を使用した場合と比べて、アップリンク方向の平均データ速度はほぼ2倍の数値が記録されています。また、追加でLTEのアンカーセルを利用した場合、5Gミリ波の物理層におけるアップリンク方向のスループットが300 Mbpsを超えることも珍しくありませんでした。一方、5Gミリ波がアップリンク方向において性能を発揮する範囲は約200メートルで、その地点で測定された通信速度は100Mbps弱でした。
- 測定シナリオや比較対象の仕様にもよりますが、ミッドバンド5Gと比べて5Gミリ波のアップリンク方向における性能は最大でその4倍となりました。他の測定では、「より控えめ」な結果となり、約2倍でした。なお、ミッドバンド5Gのアップリンク方向におけるスループット(100 MHz TDD)は通常時に50~70 Mbpsの範囲内で、ピークは80 Mbps近くでした。この結果から、調査時にはミッドバンドのネットワークに対する負荷が軽かったと考えられます。これを上記の結果と合わせて考えると、セルサイトを中心に200Mbpsのスループットが測定される範囲内では、5Gミリ波のアップリンク方向におけるスループットがミッドバンド5Gスペクトルのそれを上回り、よりセルサイトに近い場所ではその性能の優位性がさらに高くなることがわかります。
- ピーク時のダウンリンク方向におけるスペクトル効率、すなわち所定のスペクトルに対するスループットは、2019年4月に行った最初の調査で測定された数値から66%増加しました。具体的な数値としては、最初に東京で実施された調査ではピーク時のデータ速度は1.2Gbps程度であったのに対して、通信中の基地局から160m離れた場所でも2Gbpsかそれをわずかに超える速度が頻繁に、かつ継続的に記録されています。当社の最初の調査では今回東京で確認された5Gのミリ波帯の有効範囲ほど広くはありませんでした。なお、いずれの結果も400MHzのミリ波で得られた結果であったことから、800MHzのスペクトルを持つ事業者は、ピーク時のスループットの合計が最大で2倍になると推定されます。
- パフォーマンスに関しては良い結果が得られたものの、5Gミリ波とは直接関係しない部分にて改善の余地が見受けられました。まず、一部の密集地域では、LTEアンカーセルと関連してハンドオーバーが頻繁かつ継続的に発生することがありました。また、割り当てられたLTEセルが隣接する5Gミリ波無線にマッピングされていなかったために、5Gミリ波のネットワークに再接続できなかったのです。これらのハンドオーバーは、LTEのスループットに影響を与えるだけでなく、その後の5Gミリ波の測定結果にも影響を及ぼしました。この問題はミリ波の性能とは直接関係ありませんが、簡単に対処できるものであり、事業者がネットワークの最適化活動の一環として取り組むべき課題です。
- スマートフォンも、LTEハンドオーバーの度にLTE RRC Connected状態に戻りました。他の5Gミリ波ネットワークでの測定結果から、スマートフォンは NSA Connected状態を維持すると予想してい

5Gミリ波現況、東京において良好

都内のミリ波のパフォーマンスに関する第三者によるベンチマーク調査

ました。そして、一部の測定で記録されたSSBビームインデックス間の切り替え回数は、一般的に測定される数値よりもはるかに大きなものでした。こうした違いは性能の向上に寄与するものもありますが、その多くは不要であり、場合によっては実際にSINRやRSRP、スループットの低下といった悪影響を及ぼすものもありました。さらに、ミリ波のエリアに入る際のミッドバンド5Gから5Gミリ波への適切なハンドオーバーにおいても改善の余地があります。この課題の解決にあたっては、将来的にNR-DC機能の普及が役立つかもしれません。

以下のセクションでは、この概要の裏付けとなる詳しい調査結果をご報告いたします。

図表索引

図1. KDDI 5Gミリ波エリアカバレッジ	7
図2. 楽天 5Gミリ波エリアカバレッジ	7
図3. NTT DoCoMo 5Gミリ波エリアカバレッジ	8
図4. Softbank 5Gミリ波エリアカバレッジ	8
図5. ミリ波無線機	9
図6. 160m地点でアップリンク300Mbps	11
図7. アップリンク方向における定点測定の結果	12
図8. 5Gミリ波セルサイトと定点測定の実施地点	13
図9. アップリンク方向における5Gミリ波のスループット	14
図10. アップリンク方向における5Gミリ波の測定地点 - PCI 242	15
図11. アップリンク方向における5Gミリ波のスループット- PCI 242	15
図12. アップリンク方向における5Gミリ波の測定地点 - PCI 324	16
図13. アップリンク方向における5Gミリ波のスループット - PCI 324	16
図14. 測定地点18から見るPCI 324	17
図15. アップリンク方向における5Gミリ波の測定地点 - PCI 437	18
図16. アップリンク方向における5Gミリ波のスループット - PCI 437	18
図17. アップリンク方向における5Gミリ波のスループット対RSRP	19
図18. アップリンク方向における5Gミリ波のスループット対距離	19
図19. 5Gミリ波RSRP対距離	20
図20. アップリンク方向における移動測定の結果	21
図21. アップリンク方向におけるスループット	22
図22. アップリンク方向におけるスループット対RSRP - PCI 225	23
図23. アップリンク方向におけるスループット対RSRP - PCI 200	23
図24. アップリンク方向におけるスループット対RSRP - n78帯	24
図25. n78帯におけるRSRPの分布	24
図26. アップリンク方向における5Gミリ波のスループット対距離	25
図27. ダウンリンク方向における5Gミリ波のパフォーマンス	26
図28. ダウンリンク方向における5Gミリ波のスループット対RSRP	27
図29. ダウンリンク方向における5Gミリ波のスループット対SINR	27
図30. ダウンリンク方向における5Gミリ波のスループット対距離	28
図31. ダウンリンク方向における5G n78帯のスループット対RSRP	28
図32. LTE PCI マップ	30
図33. 5Gミリ波PCIマップ	30
図34. セルとハンドオーバー回数-接続方式別	31
図35. 5G RSRPとPCI	31

図36. 5G RSRPとPCI - 時間軸の拡張.....	32
図37. PDSCHスループットとLTE PCI	33
表1. RRCの状態に関する情報.....	34
図38. 5G PDSCHのスループットとSSBビームインデックス.....	35
図39. SSB-SINRとSSBビームインデックス.....	35
図40. RSRPとSSBビームインデックス	36

5Gミリ波現況、東京において良好

都内のミリ波のパフォーマンスに関する第三者によるベンチマーク調査

背景

SRGは、米国に拠点を置く調査コンサルタント会社で、2004年に設立されました。SRGでは *Signals Ahead* という定期購読制の研究ニュースレターを発行しており、無線通信のエコシステムにあらゆる面に関わる世界各国の企業の方々にご購読いただいております。購読者には、世界最大のモバイル通信社、主要インフラサプライヤー、サブシステムサプライヤー、モバイル機器メーカー、コンテンツプロバイダー、部品サプライヤー、金融機関などが含まれます。

当社が広く認知されている分野のひとつがベンチマーク調査です。新しいモバイル機器の技術や機能の商業利用が開始した際、世界各国にて調査を行っています。その一例として、2018年に世界初の5Gネットワークが開始されてから現在までの間に、この次世代技術に関連するベンチマーク調査結果を *Signals Ahead* で24件発表してきました。調査対象は、5Gの新機能や、5Gが頻用モバイルアプリのユーザー体験に及ぼす影響、幅広い周波数やデバイス、チップセットの性能など多岐にわたります。

この報告書は当社がクアルコム社の依頼のもとで行った4回目の5Gミリ波調査の結果となります。2019年の最初の調査以来、当社ではパフォーマンスの向上はもちろん、固定無線アクセスや屋内展開といった新しいユースケースや、アップリンク方向の2キャリアアグリゲーションといった新しい機能など、5Gの技術が日々進歩・進化していくのを目の当たりにしてきました。また5Gミリ波はもう米国だけに留まるものではありません。前回はヨーロッパでの調査結果も含めての報告でしたが、今回は日本の東京で行われた調査のみに焦点を当てています。

5Gミリ波現況、東京において良好

都内のミリ波のパフォーマンスに関する第三者によるベンチマーク調査

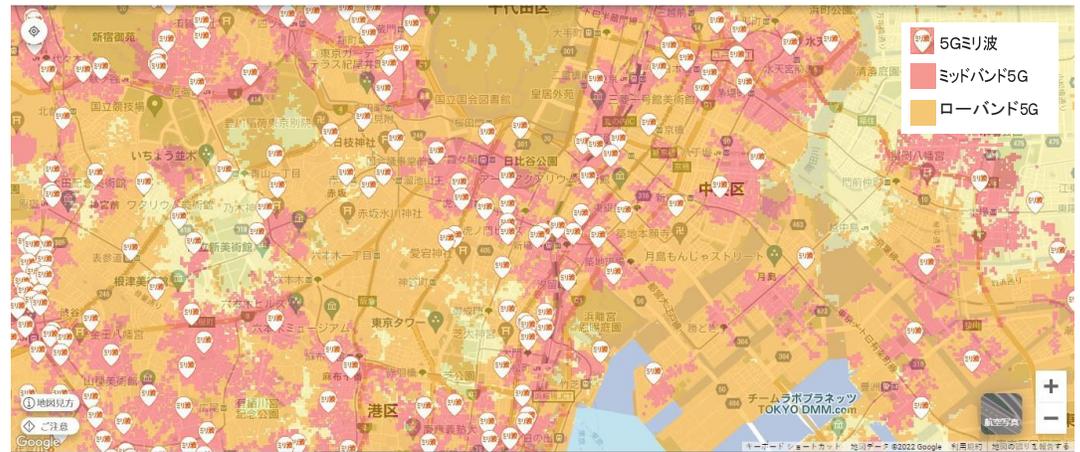
東京において5Gミリ波の状態は良好

すでにある報告によると、現在、日本には全国で20,000以上もの5Gミリ波基地局が存在するとのことです。今回行った調査はこのことを検証するためのものではありませんが、測定した性能の特性と併せて考えると、有意義な情報です。さらに東京都心で複数の5Gミリ波セルクラスターを測定した結果を踏まえ、この調査結果では通信事業者がどこで、どのように5Gミリ波を使用しているかについて独自の視点から分析いたします。

5Gミリ波の無線機は概ね複数階のビルの上に設置されていました。また、街頭の電柱に設置されたものや、東京駅のエントランス内に設置されたものもありました。ビルの屋上に設置された無線機は肉眼で発見するのは難しいものの、優れたカバレッジを提供できていると考えます。通信事業者のカバレッジマップがなければ、多くの無線機を発見できなかったと思います。

次の4つの図は、日本の通信事業者4社の5Gエリアカバレッジマップです。4つの図には、5Gのミリ波基地局が十分に配置されていることが示されています。今回の調査では、市場全体を代表すると思われる基地局に焦点を当てて測定を実施しました。また測定地点には、東京駅のような通勤によく利用される駅などの要所や、見つけやすいものも含みました。

図1. KDDI 5Gミリ波エリアカバレッジ



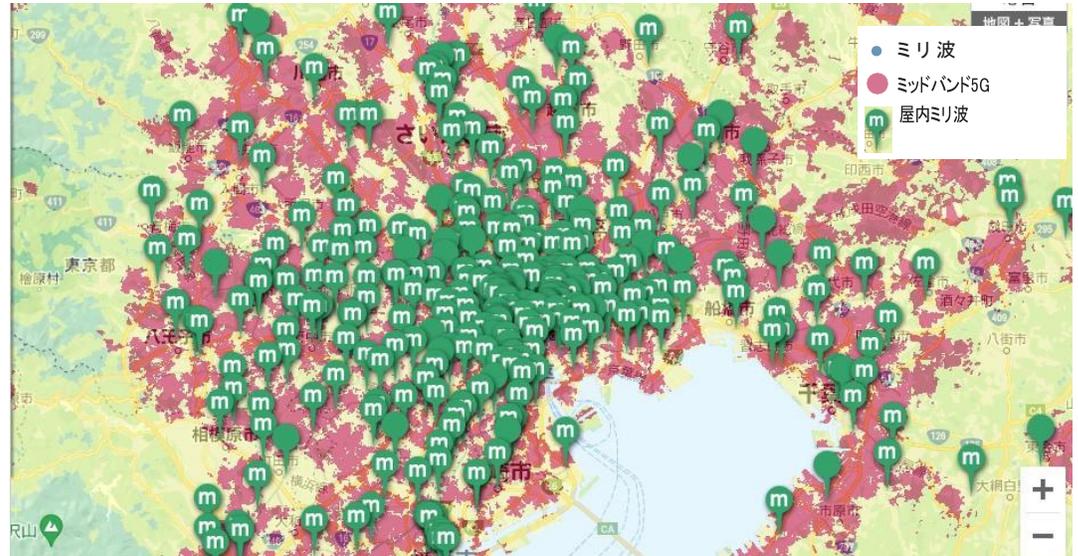
データ: KDDI ホームページ

図2. 楽天 5Gミリ波エリアカバレッジ



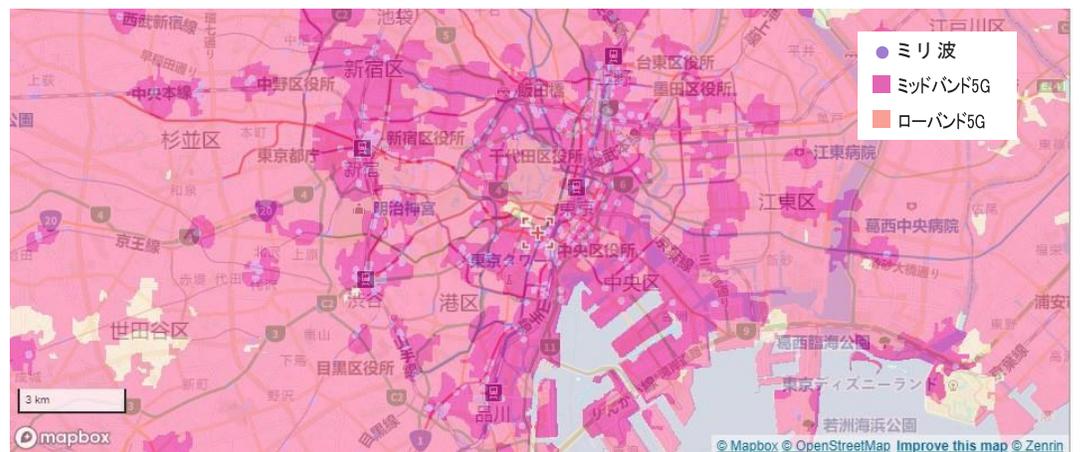
データ: 楽天ホームページ

図3. NTT DoCoMo 5Gミリ波エリアカバレッジ



データ: NTT DoCoMo ホームページ

図4. Softbank 5Gミリ波エリアカバレッジ



データ: Softbank ホームページ

最後に、図5は、ある通信事業者の5Gミリ波無線機と思われるものです。このような配置は、市内で確認されたものの典型的な例です。5Gミリ波無線機が比較的高い位置に設置されていることによって幅の広い道路でも充分カバーすることができ、場合によっては無線機が向けられている道路に沿ったエリアと、その道路と交差する別の道路に沿ったエリアの両方をカバーすることもあります。

