

製造現場における 5G/ ローカル 5G 通信機器の効果的な 活用方法に関する ガイドライン



多様なユースケースに応じて
通信パフォーマンスを向上させるために



目次

1	目的	1
1-1	ガイドラインの作成背景	1
1-2	ガイドラインの目的	2
1-3	ガイドラインの想定読者	2
2	製造現場における 5G/L5G 通信機器の活用に向けて	4
2-1	製造現場において 5G/L5G 通信機器を利用するうえでの壁	4
2-2	標準パラメータを正しく理解する	5
2-3	ユースケースに応じて標準パラメータの状況を把握し、対応方法を検討・実施する	6
2-4	本ガイドラインの読み方	7
3	標準パラメータの詳細と設定・調整にあたっての留意点	8
3-1	標準パラメータの一覧と影響関係	8
3-2	標準パラメータの詳細	12
3-3	標準パラメータを設定・調整するにあたっての留意点	50
4	ケース別 5G/L5G システムの挙動把握およびそれを踏まえた設定方法	51
4-1	本章の対象範囲と前提条件	51
4-2	本章で取り上げるケース	53
4-3	機器の制御に関連するケース：AGV/AMR の操作・映像取得	54
4-4	機器の制御に関連するケース：機械に関する動作制御・遠隔操作	74
4-5	設備・資産管理に関連するケース：工場内の設備や備品及び資産管理(部品管理・在庫管理・資産管理)	89
4-6	安全管理・品質に関連するケース：カメラ映像を用いた現場モニタリング(稼働監視)	103
5	おわりに	120
5-1	メッセージ、謝辞	120
5-2	参考文献	121
巻末資料 1	本ガイドラインで使用した用語	122
巻末資料 2	5G/L5G を活用した製造現場におけるユースケース(例)	127
巻末資料 3	ユースケースごとの要求性能	129

1 目的

1-1 ガイドラインの作成背景

近年、製造現場では、市場の変化に即応できる柔軟かつ迅速な生産ラインの組換えや、データ連携等による自律的・全体最適な稼働を通じた競争力の向上が求められている。こうした要求に応える手段として、配線の制約を受けず、ラインの構成変更が容易な無線通信の活用が注目され、様々な無線通信機器が製造現場に導入されつつある。とりわけ、低遅延、高速大容量、多数同時接続といった特徴を持つ 5G/ローカル 5G(以下、「5G/L5G」とする)通信機器は、これらの特徴を活かすことで、製造現場の多様なユースケースへの適用が期待されている。ただし、5G/L5G 通信機器の性能を十分に引き出すには、環境や用途に応じたパラメータの適切な設定が必要となる。

こうした 5G/L5G 通信機器の活用への期待の高まり等を踏まえ、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(以下、「NEDO」とする)は 2021 年度より「5G 等の活用による製造業のダイナミック・ケイパビリティ強化に向けた研究開発事業¹」(以下、「5GDC 事業」とする)を開始し、5G 等に係る研究開発・調査を推進してきた。

5GDC 事業を通じた調査の過程で、製造現場における 5G/L5G 通信機器の導入・運用時に、機器の設定・調整に関する複数の課題が存在することが明らかになった(課題の詳細は第 2 章(P4)で述べる)。しかし、こうした課題に対応するガイドラインはこれまで整備されていなかった。そこで、NEDO「製造現場における 5G/L5G 無線機器のパフォーマンス最適化に関する調査」の一環として本ガイドラインを作成することとなった。

¹ 本事業では、加工順の組換えや個々の生産設備の動作の変更等、柔軟・迅速な組換えや制御が可能な生産ラインの実現を目指し、生産設備等の遠隔での一括最適制御のために必要となる技術開発を実施している。

1-2 ガイドラインの目的

本ガイドラインは、製造現場において 5G/L5G 通信機器の導入・運用に携わる方々(生産技術の現場管理者等。以下、「現場担当者」とする)が、以下の事項を達成できることを目的とする。

- ・ 自社のユースケースに関連する標準パラメータ²を特定し、その役割と 5G/L5G との関係を理解できる。
- ・ 通信性能に関する課題が生じた際に、標準パラメータの挙動を把握し、調整の方向性を判断できる。
- ・ 標準パラメータの調整だけでは対応が困難な場合に、他の対応方法(アプリケーションの運用設計の見直し等)を含む改善策を検討できる。

なお、実際の標準パラメータの設定・調整は、通信機器提供事業者やシステム構築事業者が担うことが多い。本ガイドラインは、現場担当者がこれらの事業者とパラメータの設定・調整について協議する際の参考としても活用できる。

1-3 ガイドラインの想定読者

本ガイドラインは、以下のような者を主な読者として想定する。

表 1 ガイドラインの想定読者

想定読者	本ガイドラインの活用場面(例)
5G/L5G 通信機器の導入に向けて具体的な準備・設計を進めている現場担当者	標準パラメータの全体像と設定の基本的な考え方を事前に把握する(第3章(P8)参照)
5G/L5G 通信機器の運用中に、通信性能上の課題に直面している、または性能改善に取り組んでいる現場担当者	原因の見立て・改善の方向性を知り、実運用に適用する(第4章(P51)参照)

