

産業創出・ソリューション協創に向けた5G高度化技術

ネットワーク開発部

あおやぎ けんいちろう
青柳 健一郎みのくち あつし
巳之口 淳

無線アクセス開発部

はらだ こうへい
原田 皓平びん てんよう
関 天楊

ネットワークイノベーション研究所

たかはし ゆうき
高橋 優元よしおか しょうへい
吉岡 翔平

近年各国で推進されているスマートファクトリーやコネクテッドカーなど、移動通信業界にとどまらないさまざまな産業分野において、5G技術の活用が想定されている。5Gとの連携はシステム性能の向上だけでなく、新たな産業の創出、社会課題の解決などへの期待も大きい。本稿では、3GPP Rel-16において産業連携に関する各種検討に至った背景、および主に産業連携をターゲットとした各種ソリューションについて解説する。

1. まえがき

第5世代移動通信システム（5G）技術は、従来の移動通信サービスに限らず、さまざまな産業や社会を支え、また新たな価値を提供する基盤技術となることが期待されている。本特集冒頭記事 [1] にも記載の通り、ユースケース・サービスの拡張は5G技術発展の重要な要素の1つに位置づけられる。3GPP

(3rd Generation Partnership Project) Release 16（以下、Rel-16）では特にスマートファクトリー、コネクテッドカーなど、新たなパートナーとの連携、技術融合を念頭においた5G高度化の技術検討が進められた。

本稿では、産業連携を主なターゲットとした各種ソリューション（以下、産業連携ソリューション）について、3GPP Rel-16の検討背景、実現のための

©2020 NTT DOCOMO, INC.

本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

本誌に掲載されている社名、製品およびソフトウェア、サービスなどの名称は、各社の商標または登録商標。

要素技術について解説する。

2. 産業連携ソリューションの検討背景

3GPP Rel-16で検討された産業連携ソリューションは、スマートファクトリーやV2X (Vehicle to Everything)^{*1}などを検討するさまざまな業界団体などからの要望、技術要件を背景としている。産業連携ソリューションの例を以下に挙げる。

2.1 スマートファクトリー

産業連携ソリューションの1つとしてスマートファクトリーが注目されている。スマートファクトリーとは、製造プロセスの円滑化などを目的として、工場内のあらゆる機器をネットワークに接続し、機器の動作や製品の品質の可視化や機器の自動制御を行う工場のことを指す。スマートファクトリーでは、制御機器間の通信 (C2C communication: Control-to-Control communication) や、モーションコントロール^{*2}システムなどをネットワークに接続することが想定され、これらの機器を制御するためにはリアルタイム性や高信頼性が通信に求められる。このような要求条件を満たす通信手段として、有線通信があるが、製造ラインの変更が柔軟に行えないという課題がある。これらの背景から高信頼・低遅延を特長とする5Gの活用が注目されている。

また、工場自動化など産業向けユースケースへの5G技術の活用を検討することを目的とする事業団体として5G-ACIA (5G Alliance for Connected Industries and Automation) が2018年に設立された。2020年には通信業界や製造業界から約60社が同団体に参加している。5G-ACIAでは、工場自動化をはじめとする5G技術を活用した産業向けユースケースで必要とされる遅延や通信速度などの要求条件、

通信オペレータが運用するネットワークと産業向けに特化されたネットワークをどのように連携するかなどの検討を行っており、これまでも複数の技術検討結果をまとめたホワイトペーパーを公開している [2]。

2.2 V2X

V2X、すなわち自動車産業における無線通信の利用も、産業連携ソリューションの1つである。車両とあらゆるものの中で共有されたセンサ情報などが、安全で高効率な自動車に関するサービスの実現に役立てられる。V2Xサービスが近年注目を集める中、自動車業界と無線通信業界の協力による実証実験が進められており [3]、また、両業界が連携して議論を行う事業団体として5GAA (5G Automotive Association)^{*3}が2016年に設立された。2020年には130を超える事業者が同団体に参加している。

5GAAは7つのWG (Working Group) で構成されている。例えばWG1はユースケースと要求条件を議論しており、自動運転車が対向車線を越えて右左折を行う場合の要求条件などをホワイトペーパーにまとめている [4]。あわせてこのようなユースケースや要求条件について3GPPへの意見入力を行っている [5]。

こうした情報や意見を踏まえながら3GPPは、V2X向け規格 (3GPP外では、他のV2X技術と区別するためにセルラV2Xと呼ぶ場合がある。以下、セルラV2Xとする) の仕様化を行っており、V2Xサービスを実現する無線技術の1つとして期待されている (図1)。セルラV2Xは基地局 - 端末間通信 (V2N: Vehicular-to-Network) と端末 - 端末間 (サイドリンク) 通信の2種類に分けることができる。V2NにはRel-15までに仕様化されたLTE (Long Term Evolution) /NR (New Radio)^{*4}の規格が使用可能

*1 V2X: 車車間の直接通信 (V2V: Vehicle to Vehicle)、車と路側機 (道路脇に設置されている無線通信設備) 間の直接通信 (V2I: Vehicle to Infrastructure)、車両と歩行者間の直接通信 (V2P: Vehicle to Pedestrian)、LTEや5Gなどのセルラ網を経由して通信する広域通信 (基地局経由通信、V2N: Vehicle to Network) などの総称。

*2 モーションコントロール: 生産工程の自動化において、生産機器のパーツを決まった制御方法で移動・回転させ、高精度な制御を行うことを指す。自動化工場内で、位置決め制御や多軸ロボットの軸制御などに多く使われている。

*3 5GAA: 5Gを利用したコネクテッドカーサービスの検討推進を目的として、自動車関連企業と移動通信関連企業で設立した団体。

*4 NR: 5G向けに策定された無線方式規格。4Gと比較して高い周波数帯 (例えば、6GHz帯以下や28GHz帯) などを活用した通信の高速化や、高度化されたIoTの実現を目的とした低遅延・高信頼な通信を可能にする。

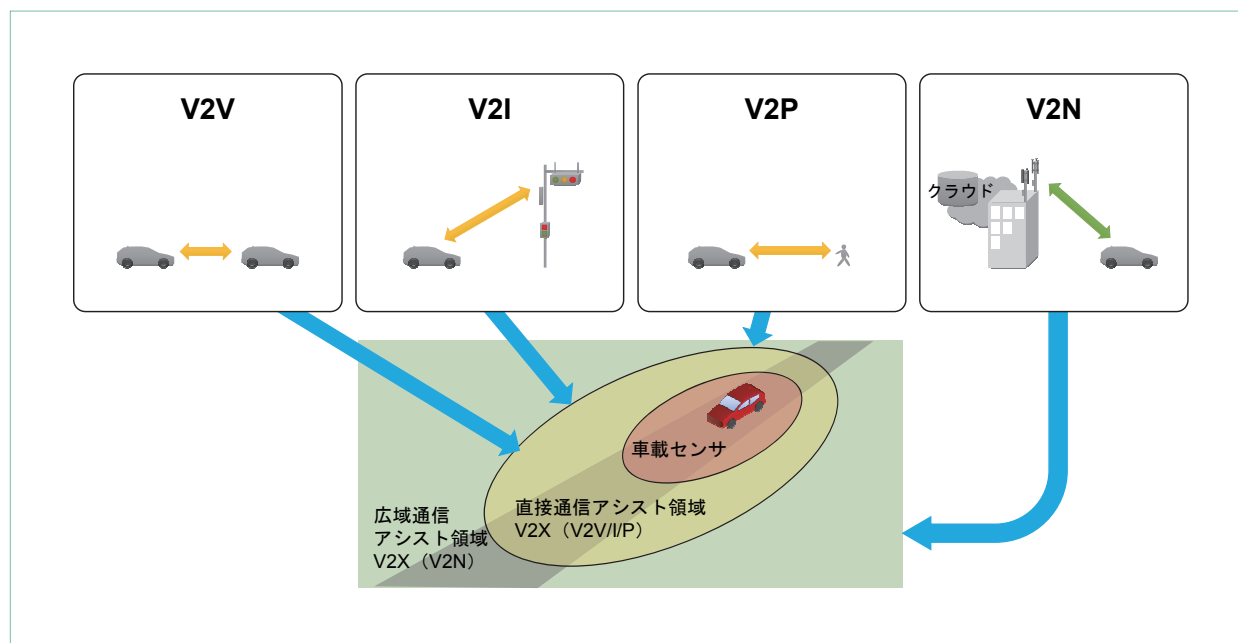


図1 セルラV2Xのイメージ

であり、サイドリンク通信にはRel-14, 15で仕様化されたLTEの規格が使用可能である。NR Rel-16では、より高い通信性能が要求されるユースケースの実現に向けた技術が検討され、仕様化された。