図5. ミリ波無線機



データ: 楽天ホームページ

キャリアアグリゲーションによる5Gミリ波のアップリンク方向における性能は帯域幅とカバレッジの観点から見て優秀

当社では、5Gミリ波mpアップリンク方向における性能は過去に何度も測定してきました。2020年に初めてアップリンク方向における5Gミリ波のキャリアアグリゲーション(2x100 MHz)を測定した際には、性能は良好であったものの、とりわけダウンリンク方向で測定された数Gbpsという速度と比較すると、圧倒的なものではありませんでした。一方、東京で測定を行った結果からは、アップリンク方向の性能が非常に優れていることが分かりました。実のところ、測定を行った時点ではその結果の妥当性を疑いましたが、その後のログファイルの解析で合っていることを確認することができました。

5Gミリ波の測定では、アップリンク方向における5Gミリ波のスループット(PUSCH)が300Mbpsに達することも珍しくなく、PDCPコンバイニングによりアンカーセルとしてLTEを使用しスループットを上乘せした場合には、ピーク時のスループットが326Mbpsから370Mbpsに跳ね上がることが確認されています。この数値は、通信中のセルサイトから115mの地点で測定されました。図6は、その場所の状況を示しています。この写真では見えませんが、遠くのビルに5Gミリ波無線があります。また、Google Earthを利用して計算したところ、東京駅のすぐそばで調査を行なった際の地点からこの地点までの距離は160mでしたが、その地点ではアップリンク方向で300Mbpsを超えるスループットとダウンリンク方向で2Gbpsを超えるデータ速度が測定されました。この際ダウンリンク方向においては、400MHzの周波数帯のみが利用されています。

5Gミリ波現況、東京において良好

都内のミリ波のパフォーマンスに関する第三者によるベンチマーク調査

このベンチマーク調査では定点測定と移動測定の種類を組み合わせを行いました。またこの報告書には、東京都内の2つの場所における測定の結果が記載されています。新橋駅周辺の複数のブロックからなるエリアは、複数の無線機により広範囲にわたる5Gミリ波エリアが確認されたことに加え、測定結果から、最適化に関して検証が必要な問題(別セクションで説明)がいくつかあったために、調査の対象として選ばれました。また、東京の有名なランドマークであることに加え、通勤・通学客や旅行者の出入りで混雑する場所なため、東京駅近辺も測定対象のエリアとしました。

図6. 160m地点でアップリンク300Mbps



データ: シグナルズ・リサーチ・グループ

新橋エリアでは、主にダウンリンク方向またはアップリンク方向のデータ転送を含む定点測定を実施しました。測定は2回行われ、1回目は、さらにメインのエリアからどんどん離れていく方向でランダムに地点を選び、最終的にスマートフォンがn78帯のカバレッジに戻るまでの間で5Gミリ波のパフォーマンスデータとRFパラメータを測定しました。その後同様の測定を、今回はスマートフォンの5Gミリ波を意図的に切った状態にして、各測定地点の結果がn78帯の性能となるようにしました。この方法により、2つの周波数帯間の結果を比較することができました。

5Gミリ波現況、東京において良好

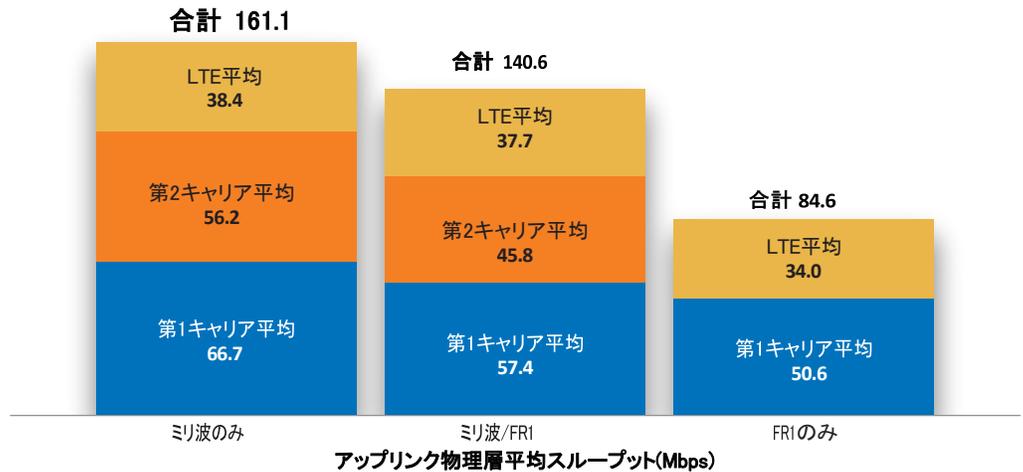
都内のミリ波のパフォーマンスに関する第三者によるベンチマーク調査

図7はその比較測定結果をグラフで示したものです。「FR1のみ」のグラフは、スマートフォンで5Gミリ波を無効にした場合のアップリンク方向における平均スループット（5G+LTE）を示しています。中央のグラフは、スマートフォンで5Gミリ波を有効にした場合のすべての測定結果を示していますが、ここには5Gミリ波が利用できない地点での結果も含まれているため、「ミリ波/FR1」という名称としています。また、スマートフォンがFR1に制限されている地点での結果は、「第1キャリア平均」の部分に含まれています。最後に、「ミリ波のみ」のグラフは、スマートフォンが5Gのミリ波を使用した測定地点のみの結果を集計したものです。つまり、スマートフォンがミッドバンド5Gに戻った場合の測定結果は除外していません。別の言い方では、「ミリ波のみ」のグラフは、「ミリ波/FR1」のグラフのサブセットを反映しているとも言えます。

アップリンク方向での5Gミリ波スループットは、ミッドバンド5Gに対し2倍以上を記録

LTEが寄与した結果を含めると、どの数値を「FR1のみ」の数値と比較するかにもよりますが、5Gミリ波に対するネットワークサポートにより、アップリンク方向でのスループットが1.7倍から1.9倍に増加しました。2つの5G周波数間で厳密に比較した場合、ミリ波は「FR1のみ」に対してアップリンク方向におけるデータ速度を2倍以上向上させています。この際、2つめのキャリアがスループット全体の通信量の5割弱を占めています。アップリンク方向における4キャリアのアグリゲーションが導入されれば、ミリ波とミッドバンド5Gの間の性能差はさらに広がるのが予想されます。

図7. アップリンク方向における定点測定の結果



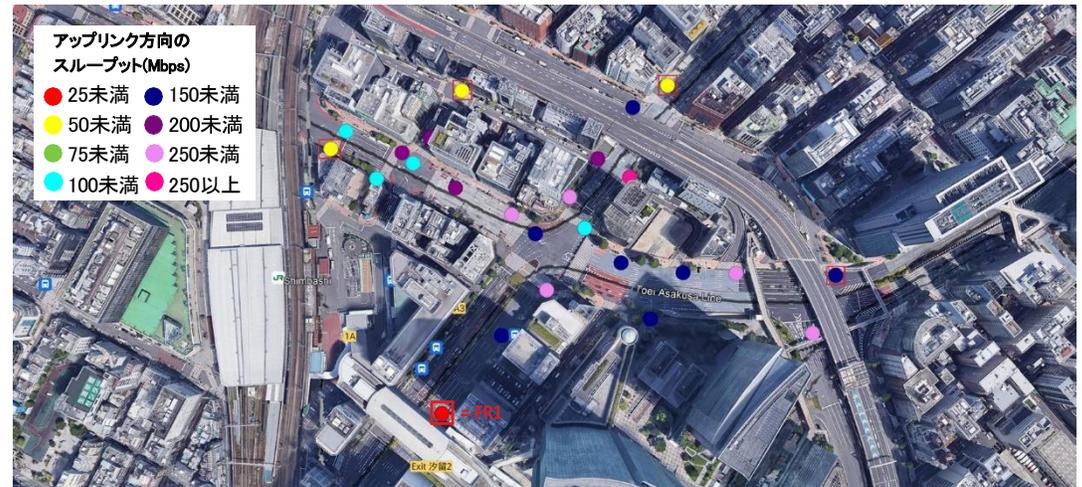
データ: シグナルズ・リサーチ・グループ

5Gミリ波現況、東京において良好

都内のミリ波のパフォーマンスに関する第三者によるベンチマーク調査

図9は、各測定地点での5GおよびLTEがそれぞれ使用された場合を含む平均スループットを地図上に示したものです。スマートフォンがn78帯を使用したセルサイトは、スループットの数値を示す点を赤い四角形で囲っています。

図9. アップリンク方向における5Gミリ波スループット結果



データ: シグナルズ・リサーチ・グループ

5Gミリ波現況、東京において良好

都内のミリ波のパフォーマンスに関する第三者によるベンチマーク調査

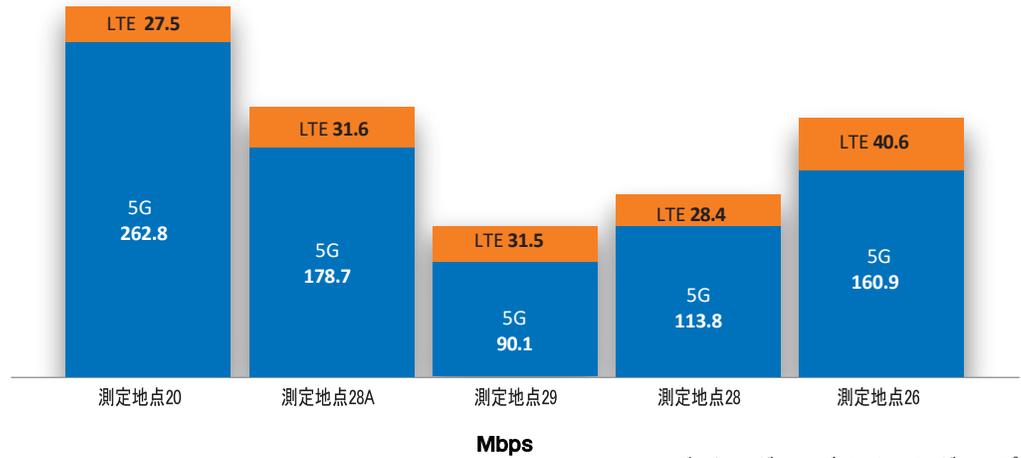
さらにわかりやすくするために、次の一連の図では、3つの5Gミリ波基地局について、それぞれの測定地点におけるアップリンク方向のスループットを示しています。図10と図11は、PCI 242の数値を示しています。予想通り、通信中のセルからより離れた測定地点では、スループットが低下しました。このセルサイトが、交差する2本の大通りをある程度カバーしていることは注目に値します。

図10.アップリンク方向における5Gミリ波の測定地点 - PCI 242



データ: シグナルズ・リサーチ・グループ

図11.アップリンク方向における5Gミリ波のスループット- PCI 242



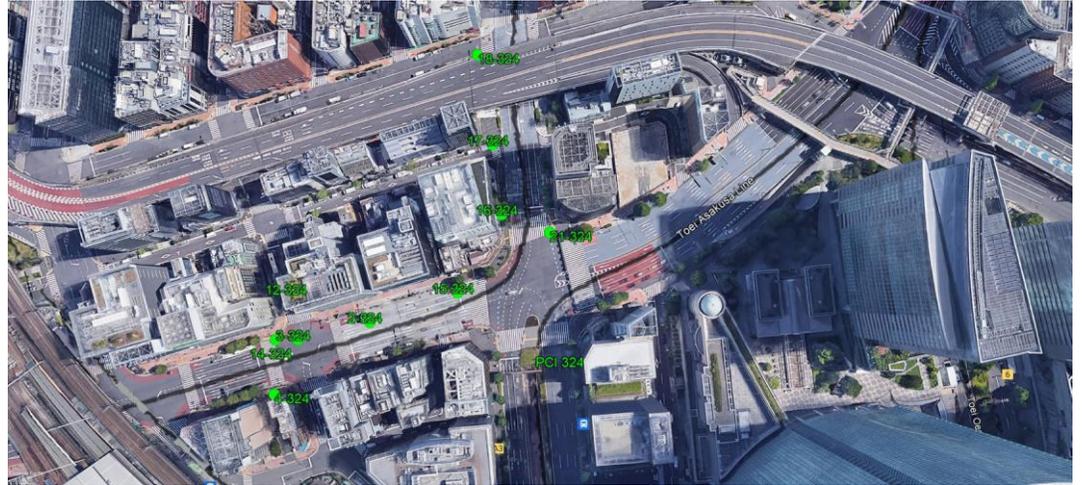
データ: シグナルズ・リサーチ・グループ

5Gミリ波現況、東京において良好

都内のミリ波のパフォーマンスに関する第三者によるベンチマーク調査

図12と図13は、PCI 324について同様の情報を示しています。PCI 242と同様に、このセルサイトは2本の交差する道路沿いをカバーしています。さらに、図12と図10を比較すると、2つの5Gミリ波サイトが提供するカバレッジが重なっていることがわかります。測定地点18の場合、実際の距離はPCI 242の方がずっと近いにもかかわらず、スマートフォンはPCI 324に接続されていました。

図12. アップリンク方向における5Gミリ波の測定地点 - PCI 324



作成: シグナルズ・リサーチ・グループ

図13. アップリンク方向における5Gミリ波のスループット - PCI 324

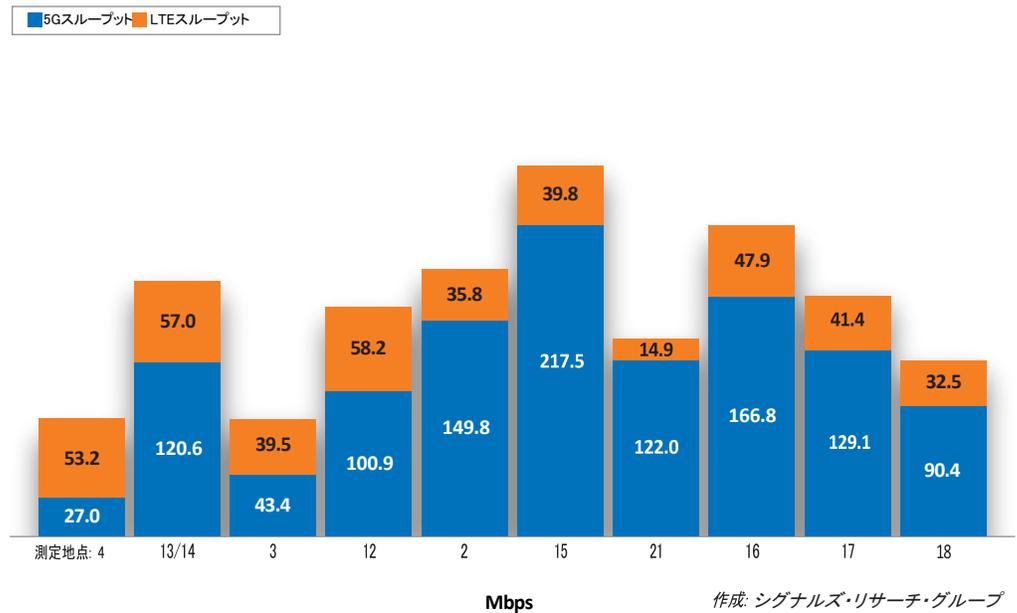


図14は、測定地点18から通信中のセルサイトの方向を向いたものです。この写真では、陸橋に視界を遮られ、ビルの屋上にある5Gミリ波無線機が見えない場所であることが非常によくわかります。上向きの赤い矢印は、完全に視界から隠されている5Gミリ波無線機の位置を指しています。