なお、本ガイドラインでは、読者が以下の用語や概念について基礎レベルの知識を有していることを前提とする。

- ・ 無線通信の基本的な仕組み(基地局と端末の関係、セルの概念等)
- ・ 電波伝搬の基礎(電波品質の指標、フェージング等)
- ・ 複信方式の違い(TDD/FDD)

² 本ガイドラインでは、標準パラメータを「5G/L5G 通信機器の動作・性能に影響を与える機器内部の主要な設定項目」と定義する。

そのため、5G/L5G の通信の仕組みや個々の技術の詳細な解説は含んでいない。5G/L5G の前提知識について理解を深めたい場合は、以下の資料等を併せて参照いただきたい。また、本ガイドラインで扱う標準パラメータの技術的な根拠となる標準仕様は、3GPP(3rd Generation Partnership Project)が策定する Technical Specification³として公開されている。

表 2 5G/L5G の前提知識を学べる資料(例)

資料名	概要
インプレス標準教科書シリーズ 5G 教科書 LTE/IoT から 5G まで ⁴	<ul style="list-style-type: none"> ・ LTE から 5G に至る無線通信技術の発展を解説した書籍 <ul style="list-style-type: none"> ➤ ワイヤレス・ブロードバンドの全体像 ➤ 無線アクセス技術の詳細 等
インプレス標準教科書シリーズ 続・5G 教科書 NSA/SA から 6G まで ⁵	<ul style="list-style-type: none"> ・ 5G NR や 5GC などの規格や技術、ネットワークの進化を解説した書籍 <ul style="list-style-type: none"> ➤ 5G NR や 5GC の最新動向 ➤ 産業界応用のための高度化技術 等
5G 携帯のはなし ⁶	<ul style="list-style-type: none"> ・ 5G の基本的な仕組みや特徴を解説した Web 資料 <ul style="list-style-type: none"> ➤ 歴史・概要(高速大容量・多数同時接続・低遅延の特徴) ➤ 通信方式 ➤ 基地局の仕組み 等
NTT ドコモ テクニカル・ジャーナル ⁷	<ul style="list-style-type: none"> ・ 5G に関する技術的な解説や最新動向をまとめた Web 資料 <ul style="list-style-type: none"> ➤ OFDM、Massive MIMO、ビームフォーミング、マルチアンテナ技術、ネットワークアーキテクチャ(NSA/SA 構成)等の詳細 ➤ 標準化動向 等

³ 3GPP, “Specifications by Series”, <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/specifications-by-series>, (参照 2026-03-02)

⁴ 服部 武/藤岡 雅宣, “インプレス標準教科書シリーズ 5G 教科書 LTE/IoT から 5G まで”, 株式会社インプレス, 2018

⁵ 服部 武/藤岡 雅宣, “インプレス標準教科書シリーズ 続・5G 教科書 NSA/SA から 6G まで”, 株式会社インプレス, 2023

⁶ サイレックス・テクノロジー株式会社, “5G 携帯のはなし(1)”, <https://www.silex.jp/library/blog/20210419-1>, (参照 2026-03-02)

⁷ 株式会社 NTT ドコモ, “テクニカル・ジャーナル” https://www.docomo.ne.jp/corporate/technology/rd/technical_journal/, (参照 2026-03-02)

2 製造現場における 5G/L5G 通信機器の活用に向けて

2-1 製造現場において 5G/L5G 通信機器を利用するうえでの壁

5G/L5G 通信機器を製造現場で活用するにあたり、多くの現場担当者が以下のような壁に直面している。

■主な壁

- ・ パラメータの意味がわからず、何を設定すればよいか判断できない。
- ・ 通信機器の設定がブラックボックス化(設定が見えない、変更できない状態)して調整が難しい。
- ・ 設定可能なパラメータを調整してみたものの、期待通りの通信性能が得られない。

これらの壁に対し、本ガイドラインでは以下の2つの観点でアプローチする。

- ・ 標準パラメータを正しく理解する(第3章 P8)
- ・ ユースケースに応じて標準パラメータの状況を把握し、対応方法を検討・実施する(第4章 P51)

なお、読者の状況に応じて第4章から読み始め、必要に応じて第3章を参照する読み方も可能である。読み方の詳細は2-4節(P7)を参照いただきたい。

本ガイドラインを通じて、現場担当者が 5G/L5G 通信機器のパラメータの意味を把握し、ユースケースに応じた調整ができる状態を目指す。なお、必要に応じて通信機器提供事業者やシステム構築事業者と対話しながら進めることも有効である。