2.3 ローカル5G

国内におけるローカル5Gの各種要件は、直接3GPPの検討に反映されているものではないが、本稿で解説する各種産業連携ソリューションの活用も関連する技術として想定されるため本稿に掲げる。国内におけるローカル5Gは、特定の自治体、工場や大学の研究施設などにおける環境やニーズに応じて構築・運用される5Gシステムと位置付けられている。例えば限られた空間、エリア、ユーザ間でネットワーク・無線リソース*5を占有し、超低遅延などの特殊な要件に特化したネットワークの構築や、緊急時における非常通信手段の確保、また高齢化／

人口動態といったさまざまな地域特性や環境に応じた柔軟な5Gネットワーク環境を提供する事で、生活基盤の革新や新領域創出、さまざまな社会問題などの解決を図る事が期待されている（図2）。

3. 産業連携ソリューションを実現する要素技術

前述した3つの産業連携ソリューションは、それぞれ多様な技術要件で構成される（表1）。

またこれにとどまらず、スマートグリッド*6を含め、今後さらに多様かつ複雑な要件が求められる事も見据え、Rel-16では産業連携ソリューションを実現する要素技術として、NR、および5G systemの基盤技術に加え、閉域などの特殊な環境を考慮し、多様な技術要件を満たすため、以下の機能拡張、高度化がおこなわれた。

*5 無線リソース：無線通信を行うために必要なリソース（無線送信電力、割当て周波数など）の総称。

*6 スマートグリッド：電力システムに無線センサを組み込み、供給側と需要側の電力をリアルタイムかつ自律的に監視・制御し、最適化できる送電網。

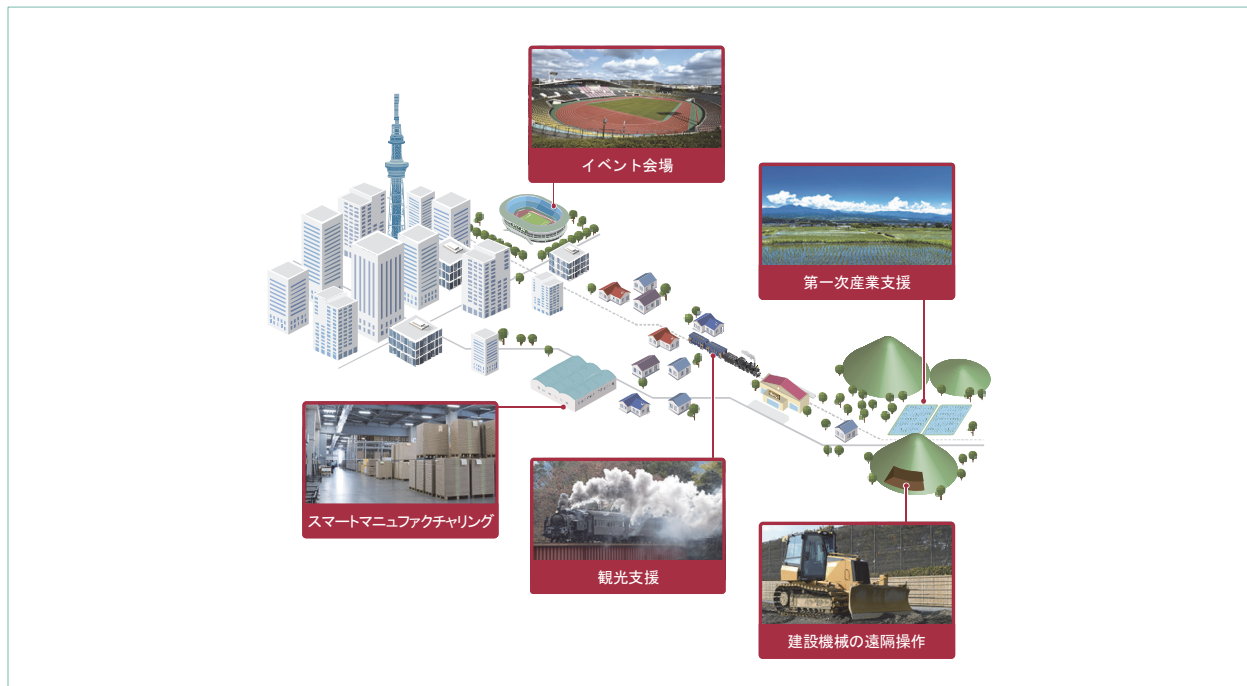


図2 ローカル5Gのイメージ

表1 産業連携ソリューションに適用されるRel-16技術（例）

	スマートファクトリー	V2X	ローカル5G
URLLC	○	○	
TSN	○		
NPN	○		○
D2D（サイドリンク）		○	
5G-LAN Type Service	○		
Private Slice		○	○
Predictive QoS		○	

○ 主な適用事例

3.1 URLLC

3GPPでは、5Gの主な特長を、①モバイルブロードバンドのさらなる高度化（eMBB：enhanced Mobile BroadBand）、②多数同時接続を実現するマシンタ

イブ通信（mMTC：massive Machine Type Communications）、③高信頼・低遅延通信（URLLC：Ultra-Reliable and Low Latency Communications）としている。これらのうち、前述の産業連携ソリュー

ションを実現するために、高信頼・低遅延を実現する技術が仕様化された。3GPPではNR Rel-16 URLLCの要求条件をユースケースごとに定義しており、例えば工場モーション制御自動化^{*7}については「20bytesのパケットを送信する際、2ms以下の遅延かつ99.9999%以上の信頼度」を目標値としている。以下では、これらの要求条件を満たすために仕様化されたNR Rel-16 URLLCについて概説する。

(1)低遅延通信のための技術拡張

(a)端末内の上りリンク優先処理

工場内の制御機器の上りリンク送信については、ユーザ端末（UE：User Equipment）内から遅延・信頼性の要求条件が異なるデータや信号が送信される時、衝突が発生し、重要な制御データが遅延して届くなどのケースが想定される。例えば、工場内のロボットが所定エリアから出てしまった時に、制御センタにロボットを緊急停止させるために、監視センサはロボットが所定エリアから出たことを通知する情報を制御センタへ送信する必要がある。そのような緊急時の制御信号の送信は一般の制御信号より遅延・信頼性に対する要求条件が厳しいため、データが常に優先的に送信される必要がある。そこで、UE内で異なる優先度を有する、複数の上りリンクの送信が衝突する際の動作が、物理レイヤ^{*8}および上位レイヤ^{*9}で仕様化された。

・物理レイヤにおける優先処理

物理レイヤにおいては、上りリンク制御チャンネル（PUCCH：Physical Uplink Control Channel）^{*10}や上りリンクデータチャンネル（PUSCH：Physical Uplink Shared Channel）^{*11}、サウンディング参照信号（SRS：Sounding Reference Signal）^{*12}などの上りリンクチャンネルや信号に優先度を付けて、高優先の上り送

信を優先的に送信するための機能が仕様化された。具体的には、高優先および低優先の2値の優先度がサポートされており、PUCCHおよびPUSCHの優先度は下り制御情報（DCI：Downlink Control Information）^{*13}による動的通知や上位レイヤのシグナリング^{*14}により設定される。また、SRSの優先度は常に低優先として扱われる。高優先と低優先の上り送信がOFDM（Orthogonal Frequency Division Multiplexing）シンボル^{*15}単位で同時に送信されるようにスケジューリングされた場合、低優先の上り送信は中止され、高優先の上り送信のみ実施される。

・上位レイヤにおける優先処理

上位レイヤにおいてもintra-UE overlapping resource prioritizationという新機能が導入された。当該機能はConfigured grant^{*16}送信がDynamic grant^{*17}送信あるいは別のConfigured grant送信と衝突する時に、UEは各論理チャンネル^{*18}の優先度を比較し、最も優先度が高い送信データをもつ論理チャンネルを優先し送信する機能である。上記過程で低優先度付けされた送信に関して、MAC PDU（Media Access Control Protocol Data Unit）^{*19}がすでに生成された場合、UEがそれを保存し、基地局への再送をスケジュールできる。さらに、低優先度付けされた送信がConfigured grantの場合、基地局はUEが保存したMAC PDUを意識できないため、再送をスケジュールしないが、そこでUEが保存したMAC PDUを自律的に再送するautonomous transmissionという機能も新規導入された。

(b)端末間の上りリンク優先処理

工場内において複数の制御端末が、遅延・信

*7 工場モーション制御自動化：工場内で生産マシンの動作（移動や回転など）を所定の周期で厳格にコントロールする自動制御システムのことを指す。例えば、大型印刷マシンやパッケージングマシンにこのモーション自動制御システムが組み込まれている。