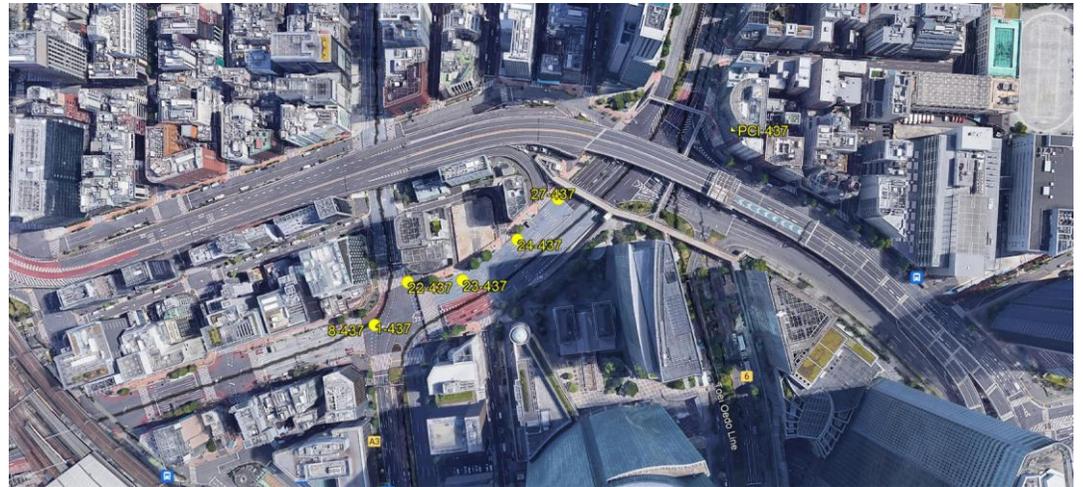
図14. 測定地点18から見るPCI 324



データ: シグナルズ・リサーチ・グループ

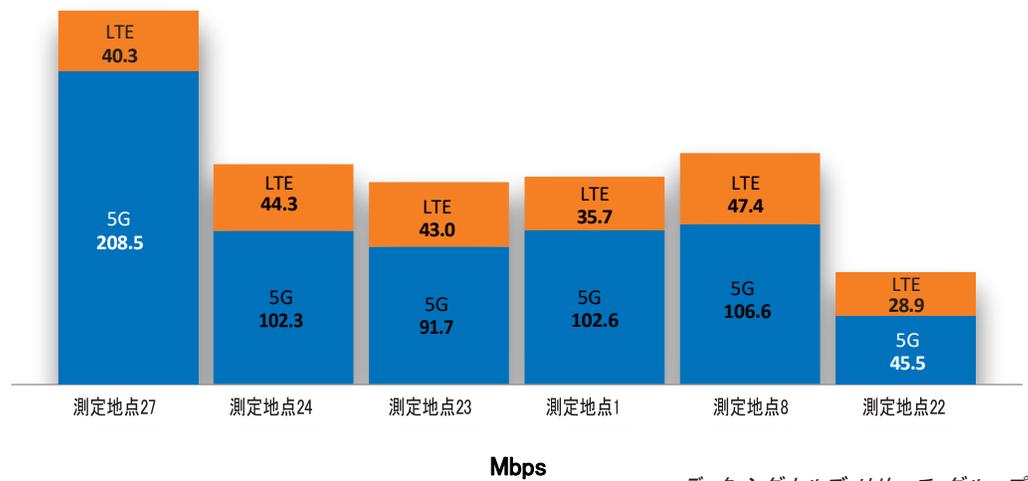
最後に、PCI 437についての調査結果を図15と図16に示します。

図15. アップリンク方向における5Gミリ波の測定地点 - PCI 437



データ: シグナルズ・リサーチ・グループ

図16. アップリンク方向における5Gミリ波のスループット - PCI 437



データ: シグナルズ・リサーチ・グループ

次の3つの図は、セルサイトからの距離、アップリンク方向のスループット、信号強度、RSRPの4つの要素との関係を示しています。図17はアップリンク方向のスループットとRSRPを、図18はアップリンク方向のスループットとセルサイトからの距離を、それぞれ縦軸と横軸にとってグラフ化しています。そして図19では、RSRPとセルサイトからの距離の関係をグラフ化しています。アップリンク方向のスループットとRSRPの間にはそれなりの相関性を確認できますが、他の図ではわずかな相関しかありません。このことは、アップリンク方向のスループットあるいはRSRPが、セルサイトからの距離が遠くなるほど低下することを意味します。

図17. アップリンク方向における5Gミリ波のスループット対RSRP

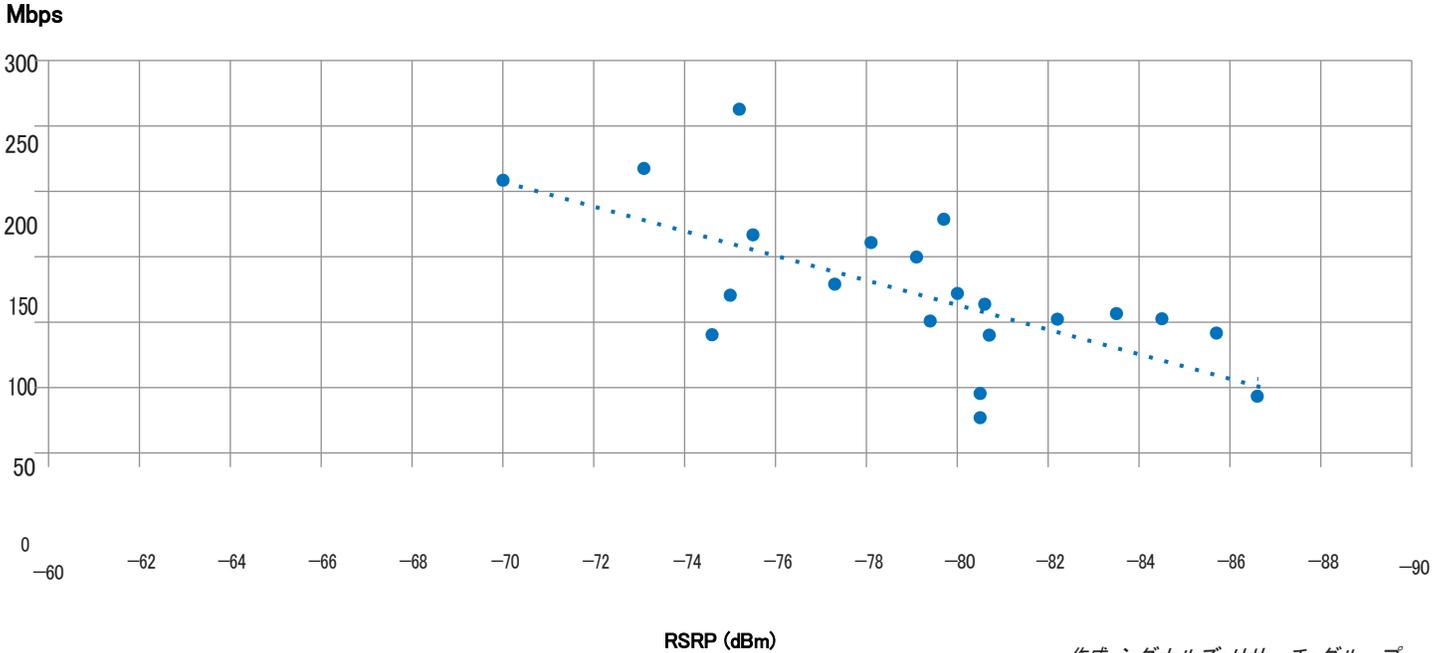
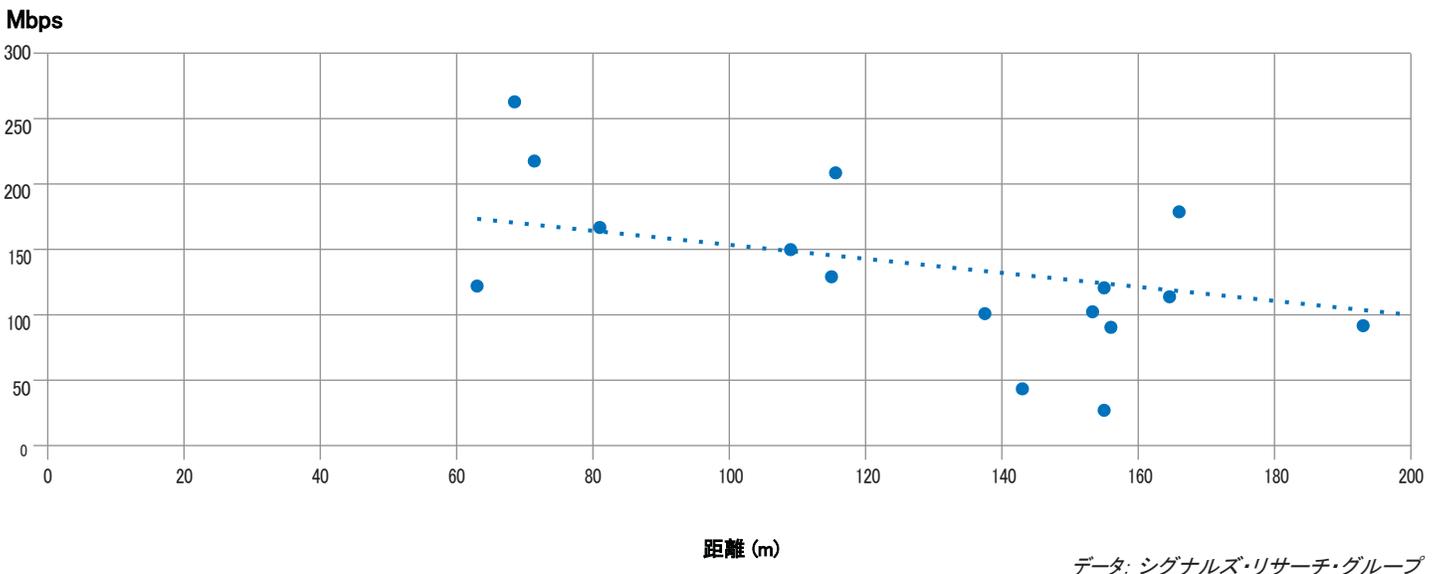
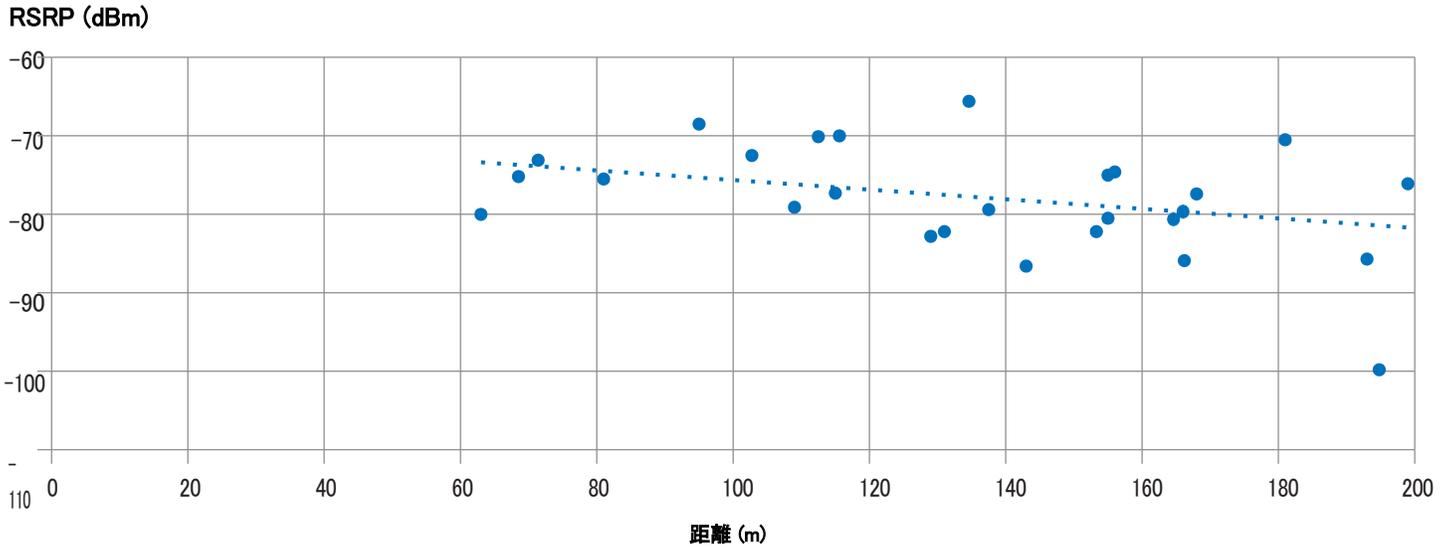


図18. アップリンク方向における5Gミリ波のスループット対距離



RSRPおよびスループットと距離の間で相関関係があまりないのは、驚きではありません。これはLOS(見通し)であるかNLOS(非見通し)であるか、つまりミリ波無線機が向いている方向に対して測定地点がどこにあるかが影響しているからです。他の条件がすべてが同じであるとき、測定地点が無線機が向いている方向から外れていると信号強度とスループットは低下します。しかしそうであっても、セルサイトから200mの地点で100Mbpsのアップリンク方向におけるスループットを達成することは十分に可能であり、100mの地点で200Mbpsを超えるアップリンク方向のスループットを達成することも可能であると結論付けることができます。さらに、送信電力の制限にもよりますが、今後導入が予定されているアップリンク方向の4キャリアアグリゲーションによって、さらなる高速化が見込まれます。