以下では、それぞれの壁の要因を整理するとともに、本ガイドラインにおける対応箇所を示す。

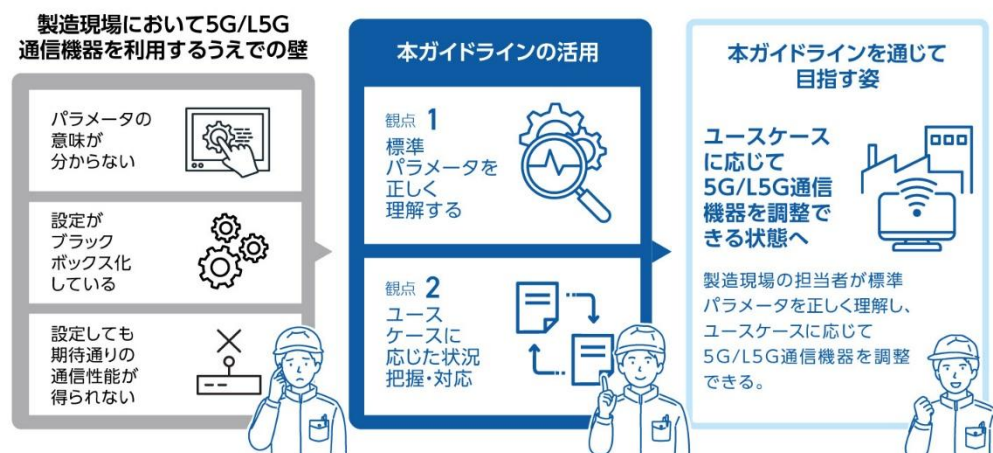


図 1 5G/L5G 通信機器を利用するうえでの壁に対する
本ガイドラインのアプローチと目指す姿

2-2 標準パラメータを正しく理解する

5G/L5G 通信機器には、その動作・性能に影響を与える多数の機器内部のパラメータが存在する。しかし、パラメータの数が多く、それぞれがどのような役割を持ち、通信性能にどう影響するかの関係も複雑であるため、現場担当者にとってパラメータの全体像を把握すること自体が容易ではない。

パラメータの役割や意味を十分に理解しないまま設定を行うと、期待通りの通信性能が得られなかった際に、どのパラメータに注目すべきかがわからず、対処の糸口をつかめなくなる。こうした事態を避けるためにも、パラメータの理解が不可欠である。

この壁に対しては、まず標準パラメータの全体像を把握することが有効である。これにより、課題発生時に着目すべきパラメータの候補を絞り込めるようになり、第4章(P51)で述べるユースケース別の調整にも円滑に移行できる。本ガイドラインの第3章(P8)では、各標準パラメータを以下の観点で解説する。

表 3 第3章での記載内容

記載事項	読者が得られること
①標準パラメータの役割・意味	・ その標準パラメータの定義や役割がわかる。
②5G/L5G の特徴との関係	・ 低遅延、高速大容量、多数同時接続のどれに影響するかがわかる。
③設定値の考え方	・ 重視する観点(低遅延/高速大容量等)に応じた設定方針がわかる。

2-3 ユースケースに応じて標準パラメータの状況を把握し、対応方法を検討・実施する

標準パラメータの役割や意味を理解したうえで必要となるのが、ユースケースに応じた標準パラメータの設定値の調整である。

製造現場のユースケースは、機械に関する動作制御・遠隔操作、AGV/AMR の操作・映像取得、カメラ映像を用いた現場モニタリング(稼働監視)など多岐にわたり、それぞれ遅延、データサイズ、頻度、接続数などの要求性能が異なる。このため、一律の設定ではすべてのユースケースに対応することはできず、要求性能を踏まえたパラメータの調整が必要となる場合がある。

加えて、製造現場の実環境では、接続する端末台数の増加や通信負荷の変動などにより、理論値やカタログスペックとは異なる通信性能となることがある。こうした実環境における通信性能の変化はカタログスペックを参照するだけでは把握できない。

このため、所望の通信性能を実現するには、実環境において標準パラメータの状況を把握し、各標準パラメータの設定値が通信性能にどのように影響しているかを確認したうえで、適切な対応方法を検討・実施する必要がある。なお、対応方法にはパラメータの調整だけでなく、アプリケーションの運用設計の見直しなど、システム全体の観点からのアプローチも含まれる。本ガイドラインの第4章(P51)では、具体的なユースケースごとに、以下の流れで進め方を示す。

表 4 第4章での記載内容

記載事項	読者が得られること
①概要・前提	・ 取り上げるケースの想定状況、運用構成、通信への要求条件がわかる。
②現場において発生しやすい現象	・ 事前評価や運用時に起こりやすい現象と、その影響がわかる。
③影響を与えていると考えられる標準パラメータ	・ 現象の原因候補となる標準パラメータと、簡易的な確認方法がわかる。
④標準パラメータの状況を把握する方法	・ 原因を裏付けるための測定手順、結果パターンの例とその読み取り方がわかる。
⑤対応方法	・ 具体的な設定内容・設定値の決め方、および設定が適切かの確認方法(判定基準含む)がわかる。
⑥同様の対応が有効なユースケース	・ 他のユースケースへの応用条件と、適用時の留意点がわかる。

2-4 本ガイドラインの読み方

本ガイドラインは、読者の状況に応じて必要な箇所から読み進めることができる。まず以下の表で第4章に自社に近いケースがあるかを確認したうえで、フローチャートを参考に、状況に応じた読み方で本章以降を読み進めていただきたい。