*8 物理レイヤ：OSI参照モデルの第一層。例えば、物理レイヤ仕様とは、ビット伝送に関わる無線インタフェース仕様のことを指し示す。

*9 上位レイヤ：物理レイヤより上位に位置するすべてのレイヤであり、具体的にMAC、PDCP、RLC（Radio Link Control）、

SIAP（Adaptation Protocol）、X2APなどを指す。

*10 上りリンク制御チャンネル（PUCCH）：上りリンクで制御信号を送受信するために用いる物理チャンネル。

*11 上りリンクデータチャンネル（PUSCH）：上りリンクでデータパケットを送受信するために用いる物理チャンネル。

*12 サウンディング参照信号（SRS）：基地局側で上りリンクのチャンネル品質や受信タイミングなどを測定するための参照信号。

*13 下り制御情報（DCI）：各ユーザがデータを復調するために必要なスケジューリング情報、データ変調、およびチャンネル符号化率の情報などを含む下りリンクで送信する制御情報のこと。

頼性の要求条件が異なるデータを同時に送信することが想定される。その際、遅延・信頼性に対する要求条件が厳しいデータを送信する制御端末の通信が遅延しないように優先度をつける必要がある。そこで、UE間の上りリンクチャネルの優先処理を目的とした、Uplink cancellationやUplink送信電力制御が仕様化された。

Uplink cancellationは、あるUEに対して低優先の上り送信があらかじめスケジュールされていて、後から別のUEに対して同一のリソースに高優先の上り送信がスケジュールされる場合に、低優先の上り送信をキャンセルする機能である。具体的には、任意のUEに対してDCIでキャンセル対象となるリソースを通知し、指定されたリソースにスケジューリングされているPUSCHまたはSRSの送信を中止させる。キャンセル対象となる優先度は上位レイヤのシグナリングにより設定することが可能である。

Uplink送信電力制御は、高優先のPUSCHを送信するUEの送信電力を高くすることで優先処理する機能である。具体的には、高優先PUSCH向けに目的送信電力をDCIフォーマット0_1または0_2で通知する。

前述のUplink cancellationでは、低優先の上り送信がスケジュールされたUEの負荷が増大するという特徴をもつ。一方、送信電力制御では高優先の上り送信がスケジュールされたUEの負荷が増大するという特徴がある。

(c)PDCCHの拡張

工場内の制御端末は、遅延に対する要求条件が厳しいデータを送受信するため、短い間隔で基地局からスケジューリング情報を受信する必要がある。そこで、短い間隔で下りリンク制御チャネル（PDCCH：Physical Downlink Control

Channel）*20を受信する拡張を行った。NR Rel-15ではUEがPDCCHを受信可能な間隔はスロット*21単位と定義されている。一方、NR Rel-16では、1スロットを複数のスパン（複数OFDMシンボルの組合せ）に分割し、各スパンでPDCCHを受信することが可能になった。スパンには2 OFDMシンボル、4 OFDMシンボル、7 OFDMシンボルの組合せがあり、OFDMサブキャリア*22が15kHz、30kHzの場合にのみサポートされている。一例として、サブキャリア間隔を15kHzとし、スパンが2 OFDMシンボルの場合とNR Rel-15の場合のPDCCHの受信可能間隔を比較すると、UEは7倍の頻度でPDCCHを受信できるようになる。PDCCHはUEへの下りリンクデータチャネル（PDSCH：Physical Downlink Shared Channel）*23やPUSCH、PUCCHのスケジューリングに利用されるため、NR Rel-16ではNR Rel-15よりも短い間隔で送受信することが可能となり、遅延の低減が見込まれる。

(d)PUCCHの拡張

工場内の制御端末が基地局からPDSCHを受信した時、高信頼・低遅延性を確保するために、より柔軟・迅速にHARQ-ACK（Hybrid Automatic Repeat reQuest-ACKnowledgement）*24を返すことが望ましい。NR Rel-15では、あるスロットにおいて送信することを指示されたHARQ-ACKはHARQ-ACK CB（Codebook）*25として1つにまとめられる。そして、スロット単位で8つのPUCCHリソースの候補から1つのPUCCHリソースを選択して送信する。

一方、NR Rel-16では、あるスロットを複数のOFDMシンボル単位で分割し、その分割された単位でHARQ-ACK CBを送信することが可能となった。例えば、7 OFDMシンボル単位

*14 シグナリング：端末と基地局間の通信に使用する制御信号。
 *15 OFDMシンボル：伝送するデータの単位であり、OFDMの場合は複数のサブキャリアから構成される。各シンボルの先頭にはCP（Cyclic Prefix）が挿入される。
 *16 Configured grant：基地局からあらかじめユーザ個別にPUSCHリソースを割り当てておき、上りリンクデータが発生したら、SR（Scheduling Request）送信を行わずにUEが当該リソースでPUSCHを送信できる仕組みのこと。
 *17 Dynamic grant：UEがスケジューリングを要求し、基地局からDCIを送信して上りリンクデータの送信リソースを割り当てる

仕組みのこと。
 *18 論理チャネル：伝送情報を用途ごとに区分するチャネル。
 *19 MAC PDU：MACレイヤのPDU。PDUはヘッダやペイロード（*47参照）を含むプロトコルデータを表す。
 *20 下りリンク制御チャネル（PDCCH）：下りリンクにおける物理レイヤの制御チャネル。
 *21 スロット：データのスケジューリング単位。複数のOFDMシンボルから構成される。
 *22 サブキャリア：OFDMなどのマルチキャリア伝送において信号を伝送する個々の搬送波。

でスロットを分割した場合、1スロット（14 OFDMシンボル）で最大2つのHARQ-ACK CBを送信することが可能である。ここで、PUCCHリソースの候補として、分割後のシンボル単位それぞれで8つを設定可能である。これにより、HARQ-ACK CBの送信に用いるPUCCHリソースの指定の柔軟性が向上し、遅延の低減につながる。

(e)PUSCHの拡張

工場内の制御端末が上りリンク送信をする時、制御端末は基地局からスケジューリング情報を受信する必要がある。一方、無線区間の通信信頼性を向上させるために、制御端末は同じデータを複数回送信することが想定される。同じデータのスケジューリング情報を複数回送信することは、オーバーヘッド*26となり、システム全体の遅延増加につながる可能性がある。そこで、NR Rel-15では1つのPDCCHによるスケジューリングで複数のスロットにわたって同じチャネル構成でPUSCHを繰り返し送信する機能がサポートされている。しかしながら、チャネル構成によっては連続的な送信ができないため、遅延の増加につながる。なお、繰り返し送信回数は上位レイヤのシグナリングによって設定される。

NR Rel-16ではこの機能を高度化し、連続するOFDMシンボルで繰り返し送信できるようになった。その中のある送信がスロット間の境界にかけてスケジューリングされる場合には、スロットごとに分割して送信される。これにより、信頼性を高めつつ、低遅延でPUSCHを送信可能となった。また、上位レイヤのシグナリングによる繰り返し送信回数の静的な設定に加えて、DCIによる動的な繰り返し送信回数の通知も導入され、柔軟なPUSCHの繰り返し送信が可能と

なっている。

(f)スケジューリングの拡張

スケジューリングの拡張では多様なURLLCトラフィック周期とConfigured grant/SPS (Semi-Persistent Scheduling) configuration*27周期との不一致を軽減するために、1つのセルに複数のConfigured grant（最大12個）やSPS（最大8個）を設定できるようになった。また、シグナリングオーバーヘッド削減のために、設定されたConfigured grant type2*28/SPS configurationについてはPDCCHによって複数configurationを一斉にdeactivation*29できるようにした。さらに、周期が極めて短い（例えば、パッケージングマシン*30から生成される制御トラフィックの周期が1ms以下となっている）URLLCトラフィックのスケジューリングに対応するため、NR Rel-16 SPSの送信周期が、NR Rel-15の最短10msから最短0.125msに拡張された。

(2)通信信頼性を向上させる技術拡張

NR Rel-15では、URLLC向けに、無線区間の通信信頼性を向上させる技術としてPDCP (Packet Data Convergence Protocol)*31レイヤでのパケット重複送信制御が導入されたが [6]、無線区間のさらなる通信信頼性の向上のため、Rel-16ではPDCPレイヤパケット重複送信制御が拡張された。NR Rel-15とNR Rel-16のPDCPレイヤパケット重複送信制御の違いを図3に示す。図のように、具体的には、NR Rel-15 PDCPレイヤパケット重複送信制御では、2キャリアをRRC (Radio Resource Control)*32で設定して、重複送信を行うことができる。他方で、NR Rel-16 PDCPレイヤパケット重複送信制御では、MgNB (Master gNB)*33とSgNB (Secondary gNB)*34のキャリアの中から最大4キャリアをRRCで設定し

*23 下りリンクデータチャネル (PDSCH)：下りリンクでデータパケットを送受信するために用いる物理チャネル。

*24 HARQ-ACK：データの受信ノードが正常に受信（復号）できたか否かを送信ノードに通知する受信確認信号。

*25 HARQ-ACK CB：複数のHARQ-ACKビットを1つの上りリンクチャネルで送信する際の、当該ビットの集合のことを指す。

*26 オーバヘッド：ユーザデータの送受信を行うために必要な制御情報や、受信品質測定に必要な参照信号など、ユーザデータの送信以外に用いられる無線リソース。また、それら制御情報や参照信号などの冗長な送信。