図19. 5Gミリ波RSRP対距離



データ: シグナルズ・リサーチ・グループ

5Gミリ波現況、東京において良好

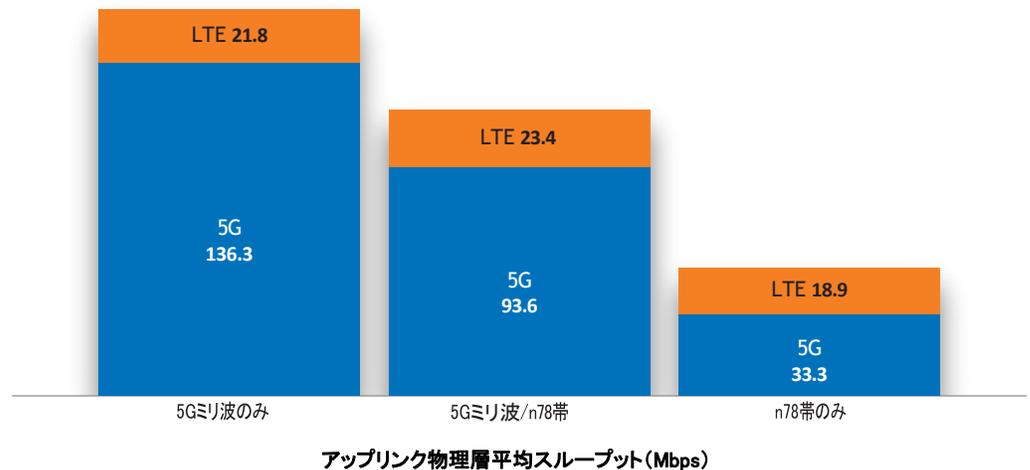
都内のミリ波のパフォーマンスに関する第三者によるベンチマーク調査

次に、数キロメートル北の東京駅で、5Gミリ波とn78帯のアップリンク方向における性能について移動測定を行い、その結果を比較しました。この調査では東京駅周辺、調査チームが仕事を終えて空港に向かう際に通るまさにその場所、すなわち通勤者や旅行者がバスやタクシーに乗るために集まったり、駅に向かう人々が乗り物から降りる場所を歩きながら測定が行われましたが、この測定により、図6で既に示したセルサイトを含め、このエリアをカバーする2つの5Gミリ波無線が確認されました。スマートフォンの設定に関しては、1回目には5Gミリ波とミッドバンド5Gの両方を、2回目はミッドバンド5Gのみを使用するように設定しました。

歩行中における5Gのアップリンク方向でのスループットは、5Gミリ波の使用により2.8倍となった

図20は、以上の2回の測定の結果を示しています。「n78帯のみ」のグラフは、スマートフォンがn78帯のみを使用した場合における歩行中の5GおよびLTEのスループットを示しており、他の2つのグラフは、スマートフォンが5Gミリ波を使用したときの5GおよびLTEアップリンクのスループットを示しています。「5Gミリ波」のグラフはスマートフォンが5Gミリ波を使用していた場合のみを示し、中央のグラフは、スマートフォンがミッドバンド5Gにフォールバックした場合を含む移動測定全体の結果を示しています。スマートフォンが5Gミリ波に対応している場合、歩行中における5Gのアップリンク方向でのスループットは2.8倍となり、さらにスマートフォンが5Gミリ波のみを使用した場合は、4.1倍となっています

図20.アップリンク方向における移動測定の結果



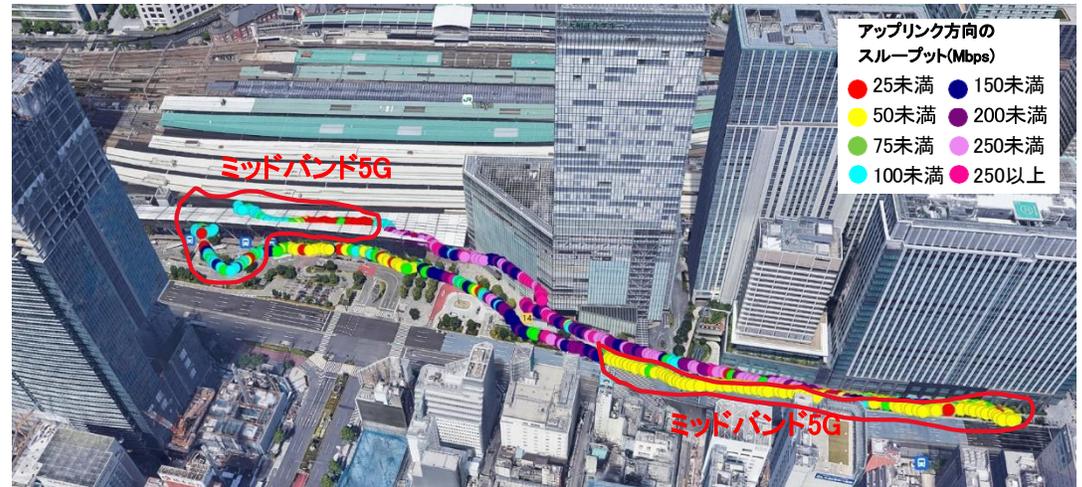
データ:シグナルズ・リサーチ・グループ

5Gミリ波現況、東京において良好

都内のミリ波のパフォーマンスに関する第三者によるベンチマーク調査

図21は、スマートフォンが5Gミリ波を使用した場合の、アップリンク方向におけるスループット(5G+LTE)を地図上に示したものです。歩行中にスマートフォンがミッドバンド5Gのみを使用していた左端と右端のエリアは図上、赤い線で囲んでいます。この図から、5Gミリ波が利用できる右端エリアに戻った際も、5Gミリ波が提供されているに関わらず、スマートフォンは長時間ミッドバンド5Gを使用したままであったことがわかります。なお、他の色の点の横にある黄色い点は、5Gミリ波を使用していればはるかに高いスループットを示すであろうことには留意すべきです。

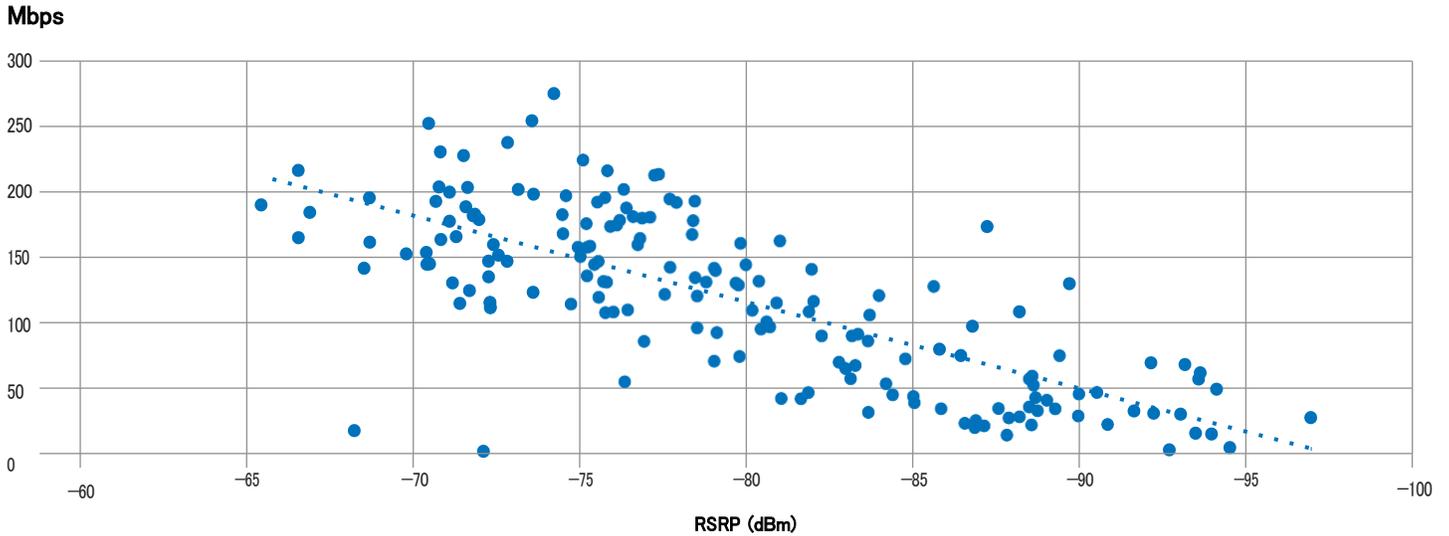
図21.アップリンク方向におけるスループット



データ: シグナルズ・リサーチ・グループ

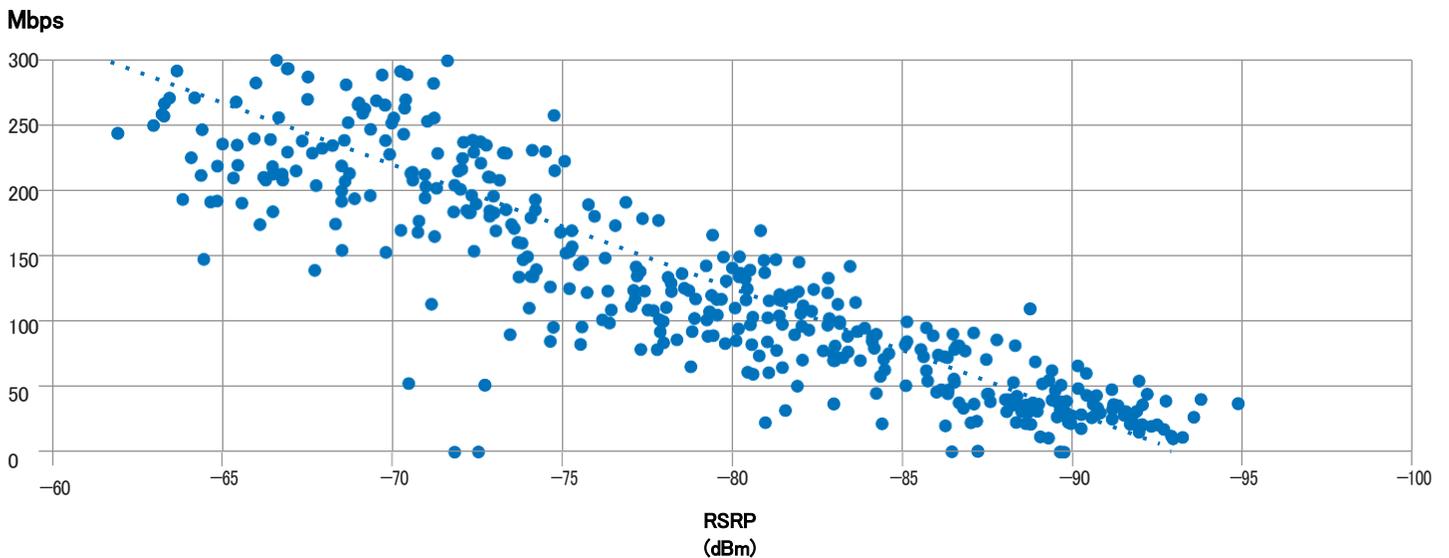
図22と図23は調査中に確認された2つの5Gミリ波無線機について、アップリンク方向のスループットとRSRPの関係グラフ化したのですが、どちらの図においても2つの指標は十分な相関性を示しています。比較的高いRSRPに対して得られた0Mbpsに近いスループットに関しては、アップリンク方向にデータ転送を行うために使用されたセッションが終了した際に発生するものと考えられます。しかし、解析にバイアスがかかることを避けるために、こうした数値もグラフ上に残しています。

図22. アップリンク方向におけるスループット対RSRP - PCI 225



データ: シグナルズ・リサーチ・グループ

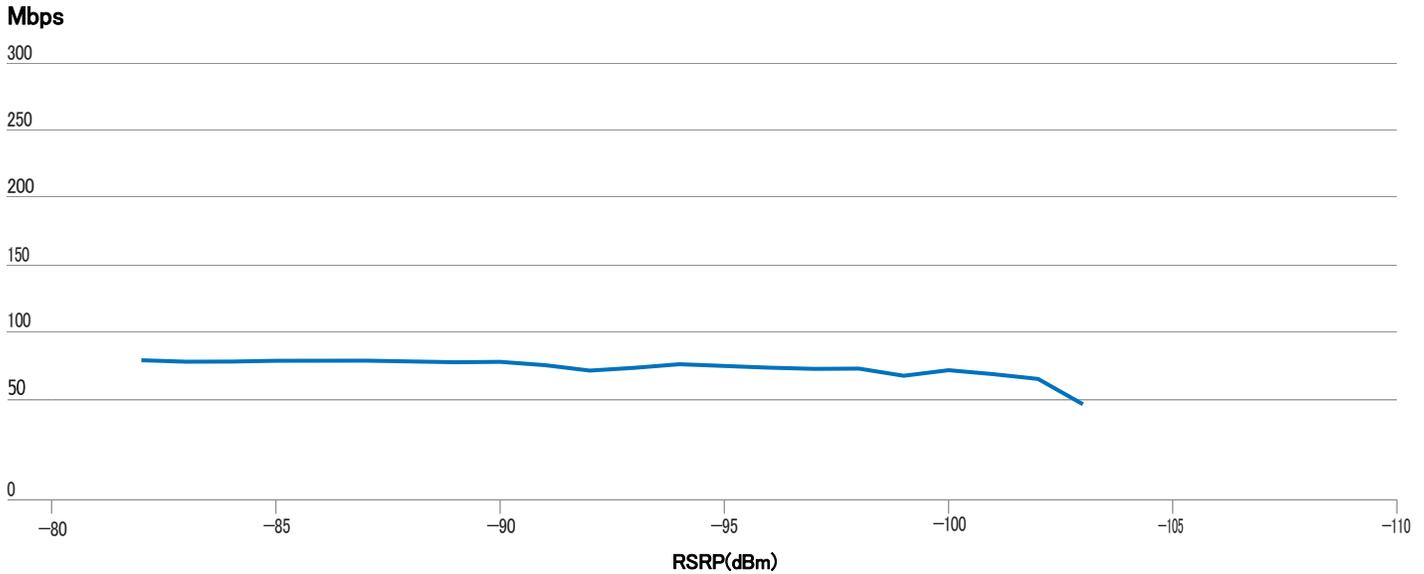
図23. アップリンク方向におけるスループット対RSRP - PCI 200



データ: シグナルズ・リサーチ・グループ

図24は、スマートフォンで5Gミリ波をオフにした場合の数値を示しています。2つの周波数帯で測定されたアップリンク方向におけるスループットで生じた差を強調するために、縦軸の目盛はミリ波を使用した図22および図23と同じものになっています。今回の測定を含め、東京で実施した多くの調査では、n78帯のアップリンク方向におけるスループットはほぼ常に50Mbpsを上回り70Mbpsに近く、ピークでは80Mbpsを記録しています。これは、アップリンク方向の負荷が軽かったためと考えられます。

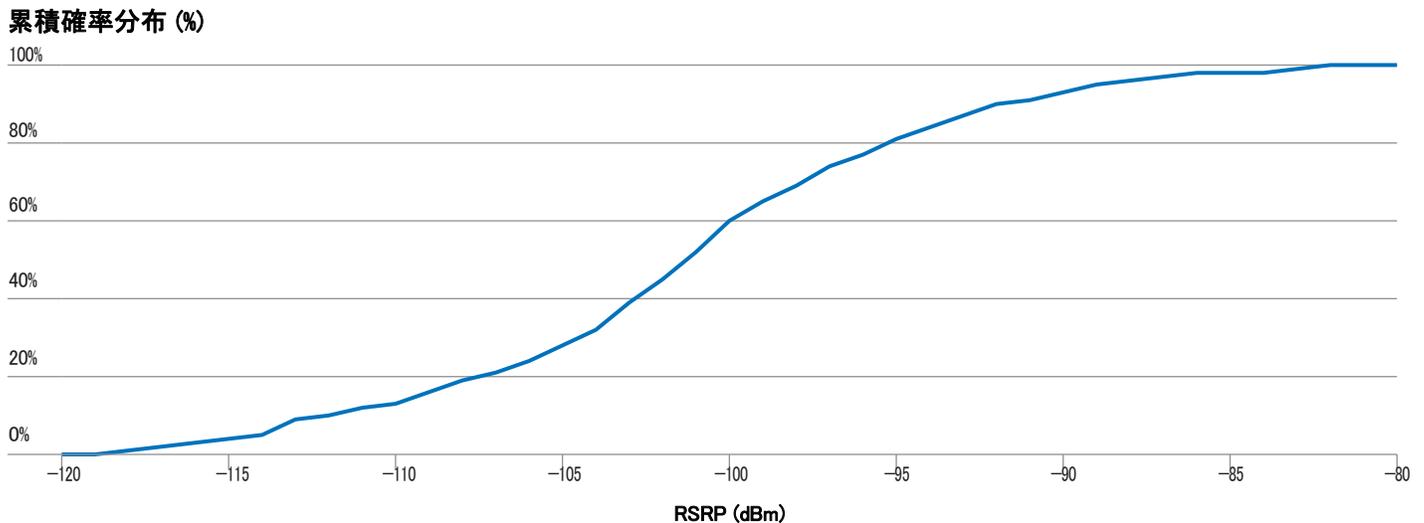
図24. アップリンク方向におけるスループット対RSRP - n78帯



データ: シグナルズ・リサーチ・グループ

図25は、この移動測定で記録されたn78帯におけるRSRPの分布を示しています。興味深いことに、RSRPの分布は完全に良好とは言えず、測定時間中40%以上の時間においてRSRPは-100 dBm以下でした。