表 5 第4章で取り上げるケースおよび関連するユースケース例

参照先	ケース	関連するユースケース例
4-3 節 (P54)	AGV/AMR の操作・映像取得	パトロールの自動化(移動ロボット、遠隔ロボット)、ドローン+温度センサによる工場環境計測(移動ロボット等)、動画像による異常検知
4-4 節 (P74)	機械に関する動作制御・遠隔操作	パトロールの自動化(移動ロボット、遠隔ロボット)、ロボット等によるプラント内点検
4-5 節 (P89)	工場内の設備や備品及び資産管理(部品管理・在庫管理・資産管理)	製品数カウント等、検査データの取得・書き込み(映像含む)
4-6 節 (P103)	カメラ映像を用いた現場モニタリング(稼働監視)	動画像による異常検知、カメラを用いた不法侵入者の検知(進入禁止エリア検知含む)

※一部のユースケース例が複数のケースにまたがる理由については、4-2 節 (P53) を参照いただきたい。

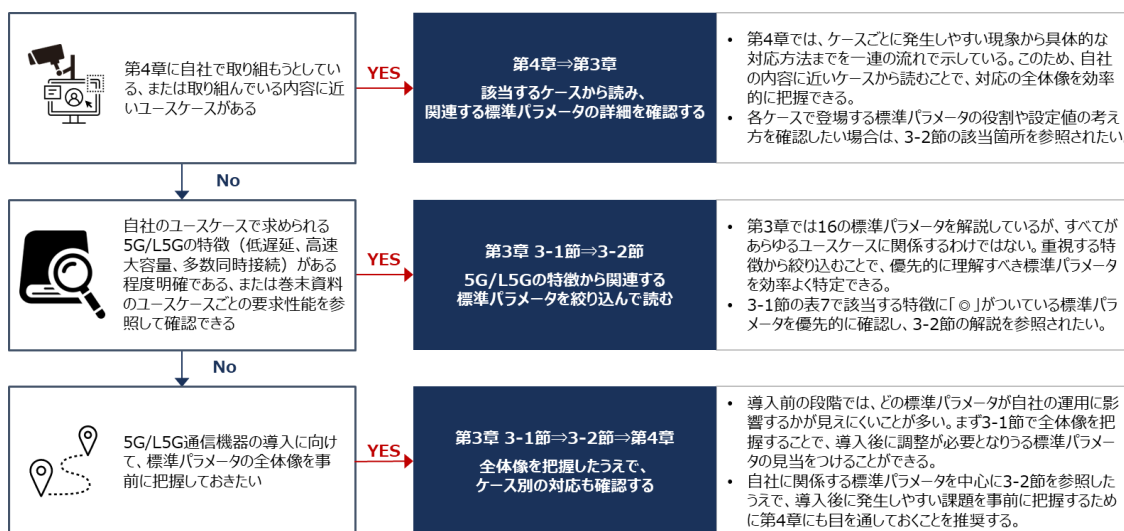


図 2 読者の状況に応じた本章以降の読み方

3 標準パラメータの詳細と設定・調整にあたっての留意点

本章では、標準パラメータの一覧と相互の影響関係を説明したうえで(3-1 節)、各標準パラメータの詳細を解説する(3-2 節)。各パラメータの記載構成は表 3 を参照いただきたい。

3-1 標準パラメータの一覧と影響関係

図 3 は、5G/L5G の特徴と標準パラメータとの関係を示したものである。本ガイドラインでは、標準パラメータを性質に応じて、以下のカテゴリに分類している。

表 6 5つのカテゴリの概要

カテゴリ	説明
周波数利用効率/エラー耐性	・ 1 回の送信にどれだけ情報を詰め込むか、エラー耐性にどう備えるか。
無線リソース(時間軸)	・ いつ・どのタイミングで送信するか。
無線リソース(割当量)	・ 各端末にどれだけの通信枠を配分するか。
通信の優先制御	・ どのデータを優先して届けるか。
通信の接続制御	・ 端末の接続状態をどう管理するか。

周波数利用効率/エラー耐性、無線リソース(時間軸)、無線リソース(割当量)、通信の優先制御は、実際のデータ伝送に関わる標準パラメータであり、通信の接続制御は端末の接続状態の管理に関わる標準パラメータである。標準パラメータごとに関係する 5G/L5G の特徴が異なることから、製造現場のユースケースに合わせて、どのような標準パラメータの調整が必要なのかを理解することが重要である。