*27 SPS configuration：半固定的なリソース割当てを行うスケジューリング手法。

*28 Configured grant type2：基地局からあらかじめ（周期的な）PUSCHリソースを割り当て、任意のタイミングで当該リソースを用いたPUSCH送信をPDCCHによりアクティブ化する送信方法。

*29 deactivation：RRCで設定された無線リソースによる送信を非アクティブにすることを指す。

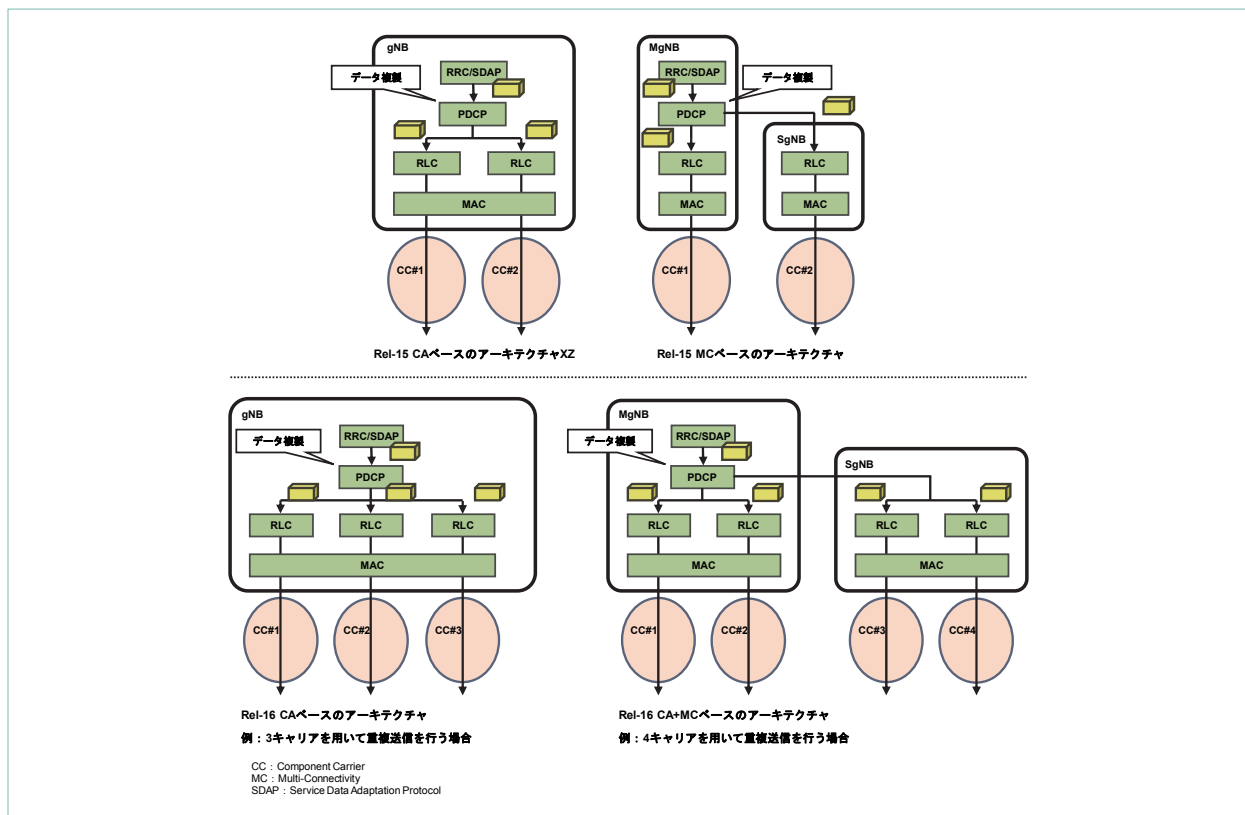


図3 Rel-15とRel-16の重複送信の違い

て、重複送信を行うことができる。最大4キャリアが設定可能のため、例えば、図3の左下のように3キャリアのみを選択して重複送信する事も可能。一方、図3の右下のように4キャリアすべてを選択して重複送信する事も可能となった。また、NR Rel-15と同様、UEが通信を行う無線区間の状況は、無線品質や混雑度などによってダイナミックに変わりうる事を想定して、必要に応じて動的に重複送信に使用するキャリアを制御する事が規定された。本制御により、例えば、一部のキャリアでの重複送信が不要な場合は、あるキャリアでの重複送信をOFFにする事で、リソース利用効率の劣化を防ぐことができる。

なお、URLLC通信に伴うコアネットワーク^{*35}側

の機能拡張もRel-16で規定されている。U-plane^{*36}の信頼性向上を実現するため、ネットワーク構成などのさまざまな要件に応じた柔軟な冗長パス^{*37}設定によりデータ経路の信頼性を担保できる(図4)。また端末移動(モビリティ)のケースで、ハンドオーバー^{*38}などに伴う遅延の改善や、通信品質(QoS)をモニターする機能などが拡張されている。

3.2 TSN

TSN (Time Sensitive Network) は、IoT (Internet of Things) 端末などの通信機器間におけるリアルタイムな通信を行うための時刻同期、および低ジッタ(ゆらぎ)通信を実現する技術であり、IEEE TSN

*30 パッケージングマシン：パッケージングオペレーションを自動的に行う機械のことを指す。パッケージングプロセスは物品の充填、密封、ラベリング、ラッピング作業などを含む。

*31 PDCP：レイヤ2におけるサブレイヤの1つで、秘匿、正当性確認、順序整理、ヘッダ圧縮などを行うプロトコル。

*32 RRC：無線ネットワークにおける無線リソースを制御するレイヤ3プロトコル。

*33 MgNB：DCにおけるマスターノードのgNB。

*34 SgNB：DCにおけるセカンダリノードのgNB。

*35 コアネットワーク：交換機、加入者情報管理装置などで構成さ

れるネットワーク。移動端末は無線アクセスネットワークを経由してコアネットワークとの通信を行う。

*36 U-plane：通信で送受信される信号のうち、ユーザが送受信するデータの部分。

*37 冗長パス：同一の通信データ送受信を、複数の通信経路を設定して行うことであり、通信の信頼性を向上させる。

*38 ハンドオーバー：通信中の端末が移動に伴いセルをまたがる際、通信を継続させながら基地局を切り替える技術。

はIEEE 802^{*39}におけるTSNの規格で、イーサネットをベースに拡張されたさまざまな通信規格で構成される。

スマートファクトリー内では高精度な時刻同期が要求されている。例えば、モーションコントロールでは、End-to-Endの同期精度の要求条件が1 μ s以下となっている。Rel-16ではNR/5G systemの特徴技術をTSNに適用し、精密な時刻同期かつ低ジッ

タ通信を行うTSC（Time Sensitive Communication）を5G systemで実現するための機能拡張が行われた。

まずTSNをNR/5G systemで実現する構成として、NR/5G system全体がTSNにおける1つのブリッジの役割を担うこととし、TSNにおけるCNC（Central Network Controller）^{*40}がポート間の通信を制御するFully centralized model^{*41}（図5）を採用した。