図25. n78帯におけるRSRPの分布

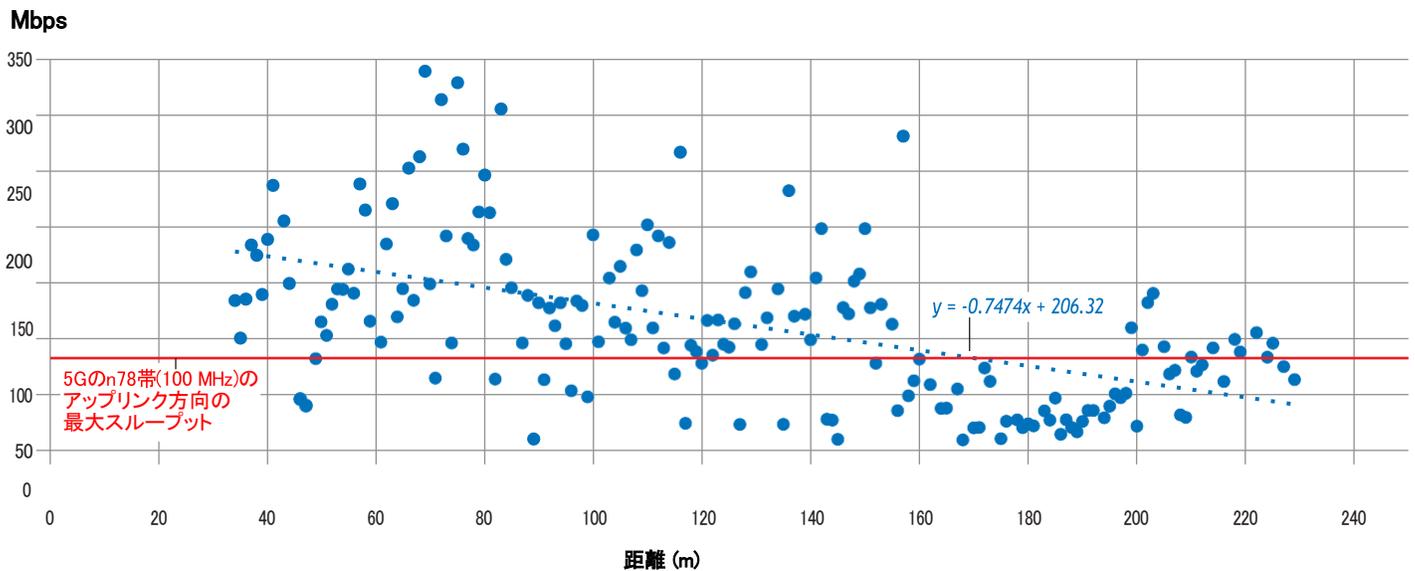


データ: シグナルズ・リサーチ・グループ

5Gミリ波のアップリンク方向におけるスループットは、ミッドバンド5Gのスループットを上回る可能性が非常に高い

n78帯の無線機の位置は特定できなかったため、同周波数帯における通信中のセルサイトまでの距離と比較しての分析を実施することはできませんでしたが、5Gミリ波無線機までの距離は特定することができたため、アップリンク方向のスループットとの関係については、図26に分析結果を示しています。なお、5Gミリ波無線機の位置を特定する際には、事業者のミリ波カバレッジマップが大きく役立ちました。強い相関が見受けられますが、このセクションで前述の理由により、この測定においては200mの距離で50Mbps、175mの距離で75Mbpsのアップリンク方向のスループットを達成する可能性は高いと考えられます。言い換えれば、セルサイトから200Mbpsまでの距離では、5Gミリ波の上りのスループットがミッドバンド5Gのスペクトルを上回る可能性が非常に高く、より近い距離ではその性能の優位性がさらに高くなります。ただし、ミッドバンド5Gがミリ波よりも高いスループットを達成したとしても、ミッドバンド5Gでは提供できない帯域幅のニーズがある上この調査で測定されたアップリンク方向における数値は、あくまで非常に負荷の軽いネットワークで得られたものであり、ミッドバンドのネットワークに負荷がかかると、エンドユーザー側のデータ速度が低下するであろう点について考慮が必要です。

図26. アップリンク方向における5Gミリ波のスループット対距離



データ: シグナルズ・リサーチ・グループ

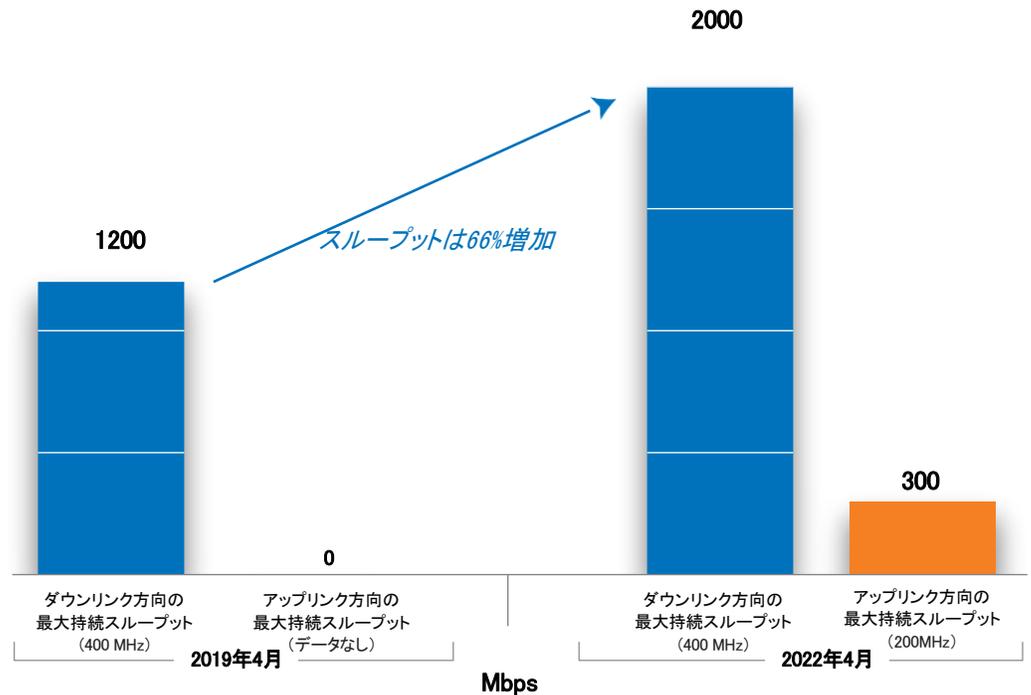
5Gミリ波は開始以来、ダウンリンク方向におけるスペクトル効率は大幅に向上

日本の通信事業者が使用できる5Gミリ波の周波数帯は現在400MHz (n257帯)しかなく、米国やヨーロッパで測定された数値に比べ、ダウンリンク方向の最大データ速度は大幅に低いものでした。しかし今回の調査によって、スペクトル効率、つまり特定の周波数帯に対してどれだけのスループットを達成できるかという観点からは、2019年4月に行った最初の調査と比較して5Gミリ波の性能が驚異的に向上したことが明らかとなりました。最初の調査では、ネットワークも400MHzのみに制限されていましたが、その後、5Gミリ波のインフラやチップセットの進化により、800MHzまで使用できるようになっています。

3年間で5Gミリ波のダウンリンク方向における最大スループットは66%向上

東京で測定された平均データ速度と他の地域で測定されたデータ速度を比較することは、あまり有意義ではありません。その理由は主に、ネットワークが構築されている環境が異なること、通信事業者が5Gミリ波無線機をどこに設置するかについての考え方が異なることにあります。しかし、図27に示したように、最大持続データ速度を比較することには意義があります。このグラフには、当社の最新の調査によるものと、2019年4月にVerizonのネットワークで行った調査結果の2つのデータが含まれており、400MHzの周波数帯(4x100 MHz)で構成されるこれら2つのネットワークそれぞれにおいて、持続的に測定されたダウンリンク方向における最大スループットを示しています。3年の間に、5Gミリ波を使用した場合の最大データ速度は66%増加しています。さらに、グラフには反映されていませんが、2019年4月の調査時よりもはるかに遠い距離でデータ速度のピークに達することも確認されました。またこのグラフには、アップリンク方向における性能の向上に関する情報も含まれていますが、2019年4月当時はアップリンク方向のすべてのデータトラフィックがLTEを経由していたため、直接比較することはできないと考えます。

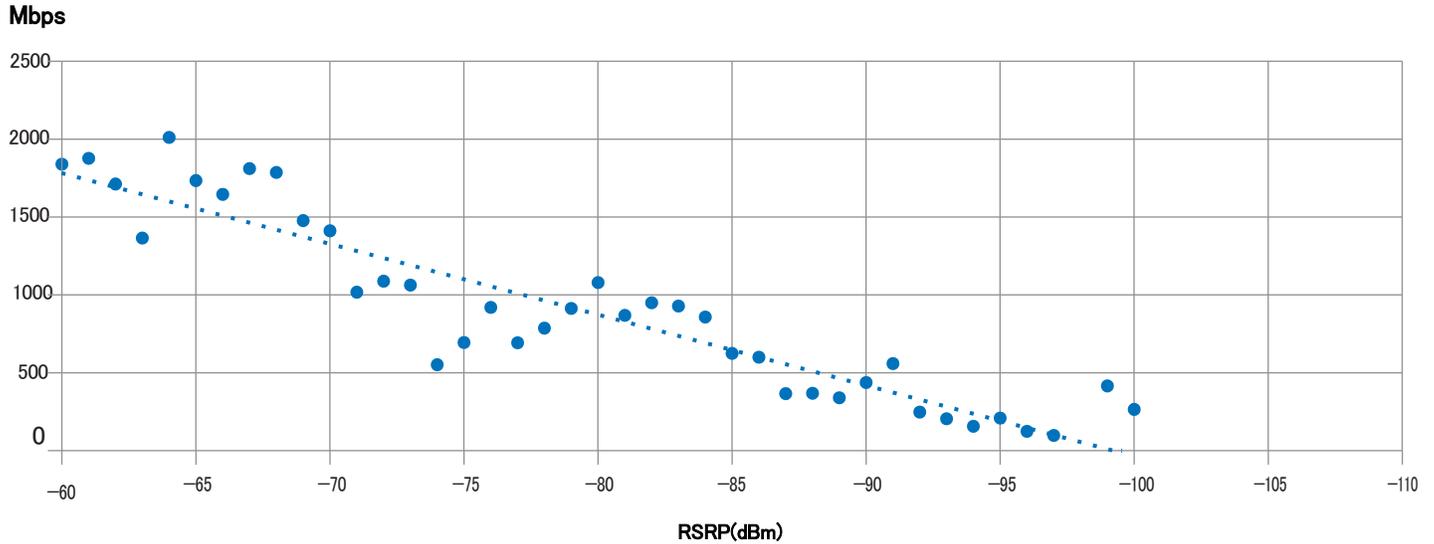
図27. ダウンリンク方向における5Gミリ波パフォーマンス



データ: シグナルズ・リサーチ・グループ

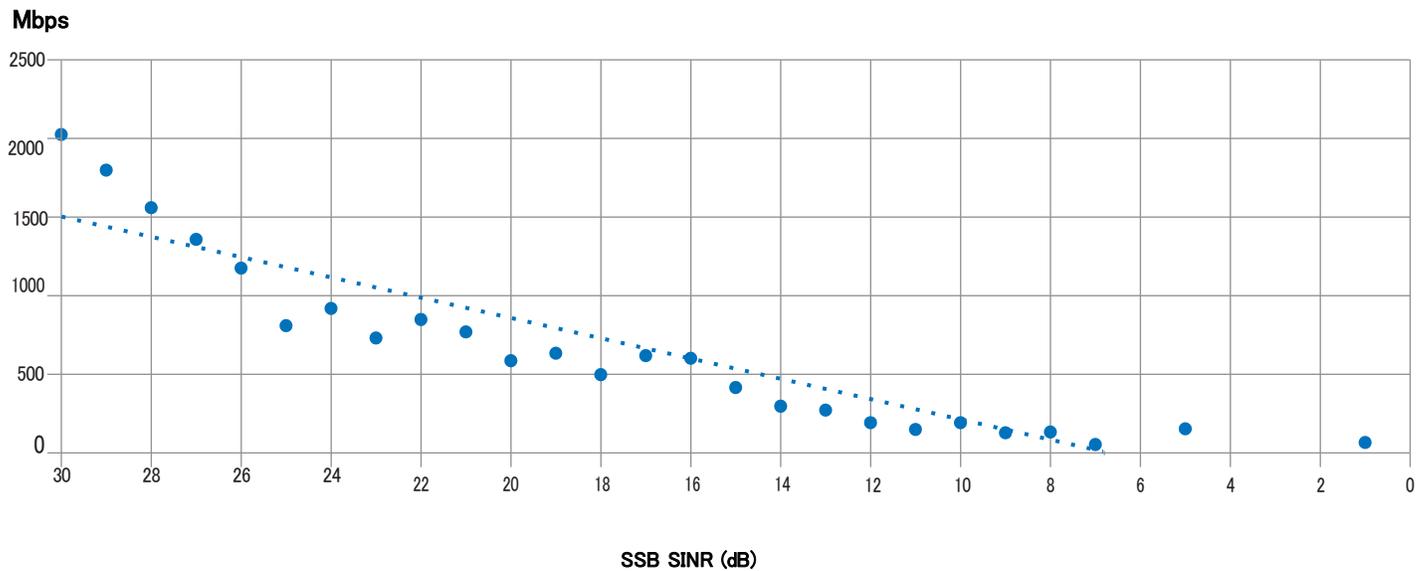
次の2つのグラフはそれぞれ、ダウンリンク方向における5G PDSCHスループットとRSRPの関係と、ダウンリンク方向における5G PDSCHスループットとSSB-SINRの関係を示しています。各グラフ上の点は、対応するRSRPおよびSINRの数値に対して測定されたスループットの平均値を示しています。さらに、グラフには反映されていませんが、ユーザースループットの数値にはLTEも影響を与えています。どちらのグラフからも、スループットとRSRPまたはSSB-SINRの間に比較的強い相関があることが読み取れます。