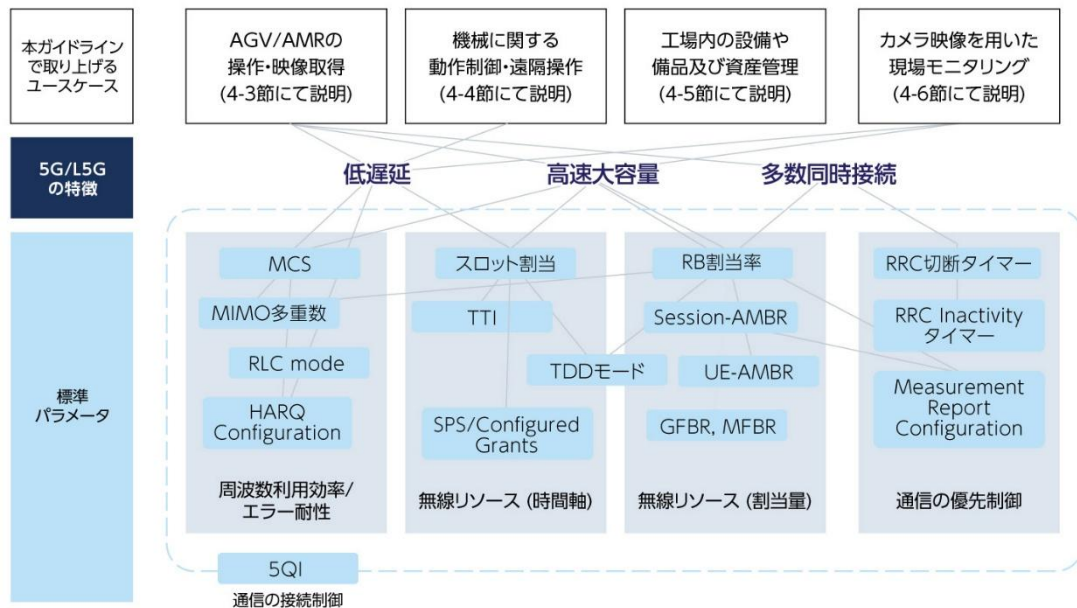


図 3 5G/L5G の特徴と標準パラメータの影響関係

各標準パラメータの概要は次の表のとおりである。それぞれの詳細は次の 3-2 節で述べるため参照いただきたい。なお、表中の「低遅延」「高速大容量」「多数同時接続」の列には、各標準パラメータとの関係の強さ 3 段階で示している。

- ◎：パラメータの設定変更が当該特徴の性能に直接的な影響を与え、かつ設定変更による効果が大きいもの
- ：性能に関係はあるが適用場面や設定上の制約があるもの
- △：特定の条件下において影響を与えうるもの(設定が不適切な場合や副次的な影響)

表 7 標準パラメータの概要

カテゴリー	標準パラメータ名	概要	低遅延	高速大容量	多数同時接続
周波数利用効率／エラー耐性	MCS (P12)	・ 変調方式と符号化率の組合せにより、1回の送信に詰め込む情報量を決める。	◎	◎	—
	MIMO 多重数 (P15)	・ 複数アンテナによる同時送受信において、アンテナの使い方を決める。	○	◎	—
	RLC mode (P17)	・ 無線区間でデータが正しく届かなかった場合に再送するか否かを決める。	◎	○	—
	HARQ Configuration (P20)	・ 無線区間での高速再送の有無や最大回数を決める。	◎	○	—
無線リソース(時間軸)	スロット割当 (P23)	・ 時間方向の無線リソースを端末にどのような周期で割り当てるかを決める。	○ ⁸	—	—
	TTI (P25)	・ 無線区間でデータをひとかたまりとして送信する時間の基本単位であり、値が短いほどデータ1回分の送信が早く完了する。	○ ⁹	○ ⁹	—
	TDD モード (P27)	・ 自営基地局の DL/UL パターンを隣接する他事業者の基地局と合わせるか、一部独自のパターンとするかを決める。	◎	◎	—
	SPS/Configured Grants (P29)	・ あらかじめ決めた周期で無線リソースを固定的に予約・割当することで、送信のたびに行う無線リソース割当要求の手順を省略する。	◎	△	—
無線リソース(割当量)	RB 割当率 (P32)	・ 同一基地局に接続する複数端末への無線リソースの配分比率を決める。	○ ¹⁰	○ ¹⁰	○ ¹⁰
	Session-AMBR (P34)	・ 端末と 5G ネットワーク間に確立される論理的な通信路に対して、通信速度の上限値を設定する。	△	◎	◎
	UE-AMBR (P37)	・ 1台の端末が使用できる通信速度の合計上限値を定義する。	△	◎	◎
	GFBR, MFBR (P39)	・ 帯域保証型(GBR)の通信に対し、最低保証速度(GFBR)と許容上限速度(MFBR)を定義する。	○	◎	◎

⁸ 多くの基地局では直接設定できないが、TDD モードの変更や Configured Grant の適用により間接的に改善できる場合がある。

⁹ 日本国内の Sub-6GHz 帯 L5G では、他事業者の基地局との干渉調整の観点から、実質的にサブキャリア間隔が固定されることが多い。

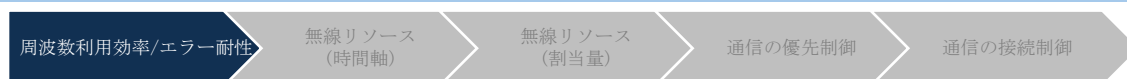
¹⁰ 多くの基地局では直接設定できないが、UE-AMBR や GFBR 等の関連パラメータにより間接的に調整できる場合がある。