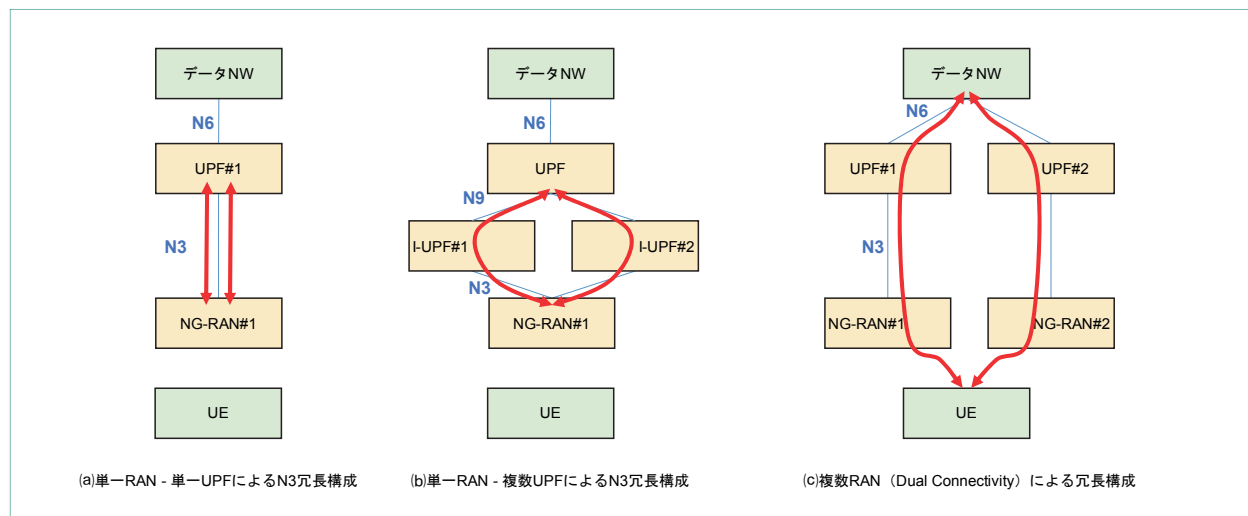


図4 URLLCにおける冗長パス

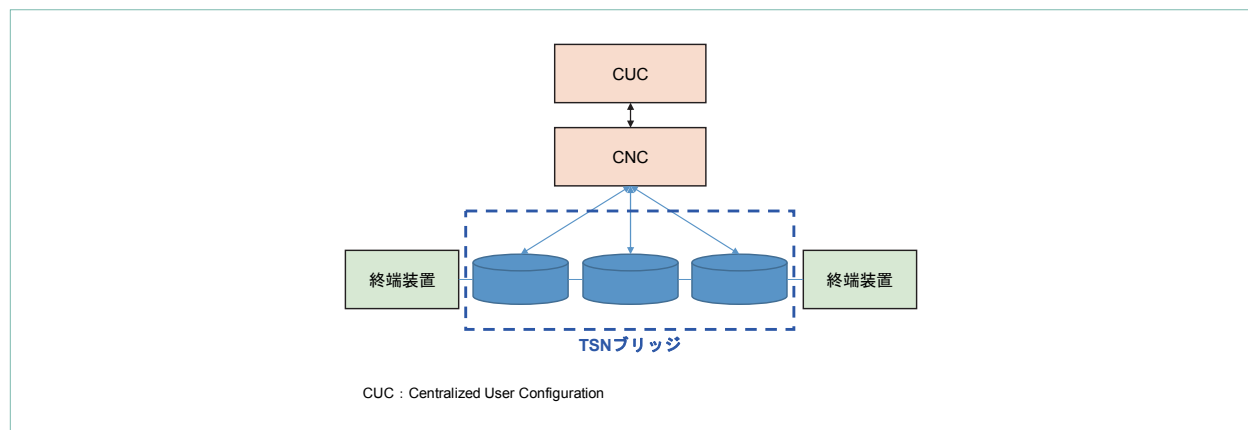


図5 TSN Fully centralized Model

*39 IEEE 802 : IEEEにおいてLANおよびMAN（Metropolitan Area Network）に関する標準を規定する委員会、通称LMSC（LAN/MAN Standards Committee）。

*40 CNC : TSNにおいてTSNブリッジのコントロールを行うコンポーネント。

*41 Fully centralized model : TSNモデルの1つ。CUCにおいて一元的に終端装置、アプリケーションの管理を行うモデル。

当該ブリッジはポート間のトラフィックスケジューリングについてIEEE 802.1Q^{*42}における手法の一部をサポートしている。TSNシステム時刻の一元的な管理を行うTSN GM (Grand Master) と各終端装置 (IoT端末など) 間に、当該ブリッジを経由した通信経路を設定し、当該ブリッジは時刻同期制御の一部を担うとした。当該ブリッジはIEEE802.1AS^{*43}の一部をサポートする。

すなわち、このTSNブリッジの中で、高速大容量のNR無線やURLLC、QoS、セキュリティなどNR/5G systemにおける各種ネットワーク制御技術を適用する事により、工場など複雑な環境下においても柔軟な機器配置を実現しながら、5Gの特長技術を適用した高品質、高信頼性のTSNを構築する事が可能となる (図6)。

また、UEとgNB間の高精度な時刻同期を実現するために、RAN (Radio Access Network)^{*44}側ソ

リューションとして基地局がUEに高精度な5G system参照時刻 (時刻粒度: 10ns) をブロードキャスト/ユニキャストする機能が仕様化された。なお、UE側は端末内の同期ずれなどを考慮し、基地局に5G system参照時刻を自主的に要求する機能が導入されている。また、基地局はQoS (Quality of service) フロー^{*45}をセットアップする時やハンドオーバー時にコアネットワークからTSCAI (Time Sensitive Communication Assistance Information) というトラフィックに関する補助情報を取得できる。TSCAIには遅延要求が厳しいトラフィックの到着時間や周期情報が含まれており、高効率な基地局スケジューリングに役立つ。

IEEE TSNではイーサネットフレーム^{*46}が使われているため、5G systemがTSN Bridgeの役割を担う際、イーサネットフレームをUE - gNB間で転送する事が想定される。このイーサネットフレーム

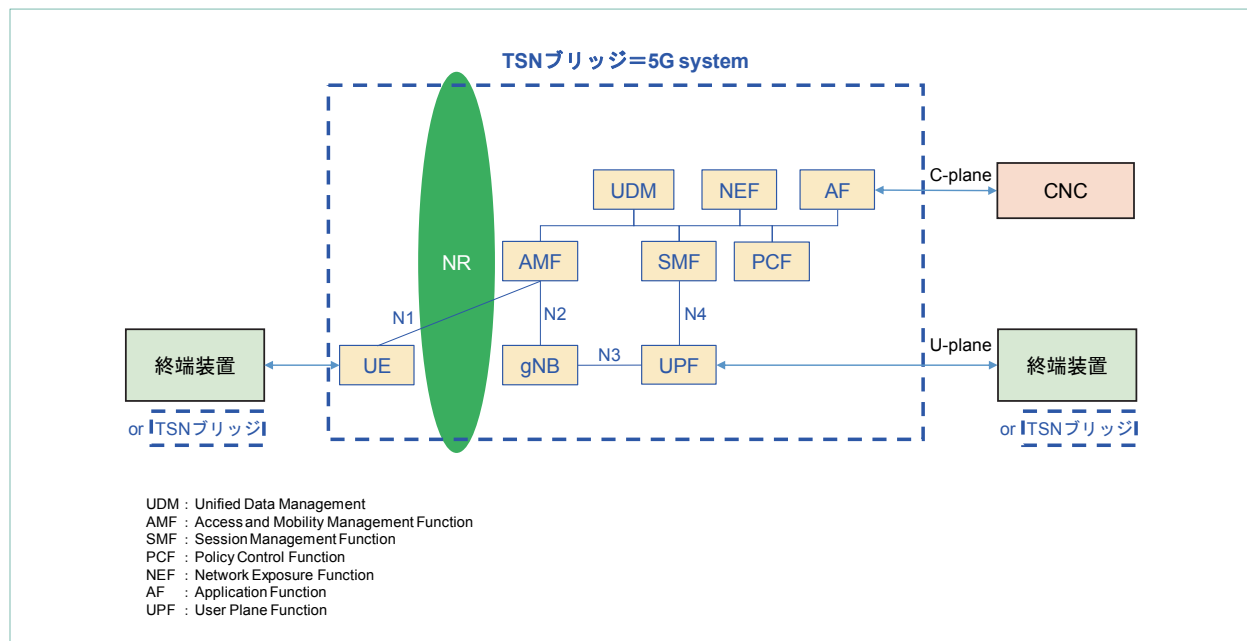


図6 TSNブリッジに5G systemを適用した構成例

*42 IEEE 802.1Q: Local and Metropolitan Area Networkにおけるブリッジ、およびブリッジ構成によるネットワークに関する規格。

*43 IEEE802.1AS: Local and Metropolitan Area Networkにおける時刻同期制御に関する規格。

*44 RAN: コアネットワークと端末の間に位置する、無線レイヤの制御を行う基地局などで構成されるネットワーク。

*45 QoSフロー: 基地局とコアネットワーク間にセットアップされるPDU (Protocol Data Unit) session tunnelにQoSクラス (通信サービス品質 (遅延許容時間、パケットロス率など) のこと) を区別するIPフロー単位。

*46 イーサネットフレーム: イーサネットLANの通信を行う際に使用するデータのフォーマット。

はペイロード^{*47}サイズがヘッダサイズに比べて小さい事が想定されている。そこで、オーバヘッドの削減のため、PDCPサブレイヤにイーサネットヘッダ圧縮（EHC：Ethernet Header Compression）^{*48}機能がNR Rel-16で規定された。ヘッダ圧縮原理は、RoHC（Robust Header Compression）^{*49}と同様、内容が変わらないヘッダの要素と、対応するコンテキストID（CID：Context ID）^{*50}を受信側で記憶させておく事で、記憶されたヘッダ要素の送信を省略し、受信側で復元する事で達成される。なお、RoHC制御についての詳細は2014年の本誌 [7] を参照のこと。EHCの実施手順を図7に示す。図7の(a)~(c)において、下記の通りヘッダ圧縮手順を実施する。

- (a)あるパケットのフルヘッダ^{*51}と当該フルヘッダに紐づけられたCIDを受信側へ通知する。
- (b)受信側は当該コンテキスト^{*52}を記憶した事を

通知するために、記憶したコンテキストに対応するフィードバックを送信側へ通知する。

- (c)送信側はフィードバック受信後、受信側がコンテキストを記憶したと判断し、以後、ヘッダを圧縮しデータを送信する。

なお、イーサネットヘッダ圧縮はダウンリンクでもアップリンクでも適用可能のため、例えば、ダウンリンクの場合、送信側はeNB（evolved NodeB）^{*53}またはgNB、受信側はUEとなる。