図28. ダウンリンク方向における5Gミリ波のスループット対RSRP



データ: シグナルズ・リサーチ・グループ

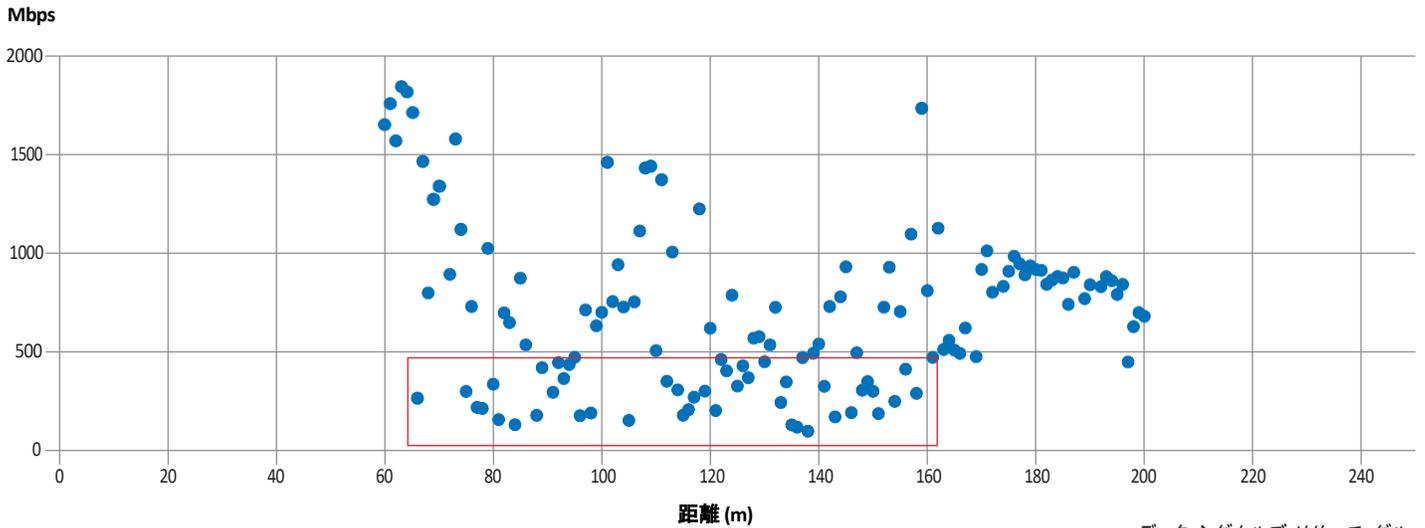
図29. ダウンリンク方向における5Gミリ波のスループット対SINR



データ: シグナルズ・リサーチ・グループ

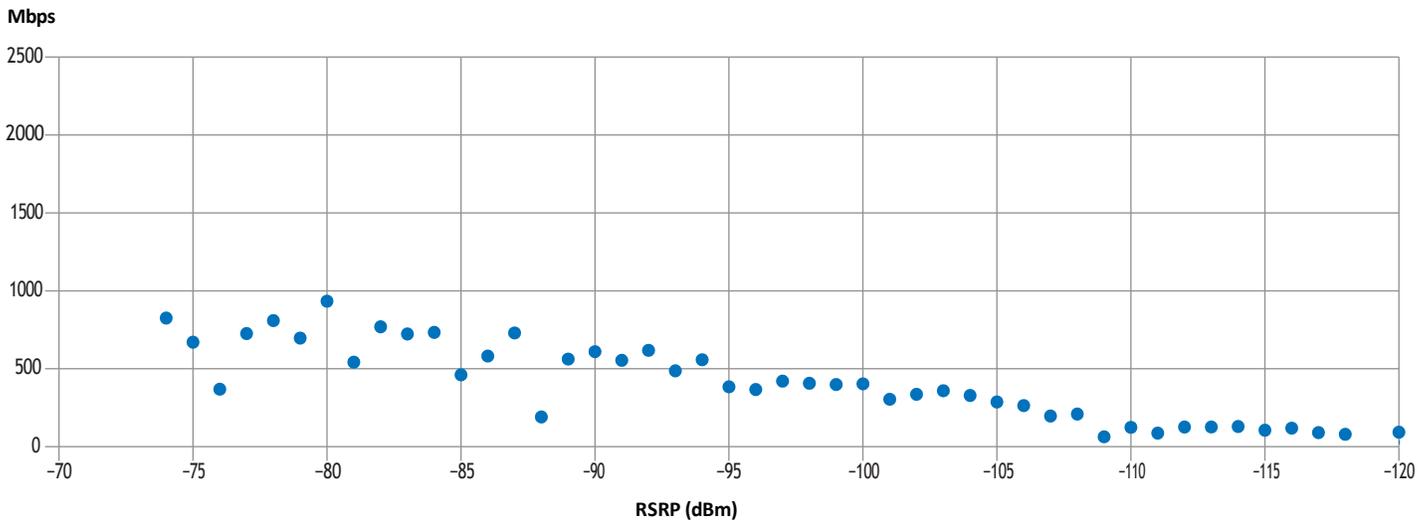
図30は、5G PDSCHのダウンリンク方向におけるスループットに対して距離が与える影響を示しています。アップリンク方向における場合と同様、2つのデータセットの間には強い相関性はありませんでした。また、グラフには距離に対して比較的低いスループットが測定されたケースも含まれていますが、このような結果が得られたことから、ネットワークをさらに最適化する余地があると考えられます。この点については、次のセクションで詳述します。

図30. ダウンリンク方向における5Gミリ波のスループット対距離



次に示す図31は、東京の別の場所で実施された調査に基づくものではありませんが、n78帯のダウンリンク方向におけるスループットとRSRPの関係をグラフ化したものです。2つの周波数帯でスループットが大きく異なることを強調するため、縦軸の目盛には図30と同じ数値を使用しています。

図31. ダウンリンク方向における5G n78帯のスループット対RSRP



5Gミリ波現況、東京において良好

都内のミリ波のパフォーマンスに関する第三者によるベンチマーク調査

東京における5Gミリ波ネットワーク
のパフォーマンスをさらに向上さ
せることは難しいことではない

東京でのミリ波ネットワークの性能調査を実施する中で、スループットの特異な数値が複数確認されました。そうした数値について、通常の調査が終了した後にさらなる調査を行い、結果を分析したところ、ネットワークをさらに最適化する上で改善が必要な点が見つかりました。また、そうした改善点の一部はミリ波ネットワークと直接の関係を持たず、5Gネットワークのアンカーセルとして利用されるLTEネットワーク関連のものでした。

新橋駅周辺での調査にて確認された特筆すべき事象は2つあります。1つ目は、5Gミリ波の電波が届いていることが確実な場所で、スマートフォンが繰り返し5Gミリ波ネットワークから切断されたことです。こうした状況では、多くの場合機内モード設定のオン/オフを繰り返し行うことで、スマートフォンは5Gミリ波ネットワークに再接続されました。2つ目としては、移動測定中に測定されたこのエリアにおけるスループットが、通常測定される数値と比べて不安定なものだったことです。LTEを含むモバイルネットワークの物理層において測定される瞬時スループットは、多くの利用者が認識しているよりもはるかに変動が大きく、一般的な通信速度測定アプリケーションによる単純な測定では、その間の平均値を取得するだけで、スループットがどのように変動するかはわかりません。しかし、今回ログ上に記録されたスループットの変動は、特にネットワーク条件が良好であったにも関わらず起こったので、想定外のものでした。この問題については、後の図に示すように、LTEネットワークに起因するものであると考えられます。

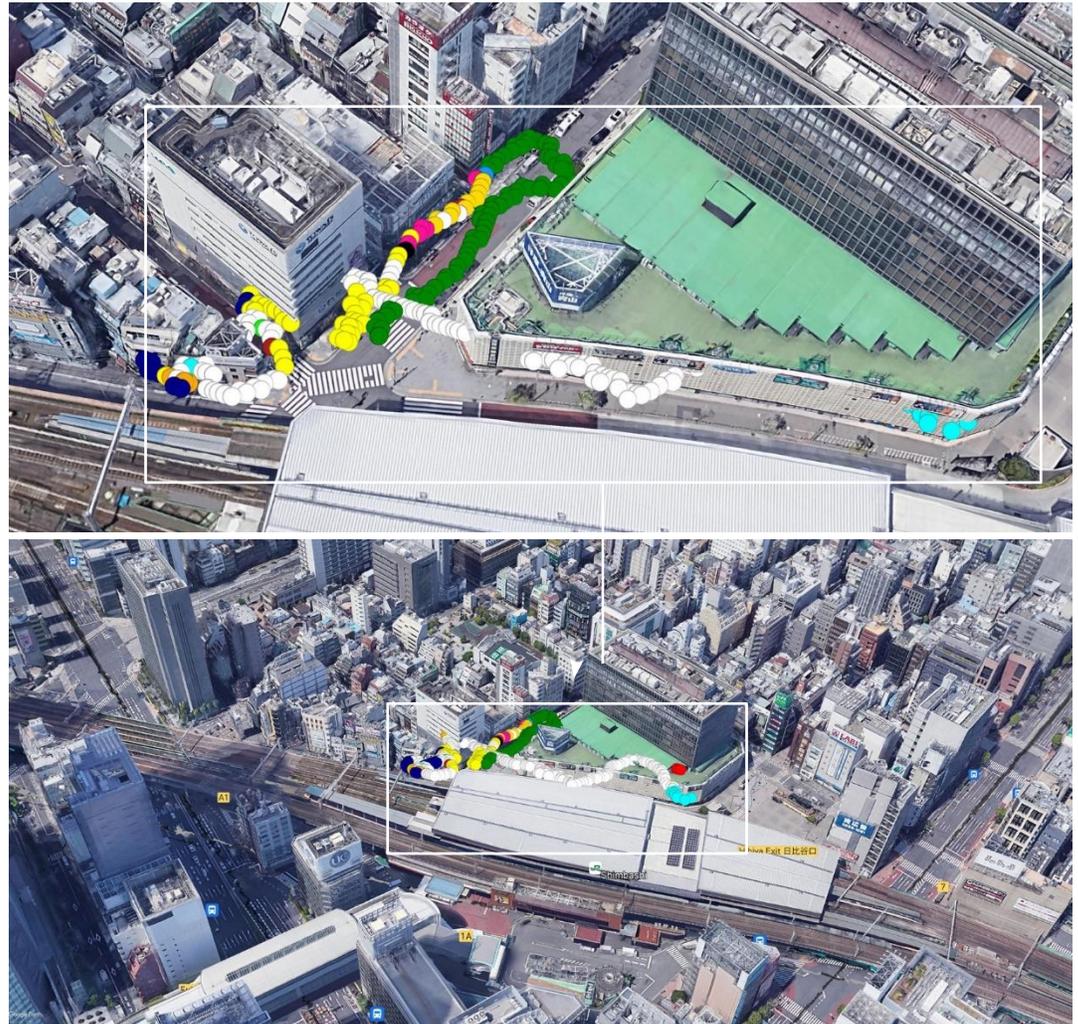
測定結果を分析したところ、上述の問題に関連する事象が2つ発生していたことが判明しました。まず1つ目は、異なるLTEセル間で頻繁にハンドオーバーが行われていたことです。この事象には、異なる位置にある異なるLTEセルの間で行われていたものだけでなく、同じ位置でも異なる周波数帯の間で行われていたものが含まれます。多くのLTE PCIそのエリアの5Gミリ波ネットワークにマッピングされていましたが、すべてのLTE PCIが正しくマッピングされていたわけではありません。

NSA (Non-Standalone) アーキテクチャにおいては、5G無線に加え、LTEアンカーセルが必要となります。ネットワークがEN-DC (Evolved UTRA - Dual Connectivity)、つまりLTEを無線ベアラとして利用する5G通信を可能にするためには、LTE無線が5Gミリ波無線とが連結し、その情報をモバイル機器へ伝達する必要があります。EN-DCの要件はローバンド、ミッドバンド、および5Gミリ波それぞれに存在しますが、LTEセルと比較した場合のエリアカバレッジの狭さから、5Gミリ波において最も問題が発生しやすいと考えられます。別の言い方をすれば、ネットワーク内にスマートフォンが接続できる(例えばそれが一時的であったとしても)LTE PCIが多数存在するケースが多く、もしスマートフォンが近くの5Gセルサイトと連結していないLTE PCIに接続してしまうと、5Gに再接続できないという問題が発生します。

5Gミリ波の調査のうち初期の調査においては、このような問題が頻繁に発生することがありました。こうした問題は5Gミリ波のカバレッジ内で5Gミリ波無線に向かって歩いていていたときに発覚したものの、調査したところ、スマートフォンが5Gミリ波ネットワークから切断されると同時に毎回LTEのハンドオーバーが発生していることが判明しました。この「問題」はミリ波の性能とは直接関係ありませんが、簡単に対処できるものであり、事業者がネットワークの最適化活動の一環として取り組むことが必要と思われれます。