カテゴリー	標準パラメータ名	概要	低遅延	高速大容量	多数同時接続
通信の優先制御	5QI (P41)	<ul style="list-style-type: none"> データの優先度・許容遅延・許容パケットロス率などの品質基準をまとめて指定する。 	◎	○	○
通信の接続制御	RRC 切断 タイマー (P44)	<ul style="list-style-type: none"> 通信終了後、端末が通信可能な状態から待機状態に移行するまでの時間を制御する。 	○	—	◎
	RRC Inactivity タイマー (P46)	<ul style="list-style-type: none"> 通信中の端末が一定時間データのやり取りを行わなかった場合に、省電力待機状態へ移行させるまでの時間を制御する。 	○	—	◎
	Measurement Report Configuration (P47)	<ul style="list-style-type: none"> 端末が周囲の基地局の電波品質を計測・報告の挙動を規定し、その結果に基づく接続先基地局の切替えに影響を与える。 	◎	○	—

3-2 標準パラメータの詳細

以下では、各標準パラメータの詳細を解説する。

(1) 周波数利用効率/エラー耐性に関連する標準パラメータ



① MCS

製造現場では、人の移動や金属製設備による遮蔽などにより電波品質が刻々と変化する。MCS は、こうした電波品質の変化に対して、変調方式と符号化率の組合せにより、1 回の送信でどれだけ情報を詰め込むかを定めるパラメータであり、低遅延および高速大容量に関係する。

(ア) パラメータの役割・意味

MCS は変調方式と符号化率の 2 つの要素で構成される。変調方式(QPSK、16QAM、64QAM、256QAM など)とは電波に情報を載せる方法のことであり、符号化率とは送信データのうち伝送エラーの検出・訂正に充てるデータの割合のことである。

これら変調方式と符号化率の各組合せは MCS Index という番号で割り振られている。

MCS Index が高くなるほど、無線リソースあたりに送信可能な情報量が高くなる一方で、情報を多く詰め込むほど情報同士の区別がつきにくくなり、少しのノイズや干渉でもデータを正しく読み取れなくなりやすい。つまり、MCS Index が高いほど伝送効率は上がるがエラー耐性は下がるというトレードオフがあり、高い MCS Index を利用するには良好な電波品質が必要となる。

実際の通信では、MCS Index は固定ではなく、電波品質の変化に応じて自動的に切り替えられる。図 4 に示すように、基地局は電波品質を測るための参照信号(CSI-RS)を端末に送信し、端末はその受信結果を電波品質の報告(CQI report)として基地局へ通知する。基地局はこれらの情報をもとに、その時点の電波品質に応じて、適切な MCS Index を選択して送信に用いる。この仕組みは AMC(Adaptive Modulation and Coding : 適応変調・符号化)と呼ばれる。

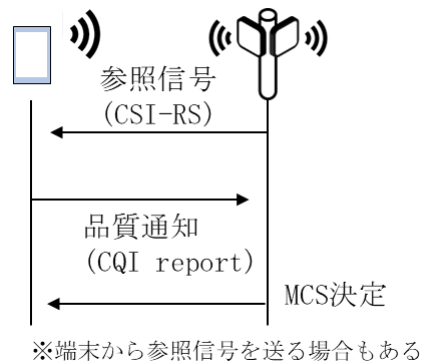


図 4 MCS 決定までの流れ

(イ) 5G/L5G の特徴との関係

MCS は伝送効率とエラー耐性のバランスを左右するため、低遅延と高速大容量の双方に関係する。図 5 の左に示すように、無線通信では、端末の移動や反射波の干渉などによるフェージングが発生する。電波品質が急に低下すると、電波品質の報告から実際の送信までの間に状況が変わり、選択された MCS Index がそのときの電波品質に対して高すぎる状態となることがある。この場合、伝送エラーが発生し、データの再送が必要となる。このため、図 5 右に示すように、再送によって遅延が増加する。

表 8 に 5G/L5G の特徴との関係を示す。

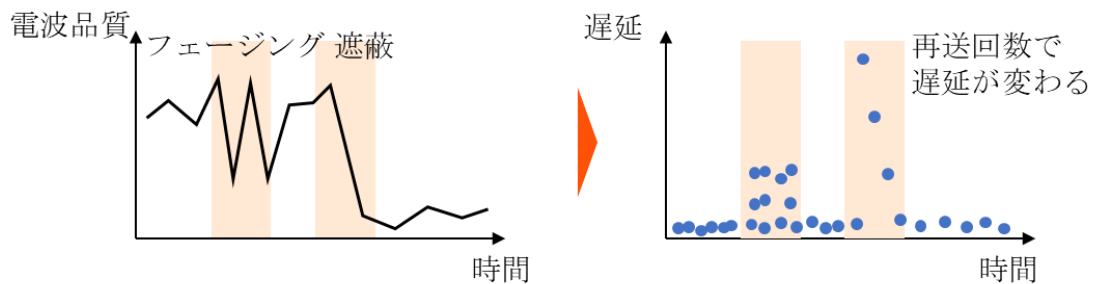


図 5 電波品質の変化と遅延時間の関係

表 8 MCS と 5G/L5G の特徴との関係

関係する特徴	説明
低遅延	<ul style="list-style-type: none"> MCS Index が電波品質に対して高すぎる場合、伝送エラーに伴う再送が発生し、遅延の増大やばらつきの原因となる。 一方、電波品質に見合った MCS Index が選択されている場合は、再送の発生が抑えられ、安定した遅延性能が得られる。