3.3 NPN

通信事業者が一般公衆用としてあまねく提供する通信ネットワークPN（Public Network）に対し、NPN（Non Public Network）は、特定のユーザ、グループに限定したアクセス制御により、周波数な

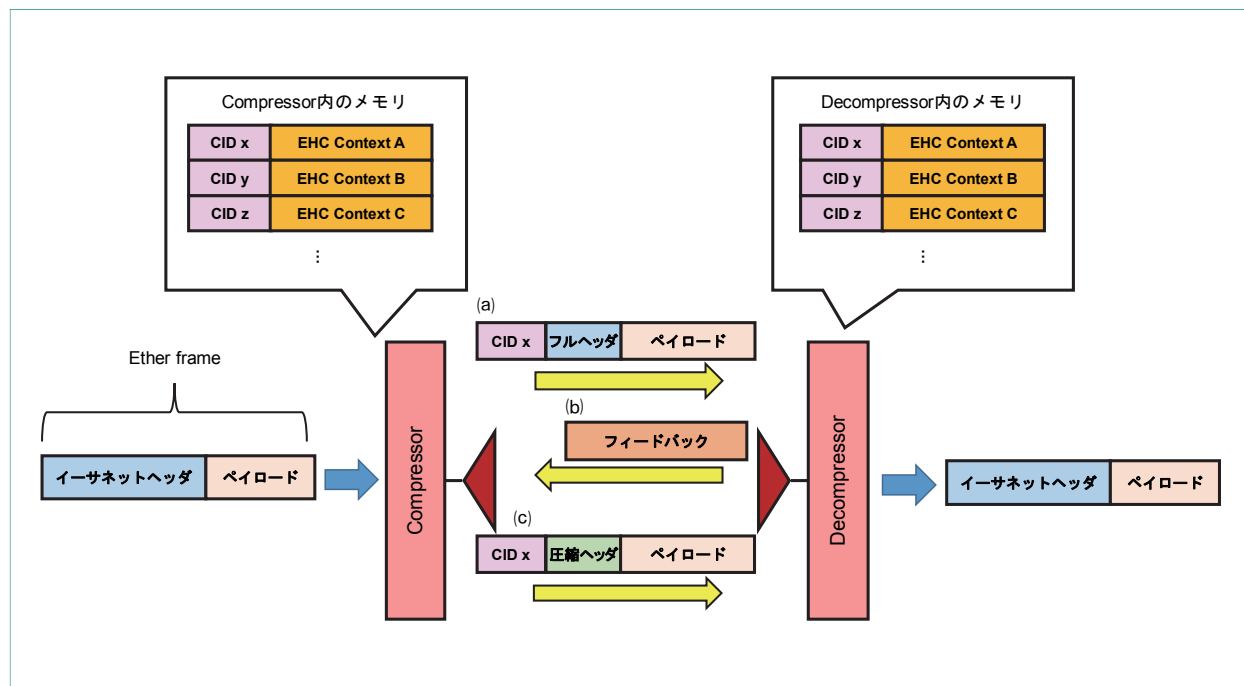


図7 EHCの圧縮・解凍手順

^{*47} ペイロード：通信データのうち、ヘッダなどを除いた本来通信したいデータ本体。
^{*48} イーサネットヘッダ圧縮（EHC）：PDCPサブレイヤの機能の1つでUE - gNB間で転送されるイーサネットフレームのヘッダを圧縮する機能。イーサネットフレームのヘッダ部分、つまり送信MACアドレス、受信MACアドレス、ペイロードタイプ、Q-Tag（オプション）が圧縮される。イーサネットフレーム長は任意で圧縮可能。
^{*49} RoHC：RFC文書で規定されているRTP/UDP/IPヘッダなどを圧縮する技術。

^{*50} コンテキストID（CID）：コンテキスト（^{*52}参照）を識別するために付与されるID。受信側は、受信したCID、圧縮されていないヘッダ要素、そして自身が記憶しているCIDに対応したコンテキストを基にヘッダを復元する。
^{*51} フルヘッダ：PDCP機能部上で圧縮される前のイーサネットフレームのヘッダ部分。送信MACアドレス、受信MACアドレス、イーサネットフレーム長またはイーサペイロードのタイプ、Q-Tag（オプション）で構成されている。

どの無線リソースや基地局，ネットワークリソースを占有する閉域ネットワークを構成する技術である。また無線／ネットワークリソースの占有は，公衆網と比較し高速・大容量，超低遅延通信などの性能向上にも寄与する。Rel-16では，通信事業者の5G公衆網の一部として，専用網基地局を構築するPNI-NPN（Public Network Integrated NPN）と，通信事業者網から独立したネットワークを構築するSNPN（Standalone NPN）のアーキテクチャ形態が規定されている（図8）。

(1)PNI-NPN

PNI-NPNは，公衆網を収容するコアネットワーク（5GC：5G Core Network）と同じネットワークにNPNを収容するネットワークアーキテクチャである（図8(a)）。アクセスコントロールにはCAG（Closed Access Group）を適用し，UEは報知情報*54により通信セルから送信されるCAG IDと，UE側において設定，保持するアクセス可能なCAG IDの

リストを照合する事で，アクセス権の有無を判断の上当該セルへのアクセスを試みる。一方CAG IDが設定されていないUEからは，当該セルがアクセスのできないCell Barredと見え，セル選択処理の対象としない。PNI-NPNに在圏するNPNUeは公衆網と同じ事業者コード（PLMN（Public Land Mobile Network）*55 ID）が設定され，公衆網へのアクセスを許容する事もできる。

コアネットワークは，契約情報などからUEにアクセス可能なCAGリスト，および前述の公衆網へのアクセスを許容するか否かを識別するCAG only情報を管理し，UEに対してそれらを通知することができる。また，基地局に対して，前述のCAGリストおよびCAG onlyの設定を通知することで，基地局側では当該情報を使用し，通信中状態にあるUEのハンドオーバなどによるCAGセルへのアクセスをコントロールすることができる。

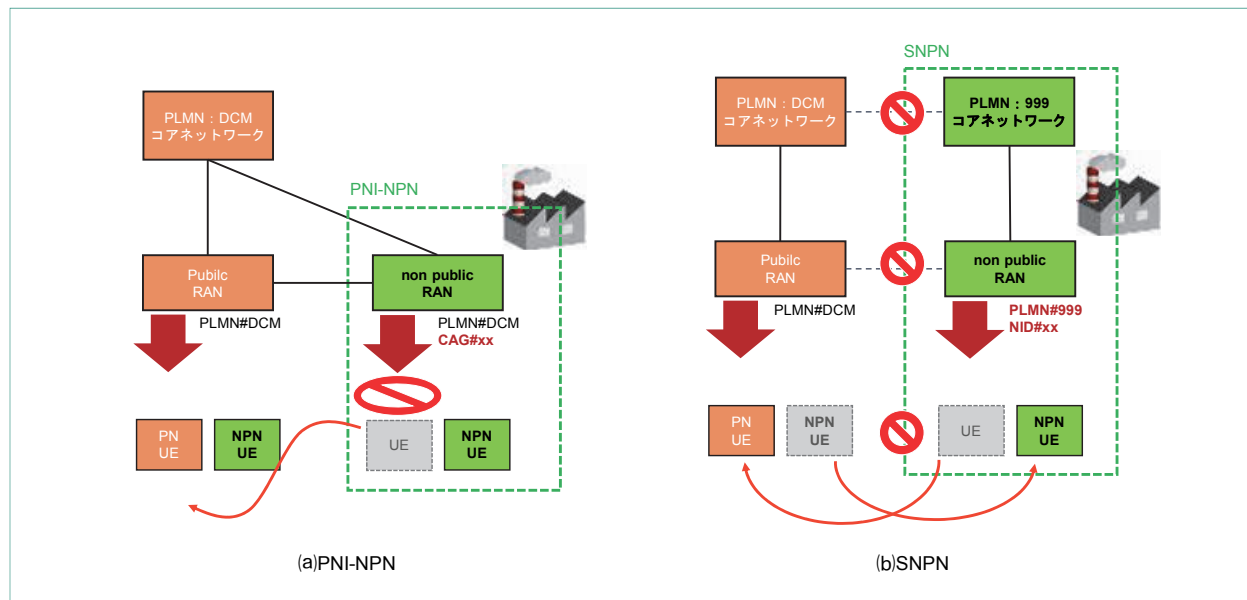


図8 NPN構成

*52 コンテキスト：受信側で記憶されるイーサネットヘッダの要素の内容の事。1つのコンテキストに対して，対応するIDが付与される。

*53 eNB：LTEの基地局・無線制御装置。

*54 報知情報：移動端末における位置登録要否の判断に必要な位置登録エリア番号，周辺セル情報とそのセルへ在圏するための電波品質などの情報，および発信規制制御を行うための情報などを含み，セルごとに一斉同報される。