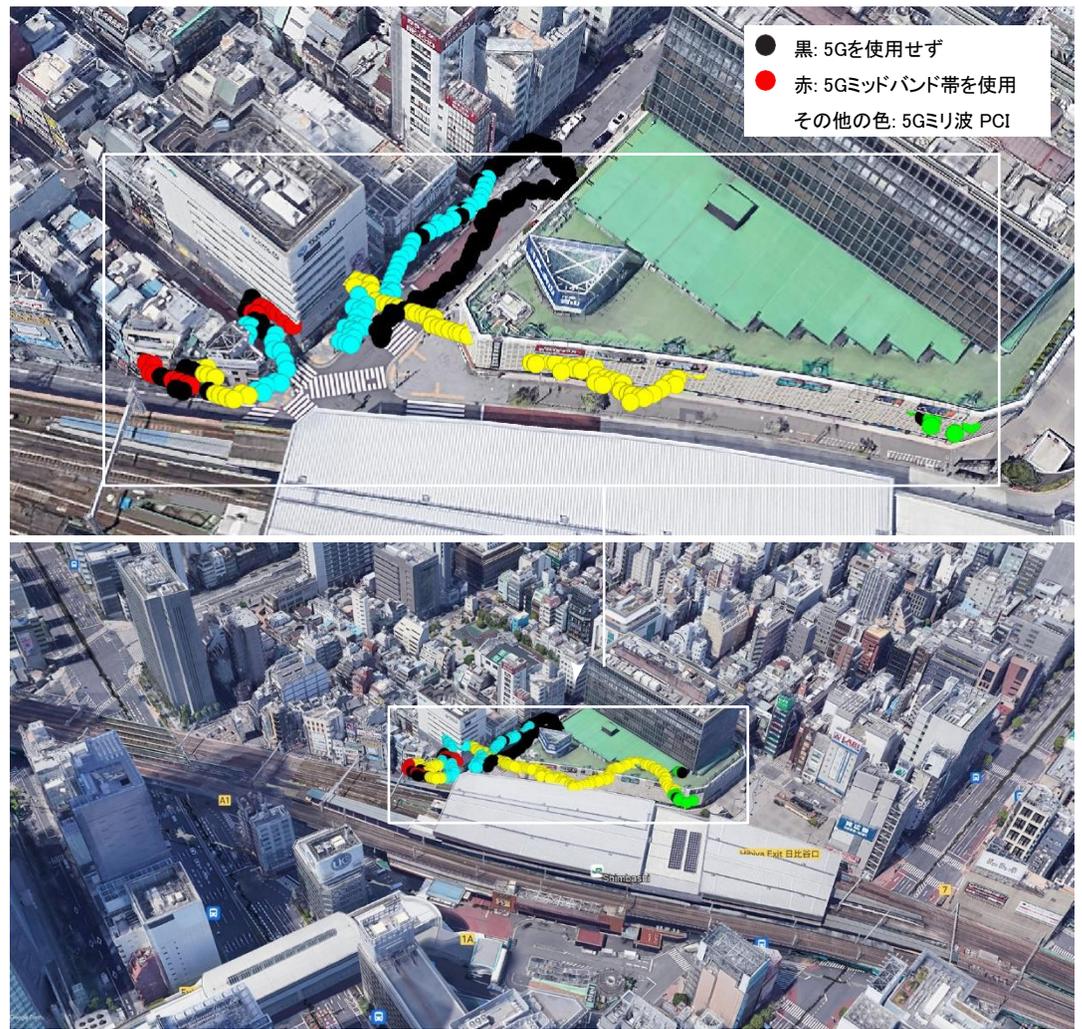
図32は、新橋駅付近でダウンリンク方向の移動測定を行った際に確認されたLTEサービングセルの位置を地図上に示したものです。図中の各色の点は、それぞれの場所でスマートフォンが使用していたLTEアンカーセルを示しています。図33は、5G PCIについて同様の情報を示しています。2つの図を比較すると、スマートフォンがLTE PCI 294を使用している場合(図32における緑の点)、5Gミリ波(図33における黒い点の大部分)が明らかに利用可能であるにもかかわらず、一度も使用しなかったことがわかります。

図32. LTE PCI マップ



データ: シグナルズ・リサーチ・グループ

図33. 5Gミリ波 PCIマップ



データ: シグナルズ・リサーチ・グループ

なお、この移動測定では、スマートフォンは15の異なるLTE PCIに接続しました。一方で、接続した5Gミリ波PCIおよびn78帯のPCIの数はそれぞれ3でした。この結果について分析したところ、5Gミリ波のエリアカバレッジは多くの場合十分であるにもかかわらず、LTEと5Gミリ波PCIのマッピングが完全ではなかったためにスマートフォンはミッドバンド5Gに接続したということが判明しました。図34は、LTE、ミッドバンド5G、5Gミリ波のセル数およびハンドオーバーの回数をグラフ化したものです。5Gを使用できない場合でも、隣接するLTEセル間で頻繁にハンドオーバーが行われるとネットワークのパフォーマンスとエンドユーザのデータ速度が低下することに注意が必要です。

図34. セルの数とハンドオーバー回数-接続方式別

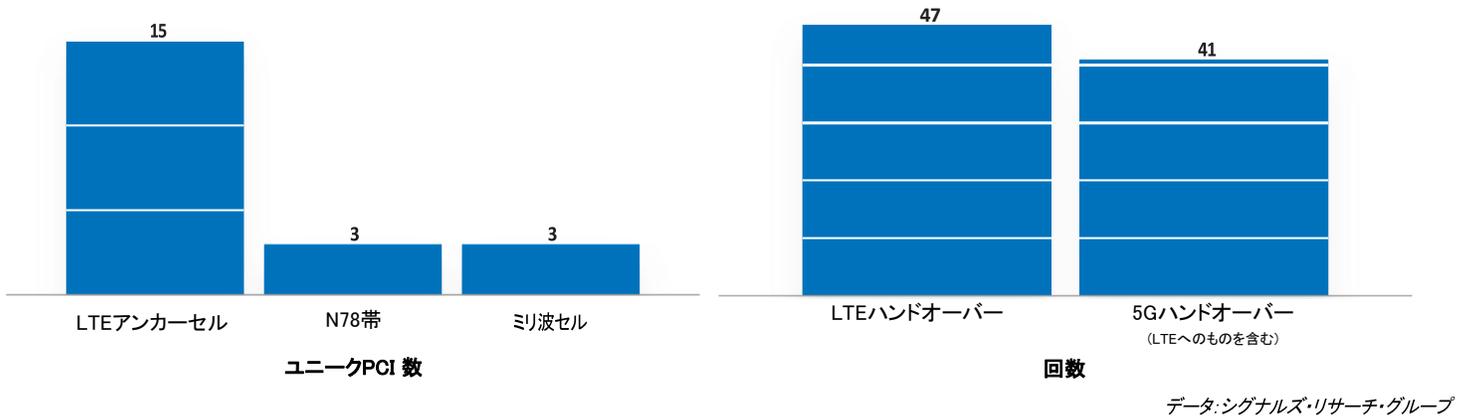


図35は、LTEと5GそれぞれのPCIに接続した時系列を示した上で、5GのRSRPを第二縦軸に表示したものです。RSRPには、図に示されているように、ミリ波とn78帯が混在しています。移動調査で得られた結果に基づき作成されたこのグラフからは、一定時間LTEのハンドオーバーがほとんどない部分がある一方で、およそ300秒から500秒の間にLTEのハンドオーバーが頻繁に発生する部分もあったことがわかります。次に示す2つの図では、この部分に着目しています。

図35. 5G RSRPと使用されたPCI

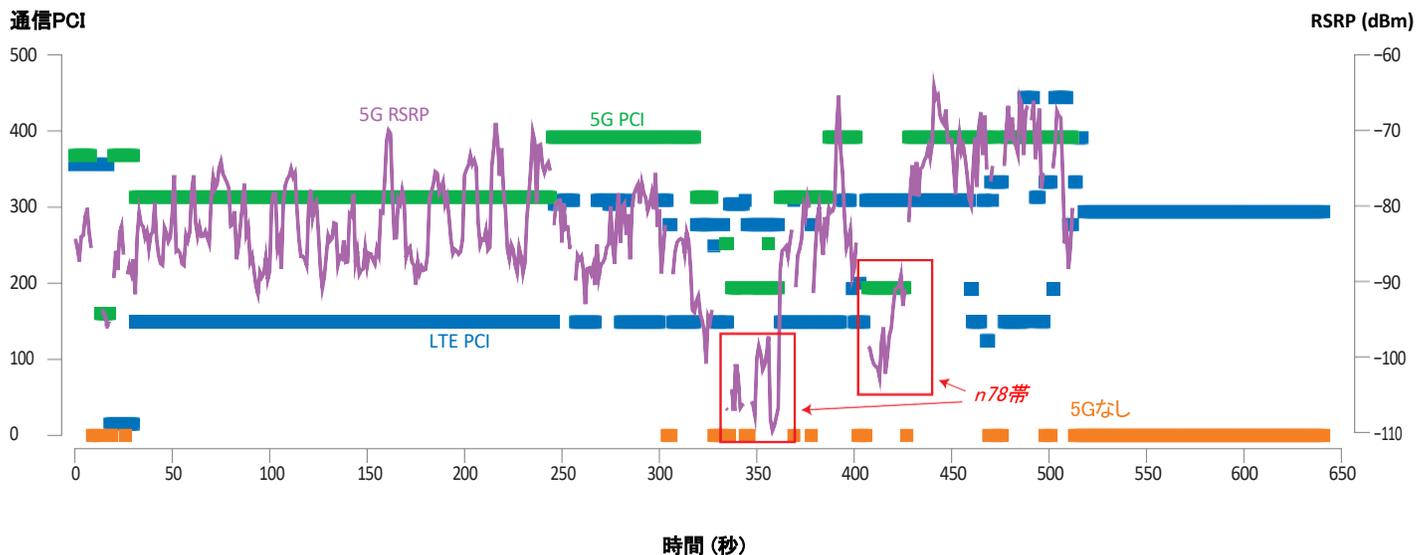
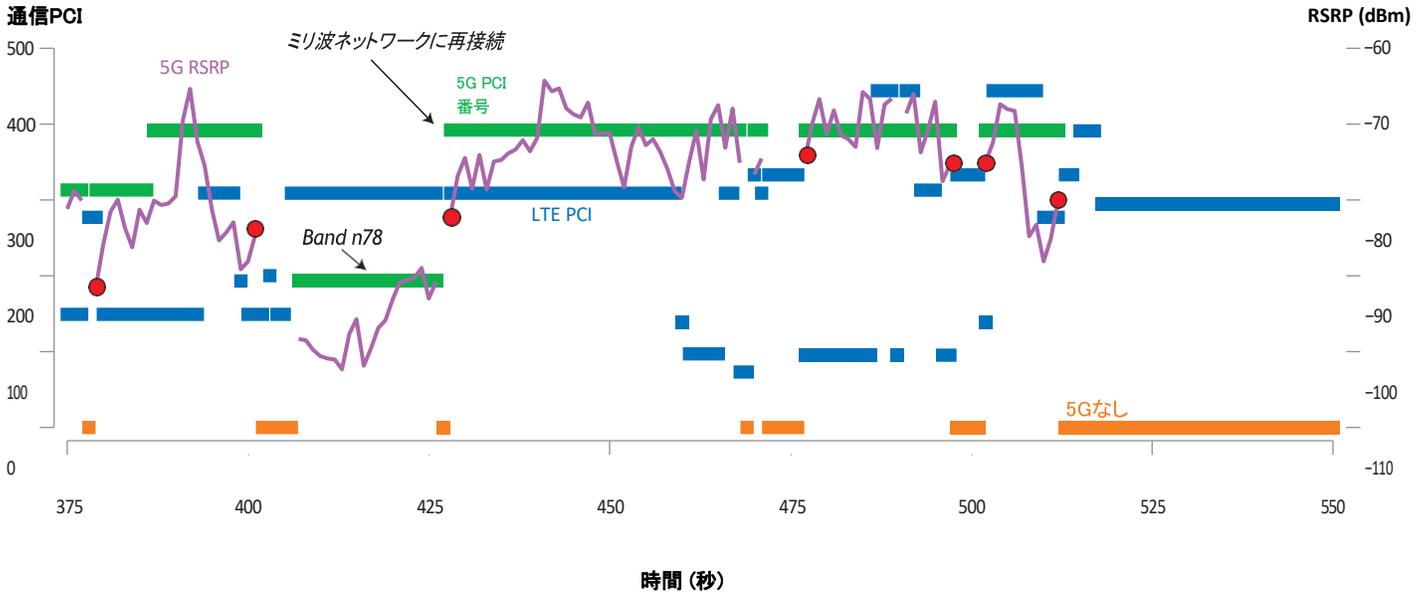


図36は、図35のハンドオーバーが頻発した部分を拡大したものです。さらに、5Gミリ波ネットワークへの接続・切断が行われた時点のRSRP値を赤い点で示しています。赤い点の数値は適度に良好な5G接続を確立するのに十分すぎるほどであり、またその多くがLTEのPCI変更と一致するタイミングで記録されています。測定結果から読み取れるこの2点は、5Gミリ波のカバレッジが、調査中に得られた他の数値で示唆されたよりもはるかに優れているとの見解を裏付けるものです。つまり、LTEの頻繁なハンドオーバーがなければ、5Gミリ波ネットワークへの接続は調査全体を通じてはるかに安定し、持続していただろうと考えられます。図では、スマートフォンの機内モードを起動した際に、5Gミリ波ネットワークに再接続された数少ない事例の1つも強調しています。

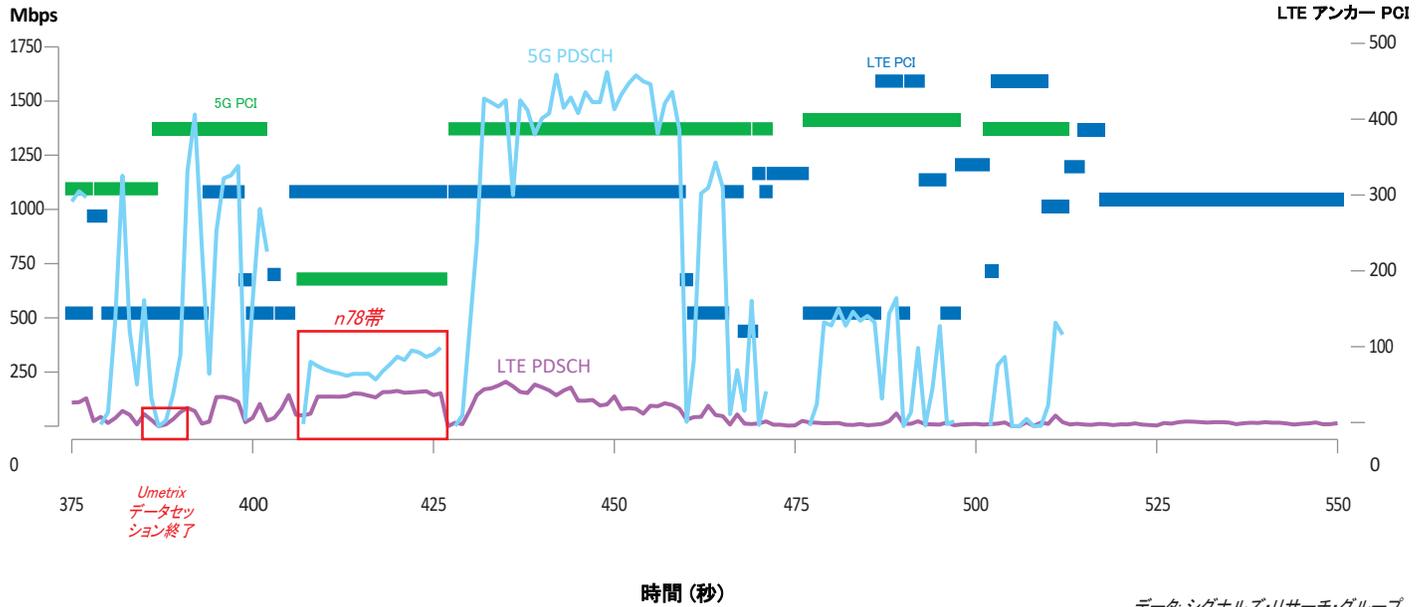
図36. 5G RSRPとPCI - 拡大



データ: シグナルズ・リサーチ・グループ

さらに、図37はLTEおよび5G PDSCHのスループットをLTEのPCIとともに時系列上に示したもので、PCIは第二縦軸に表示されています。5Gミリ波とLTEのスループットの相対的な差をみると、LTEの影響は控えめな印象を受けますが、この点を考慮しても、LTEのハンドオーバーが頻繁に発生する場合には、LTEのスループットも、5Gミリ波のそれと同様に低下することが明らかになりました。