関係する特徴	説明
高速大容量	<ul style="list-style-type: none"> 電波品質が良好な場合は高い MCS Index が選択され、同じ無線リソースで送信できる情報量が増加する。 一方、電波品質が低下した時間帯では低い MCS Index が選択されるため、送信できる情報量は低下する。

(ウ)設定値の考え方

(ア)で述べたとおり、MCS Index は AMC により電波品質に応じて自動的に選択される。機器によっては、使用可能な MCS Index の範囲(上限値・下限値)をあらかじめ設定することで、自動選択の動作範囲を制御できる場合がある。低遅延、高速大容量のどちらを重視するかによって考え方が異なる。表 9 に MCS を設定する際の考え方を示す。

なお、MCS は MIMO 多重数とも密接に関係している。一般に、MIMO 多重数を最大数より減らすと受信時の SINR が改善し、より高い MCS Index が選択されやすくなる。加えて、ダイバーシティの効果により、端末の移動や反射波の干渉などによるフェージングにも強くなる。従って、MIMO 多重数の上限が設定可能な場合は、MCS と MIMO 多重数を合わせて調整することが有効である(詳細は②MIMO 多重数(P15)を参照)。

表 9 MCS を設定する際の考え方

重視する観点	設定値の考え方
低遅延 ¹¹	<ul style="list-style-type: none"> MCS Index の上限値を低めに設定する。 これにより、電波品質が良好な場合でも過度に高い MCS Index が選択されなくなり、エラー耐性を確保した状態で通信が行われる。 結果として、電波品質が変動した際の伝送エラーや再送の発生を抑え、遅延の増大を防ぎやすくなる。 ただし、上限を下げすぎると、電波品質が良好な場合でも高い送信効率を活用できなくなる。
高速大容量	<ul style="list-style-type: none"> MCS Index の上限値を高めに設定する。 これにより、電波品質が良好な場合に高い MCS Index が選択されやすくなり、伝送効率を向上させられる。 ただし、電波品質が変動する環境では伝送エラーや再送が増加し、遅延が大きくなる場合がある。

¹¹ 3GPP には 3 種類の MCS Index table(MCS Index と変調方式・符号化率の対応表)が用意されている。このうち table 3 は低遅延、高信頼通信向けの表となっており、利用可能な場合は MCS Index に上限値を設定する場合と同様の効果が期待できる。

② MIMO 多重数

製造現場で高精細な映像伝送や多数端末の同時通信を行う場合、限られた電波資源でいかに多くのデータを送るかが課題となる。

MIMO は、基地局と端末がそれぞれ複数のアンテナを使い、同一の周波数・時間リソースを用いてデータの送受信を行うことで、通信速度の向上や安定化を図る技術である。

MIMO 多重数は、これらのアンテナを「どのように使うか」を決めるパラメータである。MIMO 多重数により、使用するアンテナ数や、伝送方式(通信速度を高める「空間多重」や、信頼性を高める「ダイバーシティ」)の基本構成が決まる。このため、低遅延、高速大容量に関係する。

(ア)パラメータの役割・意味

図 6 に示すとおり、MIMO 多重数は、主に以下の 2 つの技術要素のどちらを中心に動作させるか、あるいはその組み合わせの上限を定義する役割を持つ。

・ 空間多重：通信速度向上

複数のアンテナを使って、異なるデータを同時に送信する方法である。異なるデータを複数のアンテナから同時に送信し、受信側で分離する。同時に送れるデータの本数を空間多重数(レイヤ数とも呼ぶ。以降、本節では「多重数」と表記する)と呼び、これが増えるほど、理論上の最大スループットが向上する。

ただし、多重数の上限は送信側・受信側のアンテナ数の少ない方で決まる。また、受信側では、アンテナごとに異なる経路で届く電波の違いを手がかりにデータを分離する。空間多重数は電波環境にも依存し、一般的に反射の多い環境の方が空間多重数を大きくしやすい。

・ ダイバーシティ：信頼性向上

同じデータを複数のアンテナで受信し、品質の良い信号を選んだり、複数の信号を合成したりして受信品質を高める方法である。工場内では、設備の移動や人の動きにより、フェージングが発生する。ダイバーシティは、このようなフェージングによる通信品質の低下を軽減し、安定した通信を維持する効果がある。