*55 PLMN：移動通信システムを用いたサービスを提供するオペレータのこと。

(2)SNPN

PNI-NPNが公衆網のコアネットワークに收容されるのに対し、SNPNは公衆網からは独立し単独で構成されたコアネットワークに收容される（図8(b)）。SNPNにはPLMN IDとは別にNID（Network ID）が設定され、当該NIDを設定されたUEは電源を入れた際などに発動する通信事業者の選択処理において、当該NIDを選択する。すなわちSNPNに在圏するNPNUEはPNI-NPNに在圏するNPNUEとは異なり、異なるPLMN IDが設定された公衆網へ在圏する事ができない。SNPNセルはシステム情報で報知されるPLMN IDとNIDの組合せで識別できる。また公衆網と独立して認証手順を実施する。認証方式には端末から取得する認証キーを用いたEAP-TLS（Extensible Authentication Protocol Transport Layer Security）^{*56}を適用する事ができ、この場合USIM（Universal Subscriber Identity Module）^{*57}を用いなくてもネットワークに在圏することが可能となる事から、IoTなどの小型端末の柔軟性を高め、またベンダなどが独自ネットワークを構築しやすいとされる。

3.4 V2X

(1)V2Xアーキテクチャ

コネクテッドカーなどのシステムに3GPP移動無線システムの活用が期待されており、NR Rel-16ではNR/5G systemを活用したV2Xシステムアーキテクチャが規定されている。また5GCの特徴技術の1つである、ネットワークスライシング^{*58}の活用も想定されており、ネットワークスライスを選択する情報要素の1つであるSST（Slice/Service Type）Valueにおいて新たにV2X用途を示す値が規定されている。

(2)V2Xの下位レイヤ仕様

セルラV2Xにおける通信のうち、V2NについてはNR Rel-16までに規定されたすべての仕様を用いることが可能である。その中でも特に前述のURLLC向け規格はコネクテッドカーを対象ユースケースの1つとした上で議論され、仕様化された。一方でサイドリンク通信は、NR Rel-15の基地局 - 端末間通信の構成 [8] およびLTEのサイドリンク通信の構成を基に、以下の通り仕様化された。

(a)NRサイドリンク通信の特徴機能

NRのサイドリンク通信は通信速度・信頼性・遅延性能の高い要求を満たすように検討され、LTEのサイドリンク通信と比較して新しい構成や機能が採用された。

- ・無線フレーム^{*59}構成：複数の異なるOFDMサブキャリア間隔（15kHz, 30kHz, 60kHz, 120kHz）が適用可能である。これはNR Rel-15の基地局 - 端末間通信と同様であり、広いサブキャリア間隔は高速移動への追従性と遅延低減に効果的である。
- ・通信タイプ：物理レイヤにおいてブロードキャスト、グループキャスト、ユニキャストの3種類が規定された。LTEのサイドリンク通信はブロードキャストのみが規定されており、通信品質を確保するためには通信パラメータを過度に安全な値に設定する必要があった。一方で新たに規定されたグループキャスト、ユニキャストは、限られた通信対象との間のチャンネル状態に基づいて適切な通信を行うことで、通信品質を確保しつつリソースの利用効率向上が可能である。加えて、通信対象外のUEにおける不要な復号処理の回避にも有効である。新たに規定された通信タイプの適用例として、グループキャストを

^{*56} EAP-TLS：IETFによって規定された認証プロトコルの1つ。クライアント、サーバの双方で電子証明書を発行し、相互に認証が行われる。

^{*57} USIM：携帯電話会社と契約した電話番号などを記録しているICカード。3GPPでのW-CDMA/LTEおよび5G用途の移動通信用加入者識別モジュール。

^{*58} ネットワークスライシング：5GCで提供されるネットワーク形態の1つ。ユースケースやビジネスモデルなどのサービス要件ごとにネットワーク装置や各種ネットワークリソースを論理的、または物理的に分割する技術。

^{*59} 無線フレーム：信号処理（符号化・復号化）を行う最小単位。1個の無線フレームは、時間軸上で複数のスロット（またはサブフレーム）によって構成され、各スロットは時間軸上で複数のシンボルによって構成される。

隊列走行に利用することが考えられる。これにより、隊列を形成する自動車間の通信を効率的に行うことができる。

- ・トラフィックタイプ：周期的および非周期的トラフィックを想定して各要素技術の仕様化が行われた。突発的かつ緊急性の高いデータが発生した場合に、信頼性および遅延性能の高い要求を満たす送信が可能となる。例えば、事故の可能性が生じた場合に、瞬時に周囲の自動車と通信を行うことで事故を回避するケースが考えられる。なお、LTEのサイドリンク通信は周期的なトラフィックのみを想定した仕様となっていた。
- ・再送機能：物理レイヤにおけるフィードバック（HARQフィードバック）の情報に基づく再送が規定された。各データ送信に対しては信頼性および遅延性能の向上が期待され、システム観点では必要以上の再送を回避することによる全体の性能向上につながる。なお、LTEのサイドリンク通信において採用された繰返し送信も併せて規定されている。
- ・MIMO（Multiple Input Multiple Output）^{*60}、高次変調：NRのサイドリンク通信は最大2レイヤ送信が可能となった。また、データ変調方式^{*61}の1つとして256QAM（Quadrature Amplitude Modulation）^{*62}が規定された。ある時間および周波数リソースにおいて送信可能なデータ量が増加し、通信速度の向上などに有効である。NR Rel-16仕様では自動車間で映像を共有するユースケースも想定されており、これを可能にする機能の1つとして期待される。

(b) 端末間同期

これらの構成および機能を用いたサイドリン

ク通信を行うためには、端末間で同期をとる必要がある。端末間同期はLTEのサイドリンク通信と同様の構成および手順で行われる。すなわち、GNSS（Global Navigation Satellite System）^{*63}、eNB/gNB、UE（自動車など）の同期信号^{*64}のいずれかのタイミングに基づいて信号を送受信する。UEの同期信号は図9に示される構成として規定された。

(c) リソース割当て

端末間同期が確立した状態で、データ送信を行うUEは2種類のリソース割当て手法（Mode 1、Mode 2）のいずれかによって定められたリソースを使用して、データを送信する。

Mode 1では、gNBから指定されたリソースを使用する。gNBは周期的および非周期的なリソースのいずれかを指示可能である。

一方Mode 2では、UEが自律的にリソースを選択する。他UEからのリソース予約情報を受信し、その情報に基づいて使用可能なリソースを選択する。リソース予約は周期的および非周期的なリソースに対して行うことができる。また、使用するリソースが決定された後、実際に使用する直前にそのリソースが使用可能かを再評価する機能や、他UEがそのリソースを予約した場合にリソースを再選択する機能が規定された。端末間の送受信の衝突回避に有効なこれらの機能によって、UEが自律的にリソースを選択する場合であっても要求される通信品質を満たすことが期待できる。

なお、リソース割当ての単位については、どちらのリソース割当て手法も、LTEのサイドリンク通信と同様にスロット単位で行われる。

(d) 制御チャンネル／共有チャンネル構成

割り当てられたリソースを使用して、UEは

^{*60} MIMO：同一時間、同一周波数において、複数の送受信アンテナを用いて信号の伝送を行い、通信品質および周波数利用効率の向上を実現する信号伝送技術。

^{*61} データ変調方式：ある時間／周波数／空間のリソースにおいて、複数の信号をまとめて送受信する技術。256QAM（^{*62}参照）の場合、振幅と位相の組み合わせ候補が256個存在し、そのうちの1つを送信することで8ビットをまとめて送信できる。

^{*62} 256QAM：変調方式の種類。256QAMは振幅と位相が異なる256通りの信号点に情報ビットを変調する。1回の変調で8ビットの情報を伝送することができる。