図37. PDSCHスループットとLTE PCI



データ: シグナルズ・リサーチ・グループ

5Gミリ波現況、東京において良好

都内のミリ波のパフォーマンスに関する第三者によるベンチマーク調査

この調査のログから得られたもうひとつの結果として、表1に示したように、スマートフォンがLTEハンドオーバーを行うたびに、NSA状態を保持せず、LTE RRC接続状態に戻ったということです。こういった状態遷移は、5Gミリ波が導入された初期の段階においてよく起こっていたことです。実際の調査では、スマートフォンは、同じ5Gミリ波PCIで異なるSSBビームインデックスに切り替わるたびに、LTEに戻る事象も確認されました。調査結果に基づくと、LTEと5Gの間でハンドオーバーが行われる場合、スマートフォンはNSAの状態を維持するべきである可能性が高いです。スマートフォンがLTEにしか接続されていない場合、5Gミリ波は全く使用されていないため、スループットに重大な影響を及ぼします。この表の例では、スマートフォンが5Gミリ波を使用していない状態の際は876ミリ秒の差が生じていました。

表1. RRCの状態に関する情報

Tput: スループット
HO: ハンドオーバー

タイムスタンプ	5Gミリ波PCI	RSRP	SINR	5G PDSCH Tput	LTE PDSCH Tput	LTE PCI	LTE HO	LTE HO 結果	5G HO	5G HO 結果	RRC 接続状態
2022-04-19 22:08:39.000	392	-78.84	23.65	1367.364	81.07	309					RRC
2022-04-19 22:08:39.929							試行				LTE RRC
2022-04-19 22:08:39.990								成功			LTE RRC
2022-04-19 22:08:40.000	392	-79.72	26.54	19.811	30.242	193					LTE RRC
2022-04-19 22:08:40.306							試行				LTE RRC
2022-04-19 22:08:40.352								成功			LTE RRC
2022-04-19 22:08:40.687									試行		LTE RRC
2022-04-19 22:08:40.805										成功	NSA RRC
2022-04-19 22:08:41.000	392	-74.95	25.86	303.281	41.541	149					NSA RRC
2022-04-19 22:08:42.000	392	-70.87	23.32	1074.328	43.087	149					NSA RRC
2022-04-19 22:08:43.000	392	-77.31	26.79	1099.94	94.146	149					NSA RRC
2022-04-19 22:08:44.000	392	-69.35	26.74	1216.543	51.87	149					NSA RRC

データ: シグナルズ・リサーチ・グループ

5Gミリ波の性能を向上する要素として最後に挙げられるが、ビーム管理です。5Gミリ波では通信5ミリ波セルサイトから複数のビームを使用して、そのカバレッジ内のモバイルデバイスに対してRFエネルギーをその方向に送ることができます。これはレーザーと電球に例えると、前者はより遠くまで集中的に光を届ける一方、後者はエリア全体をカバーするということです。これは同時に不要なはずの場所にもRFエネルギーが発信されることを意味します。

5Gミリ波現況、東京において良好

都内のミリ波のパフォーマンスに関する第三者によるベンチマーク調査

今回の調査では、スマートフォンが使用しているSSBのビームインデックスが定点測定でも非常に頻繁に変化することが確認されました。セル移動中にビームインデックスがそのように変化することは想定されていましたが、東京で行った調査では、この変化の度合いが他の調査で測定されたものより大きいことが確認されました。SSBビームインデックスの変化がみられたケースの一部では、SSB-SINRとRSRPが良好であったため通常ビームを切り替える必要がなかったことに加え、切り替えたとしてもRFが改善されるとは限りらないということが判明しました。ビームインデックスの変更が行われた際に、5Gミリ波のスループットが影響を与えることも何度もありました。

次に示す3つの図は、そのような事象の一例を示しています。図38は、5GスループットとSSBビームインデックスの関係をグラフ化したものです。また、図39ではSSB-SINRとSSBビームインデックスの関係を、図40ではRSRPとSSBビームインデックスの関係をグラフ化しています。3つのグラフからは、移動測定中にSSBビームインデックスがかなり頻繁に変化していることが読み取れます。また、SSBビームインデックスが変更されることによって電波状況とスループットが改善される場合がある一方で、特にPDSCHスループットに対して悪影響を与える場合も確認されました。

図38. 5G PDSCHのスループットとSSBビームインデックス

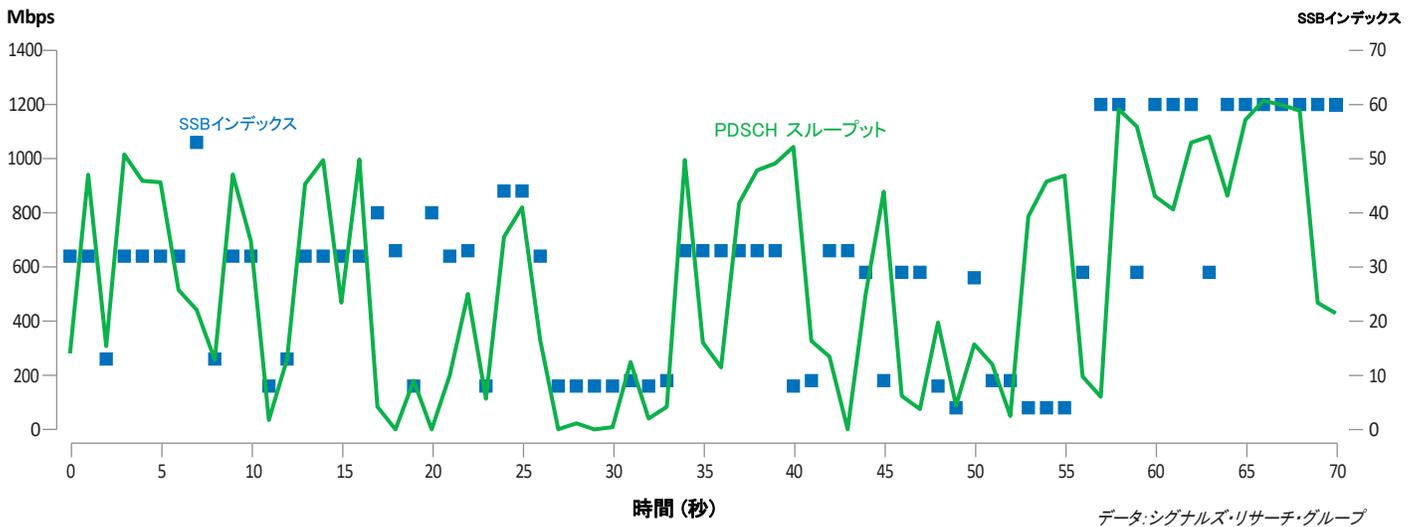


図39. SSB-SINRとSSBビームインデックス

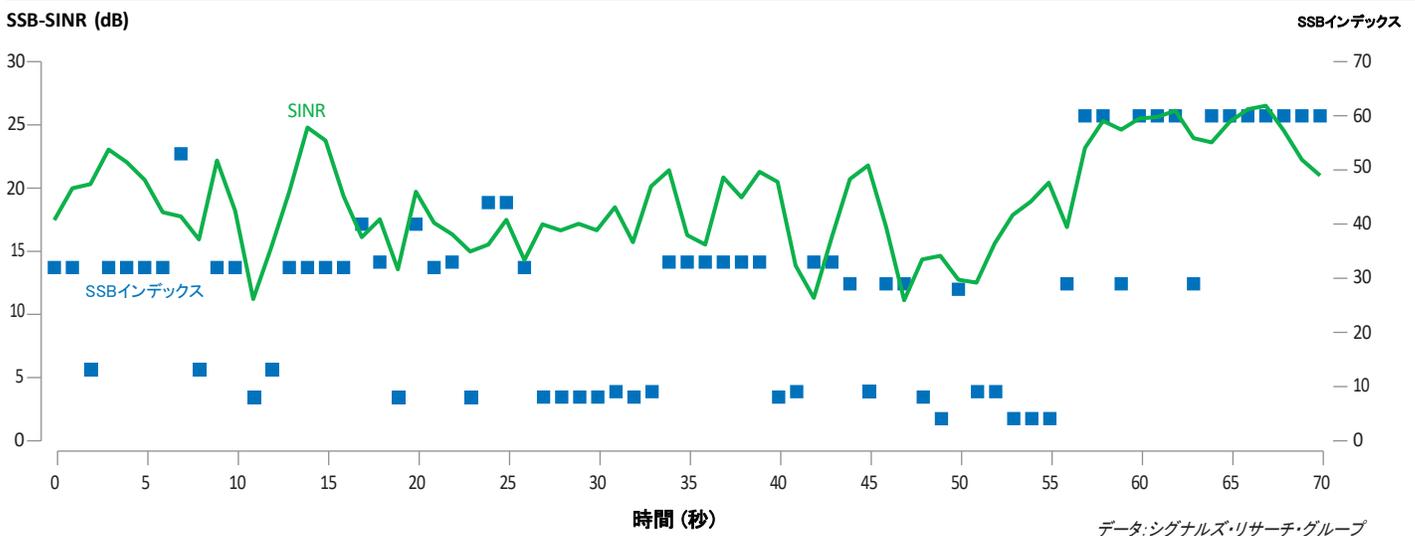
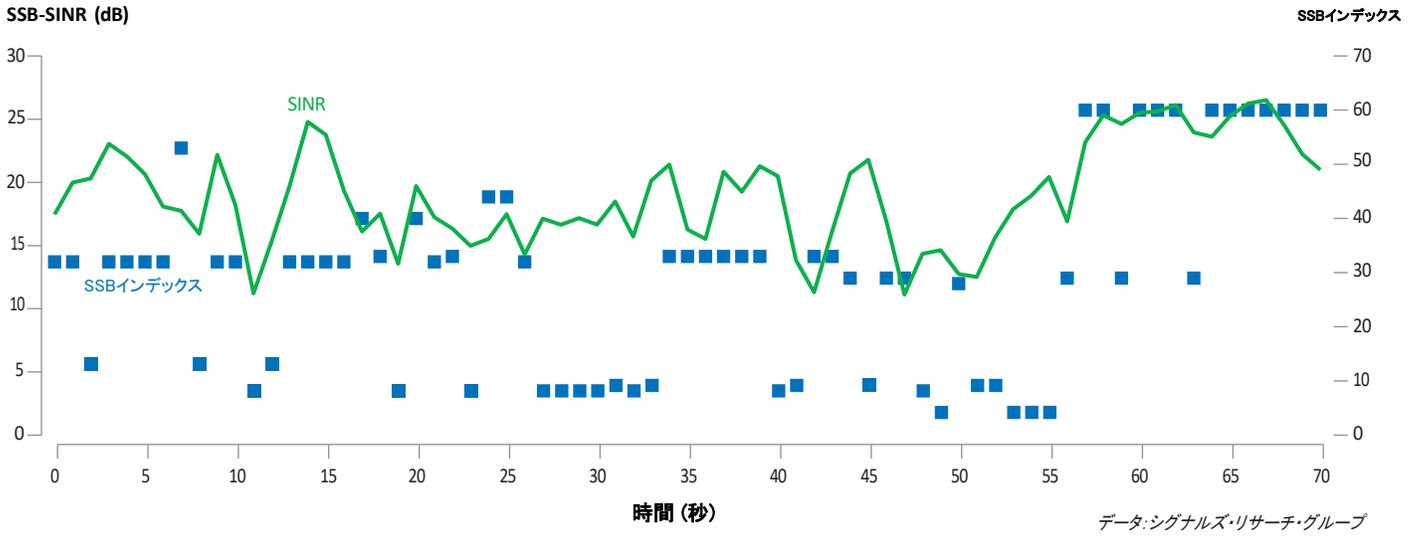


図40. RSRPとSSBビームインデックス



測定方法

本調査では、Snapdragon 888
5Gモバイルプラットフォーム
を搭載したASUS製の
Smartphone for Snapdragon
Insidersを使用

当社が行う5Gのベンチマーク調査では、信頼できるパートナーから提供された測定装置を活用してデバイスとネットワークのパフォーマンスを厳密に分析します。例えば、スマートフォンに内蔵されたモデムからチップセットに関する診断メッセージを取得することで、数百ものネットワークに関するパラメータを確認することができますが、レイヤ1、レイヤ2、レイヤ3を行き来する信号メッセージも含まれるこの情報を解析することで、どの無線ベアラが使用されているか、ネットワークリソースがどのように割り当てられるか、MIMO伝送スキームの使用率と効率、電波の状態など、ネットワークとモバイル機器の相互の通信がどのように行われているか分析することが可能です。本調査では、Snapdragon 888 5Gモバイルプラットフォームを搭載したASUS製のSmartphone for Snapdragon Insidersを使用しました。

また、帯域幅に優れた専用サーバーを活用することで、信頼性が高く、かつ持続的なデータ転送が調査時に実現しました。移動時を含む広いエリアのネットワーク性能を評価する場合、長時間にわたるダウンリンク/アップリンク方向それぞれへのデータ転送が重要になりますが、一般的な測定アプリケーションで使用されている短時間のデータ転送では、定点におけるネットワークの状態を測定することしかできないため十分ではありません。こうした理由から、調査向けに特別な環境が必要となります。また、事業者はデータセンター内に設置しているテストサーバーに依存しすぎている点も見受けられます。当社が用いた方法では、無線アクセスネットワーク上で可能な限り高速なデータを得ることができますが、インターネットから、そしてインターネットへのデータトラフィック関連パフォーマンス上の問題が隠れてしまう可能性があります。

2009年に実施されたLTEの
調査以来Accuver Americasと
共同で調査を実施

Accuver Americasとは、2009年に初めてLTEのベンチマーク調査を実施して以来、共同で調査を行ってきました。今回の調査では、同社の測定ツールXCAL-Soloを使用して、スマートフォン内のモデムから送信される診断メッセージを取得しました。XCAL-Soloは持ち運びが容易で、市街地あるいはスタジアムのような広い空間を歩きながらでも比較的容易に測定が可能なので、ミリ波帯のパフォーマンス調査には非常に有効なツールです。また、取得したチップセットのログを解析するために、同社の解析ツールXCAPを使用しました。

2006年に実施された
3Gチップセットに関する業界初
ベンチマーク調査以降
Spirent Communicationsと
協力して調査を実施

Spirent Communicationsとの関係は、当社が業界初の3Gチップセットの独立したベンチマーク調査を行った2006年にまで遡ります。ここ数年間当社は、同社のデータプラットフォームUmetrixを使用して、調査時における広帯域のデータ転送を行ってきました。今回の調査では、最大限のパフォーマンスを確保するために、すべての通信事業者のネットワークの外にある日本国内にあるUmetrixのデータサーバーを使用しました。このサーバーは10Gbpsのバックホールを持ち、HTTPS、HTTP、UDPプロトコルをサポートしているほか、ダウンリンク、アップリンク、またはダウンリンク/アップリンク方向の同時データ転送が可能です。

また、ログに記録されたチップセットのデータを1秒単位で取得することで、より管理しやすいデータ解析が可能になりました。ネットワークパラメータはミリ秒単位で取得・記録されますが、その数値は定点測定においても常に変化しているため、ログファイル内の1つのデータは1,000個近い測定数値に基づいていることもあります。

Snapdragonはクアルコム社の登録商標であり、同社あるいはその子会社の製品です。

www.signalsresearch.com