^{*63} GNSS：GPSや準天頂衛星などの衛星測位システムの総称。

^{*64} 同期信号：移動局が通信の開始に必要な周波数と受信タイミングおよび同期元識別子の検出を行うための物理信号。

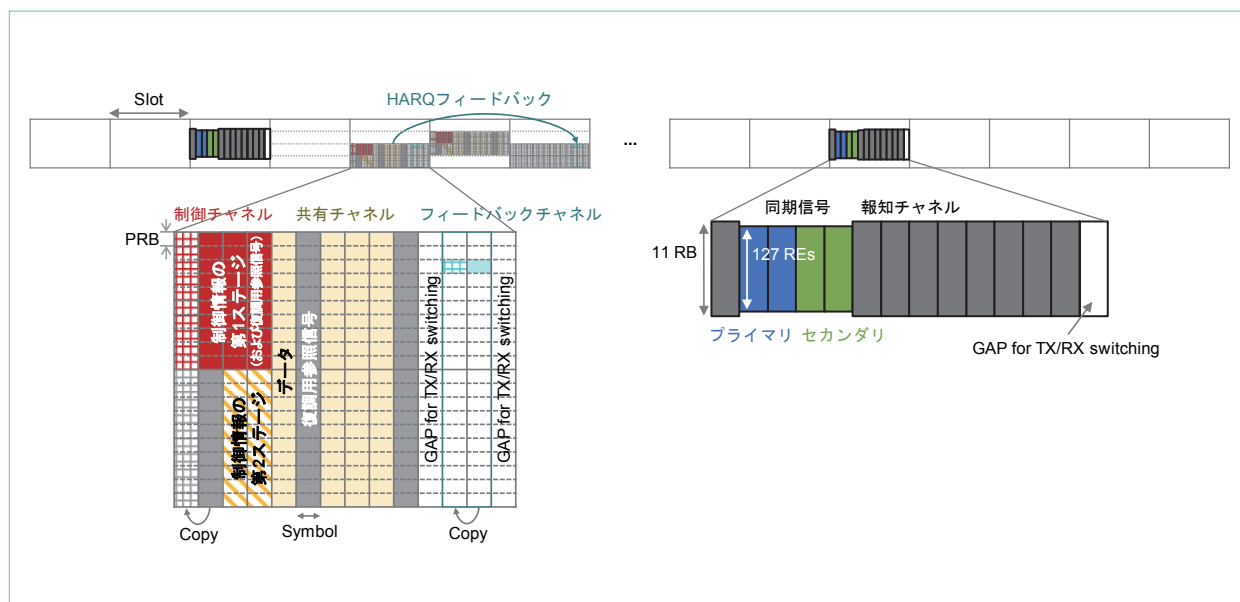


図9 サイドリンク用の物理チャンネル構成例

データおよびそれに伴う制御情報を他UEに送信する。送信される物理チャンネル^{*65}は図9に示される制御チャンネルおよび共有チャンネルであり、それぞれ制御情報の第1ステージ、制御情報の第2ステージおよびデータが格納される。制御チャンネルはスロットの前方に配置され、遅延量の削減が図られている。制御情報の第1ステージは、他UEがブライント復号^{*66}する、第2ステージを受信および復号するために必要な情報である。制御情報の第2ステージは、第1ステージを受信したUEが復号する、データを受信および復号するために必要な情報やその他の情報である。前述のリソース予約情報は制御情報の第1ステージに含まれる一方、通信タイプや送信先情報は第2ステージに含まれる。制御情報を2つのステージに分割することは、チャンネル状態などに基づいて各ステージの制御情報の送信に使用されるリソースの柔軟な制御を可能に

し、リソース利用効率や受信品質の向上が可能となる。さらに、第1ステージのフォーマットを共通としつつ、第2ステージのフォーマットを変更することができるため、前方互換性の確保が可能となる。

- (e)物理レイヤのフィードバック情報に基づく再送
自身宛のデータを受信したUEは、それがグループキャストまたはユニキャストであった場合に送信元のUEに対してフィードバック情報を送信可能である。図9に示す通りHARQフィードバックは専用の物理チャンネルによって行われ、そのチャンネルが配置され得るリソースは特定のスロット周期で設けられる。ある受信データに対応するHARQフィードバック用のリソースは、そのデータの送信リソースと送信元/送信先情報によって一意に定まる。前述のMode 2の場合であってもフィードバックチャンネルの衝突を回避しつつ、UEのブライント復

*65 物理チャンネル：周波数、時間などの物理リソース上にマッピングされ、制御情報や上位レイヤのデータを伝送するチャンネルの総称。

*66 ブライント復号：送信される可能性のある信号を、実際の送信の有無に関わらずに受信および復号を試みる、受信側のUE処理。

号が要求されない構成となっている。これに加えて、前述のMode 1の場合にはデータ送信元のUEからgNBへのHARQフィードバックが可能である。gNBは受信したフィードバック情報に基づいて再送をスケジューリングすることができる。

(f)その他の機能

以上の機能以外にも、要求条件を満たすための機能が規定されている。例えばCSI (Channel State Information) フィードバック^{*67}やダウンリンクまたはサイドリンクのパスロス^{*68}に基づく電力制御、Congestion control^{*69}などが挙げられる。さらに、LTEおよびNRのうちの一方のV2Nによって、もう一方のサイドリンクのリソースを割り当てる機能も規定されている。

3.5 その他の関連技術

(1)5G-LAN Type Service

工場構内、オフィスなどにおいて、特定グループ内での通信を行う機能、5G VN (Virtual Network) group^{*70}を定義したグループ管理、および内線通信などを行うUPF (User Plane Function) 折返し^{*71}、UPF-UPF間のインタフェースN19などが導入されている。

(2)Private Slice

前述したPNI-NPNは、無線リソース（基地局、周波数）の占有／分割を実現する技術と位置付けられる一方、コアネットワークを含めたE2E (End to End) リソース分割には、ネットワークスライスの活用も想定される。5GC Rel-16ではネットワークスライス機能が拡張され、特定ネットワークスライス内で独自に認証認可手順を適用するNSSAA (NetworkSlice Specific Authentication and Author-

ization) が規定されている。詳細は本特集別記事を参照されたい [9]。

(3)Predictive QoS

自動運転などにおいては、車載カメラで撮影された高精細な動画データなどをリアルタイムに収集／解析する必要が求められ、車の走行ルート／時間帯に該当するエリアの通信品質の予測が重要とされる。Rel-16では5GCで規定されたNWDAF (Network Data Analytic Function)^{*72}において、ネットワーク内で蓄積されるさまざまなデータを解析し、将来の通信品質予測を提供する事ができる。またNEF (Network Exposure Function)^{*73}を介して、外部サーバやアプリケーションから解析結果などの情報を取得する処理が規定されている。詳細は本特集別記事を参照されたい [9]。

4. あとがき

本稿ではRel-16で規定されたNR/5G systemの産業連携ソリューションについて解説した。Rel-17以降も、本稿記載のさまざまな産業連携機能に対する機能拡張に加えて、ビッグデータ/AIの活用や、ドローンへの対応も見込まれる。また本特集冒頭記事 [1] にも記載の通り、Beyond 5Gや6Gも見据えたユースケース・サービスのさらなる拡張は5G技術発展の重要な要素の1つと位置づけられている。ドコモは引き続き5Gのさらなる発展に貢献していく。

文 献

- [1] 永田, ほか: “5G Evolutionの方向性と標準化動向,” 本誌, Vol.28, No.3, pp.41-44, Oct. 2020.
- [2] 5G-ACIA: “5G for Automation in Industry,” Jul. 2019.
- [3] 阿部, ほか: “コネクテッドカー時代に向けたドコモの取り組み,” 本誌, Vol.27, No.4, pp.27-34, Jan. 2020.
- [4] 5GAA: “White Paper C-V2X Use Cases Methodology,

^{*67} CSIフィードバック: ある2つの通信装置の間の通信において、一方の通信装置から参照信号を送信し、もう一方がその受信信号からチャネルの品質を測定して相手へ報告する技術。報告された情報を基に各種送信パラメータを決定することで、通信品質や周波数利用効率の向上が期待される。

^{*68} パスロス: 送信電力と受信電力との差分から推定される伝搬経路損失。

^{*69} Congestion control: 主にUEが自律的にリソース選択を行って送信する場合に、特定のUEが過度にリソースを使用することを禁止する技術。チャネルの空き具合と自身の送信状況から、

送信の可否を判断する。

^{*70} 5G VN group: 5G LAN Type Serviceにおける仮想的なプライベート通信を提供される端末グループ。

^{*71} UPF折返し: 端末とのU-planeデータを終端するUPFにおいて、インターネットなど外部への接続を介さず、別の端末との通信経路を設定すること。

^{*72} NWDAF: 5GCで規定されたネットワーク機能の1つ。ネットワーク内のさまざまなデータを収集、分析し結果を返す。

^{*73} NEF: 5GCで規定されたネットワーク機能の1つ。3GPP規定外の外部サーバやアプリケーションなどへのAPIを提供する。

- Examples and Service Level Requirements,” Jun. 2019.
- [5] 3GPP RP-181530 : “LS on Prioritised Use Cases and Requirements for consideration in Rel-16 NR-V2X,” Sep. 2018.
- [6] 徳永, ほか : “新たな音声サービスを実現するVoLTEの開発,” 本誌, Vol.22, No.2, pp.7-23, Jul. 2014.
- [7] ウメシユ, ほか : “5G無線アクセスネットワーク標準化動向,” 本誌, Vol.25, No.3, pp.33-43, Oct. 2017.
- [8] 武田, ほか : “5GにおけるNR物理レイヤ仕様,” 本誌, Vol.26, No.3, pp.47-58, Nov. 2018.
- [9] 青柳, ほか : “3GPP Rel-16における5Gコアネットワークの高度化技術の概要,” 本誌, Vol.28, No.3, pp.45-56, Oct. 2020.