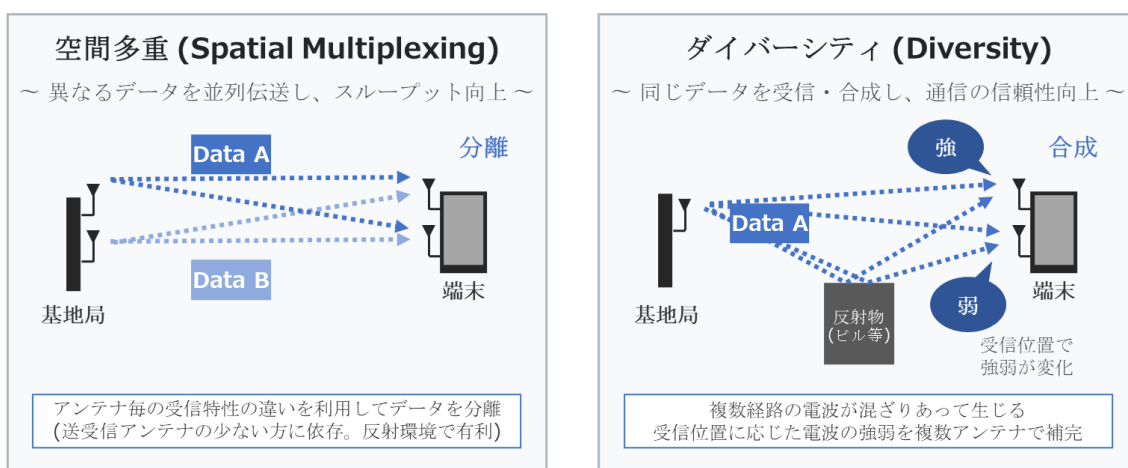


図 6 空間多重とダイバーシティの概要

(イ)5G/L5G の特徴との関係

MIMO 多重数は、空間多重による速度向上とダイバーシティによる信頼性向上のバランスを左右するため、低遅延と高速大容量の双方に関係する。表 10 に 5G/L5G の特徴との関係を示す。

表 10 MIMO 多重数と 5G/L5G の特徴との関係

関係する特徴	説明
低遅延	<ul style="list-style-type: none"> 多重数を減らし、ダイバーシティとして動作させると、信号品質が強化され、データ送信の成功率を高めることができる。これにより、再送の発生頻度を抑え、パケット到達時間のばらつきや遅延増大を防ぐ効果がある。
高速大容量	<ul style="list-style-type: none"> 多重数を増やして空間多重を行うと、複数のデータを同時に送信できるため、スループットが向上する。

(ウ)設定値の考え方

低遅延と高速大容量のどちらを重視するかによって、MIMO 多重数の設定方針は異なる。表 11 に MIMO 多重数を設定する際の考え方を示す。

なお、MIMO 多重数を変更すると 1 レイヤあたりの通信品質が変化するため、選択される MCS の傾向も変わる。このため、MIMO 多重数と合わせて、MCS の設定を検討する必要がある。

表 11 MIMO 多重数を設定する際の考え方

重視する観点	設定値の考え方
低遅延	<ul style="list-style-type: none"> 多重数の上限を低めに設定する。 (例：2×2MIMO 構成の場合、多重数を 1 に設定) AGV やクレーンなどの移動するものが多い環境や高速移動中は、高い多重数を維持するためのチャンネル推定が困難になりやすい。電波品質に見合わない過度な多重化を行うと伝送エラーが増加するため、最初から多重数を制限し、安定した接続と再送の抑制を優先する運用が有効である。
高速大容量	<ul style="list-style-type: none"> 基地局・端末が対応可能な最大の多重数に設定する。 (例：4×4MIMO 構成の場合、多重数を 4 に設定) 見通しの良い環境や、電波品質が良い場所では、空間多重効果を最大限に引き出し、スループットの最大化を狙う。

③ RLC mode (Radio Link Control mode)

製造現場では、カメラ映像のリアルタイム伝送のように「多少のパケットロスよりも遅れないこと」が重要な通信と、ファイル転送のように「遅れてもパケットロスがないこと」が重要な通信が混在する。

RLC mode は、無線区間でデータが正しく届かなかった場合に「再送するか、しないか」を決めるパラメータである。再送を行うかどうかにより、通信の信頼性と遅延のバランスが変わるため、低遅延、高速大容量に関係する。主に AM(Acknowledged Mode：確認応答モード)と UM(Unacknowledged Mode：非確認応答モード)の 2 種類から選択される。

(ア)パラメータの役割・意味

図 7 に示すとおり、RLC mode には、AM と UM の 2 種類のモードがあり、モードによって、無線区間でパケットロスが発生した際の振る舞いがそれぞれ異なる。

・ AM：信頼性確保

AM は、受信側が「正しく届いた (ACK)」か「届かなかった (NACK)」か、を送信側に通知し、パケットロスが発生した際はデータを再送するモードである。5G では、再送の仕組みが 2 段階あり、まず MAC レイヤの HARQ が高速に再送を試み、それでも回復できなかった場合に、RLC レイヤの再送 (AM) が追加で回復を行う。RLC 再送による遅延時間は設定値に依存するが、100 ミリ秒程度であることが多く、HARQ による再送よりも時間を要する。

・ UM：遅延抑制

UM は再送制御を行わないモードである。パケットロスが発生した場合は、そのデータを諦めて次の新しいデータの伝送を優先する。制御信号の付与が不要なためデータ伝送効率が高く、また、再送の待ち時間も発生しないため、処理遅延が発生しにくい特性を持つ。

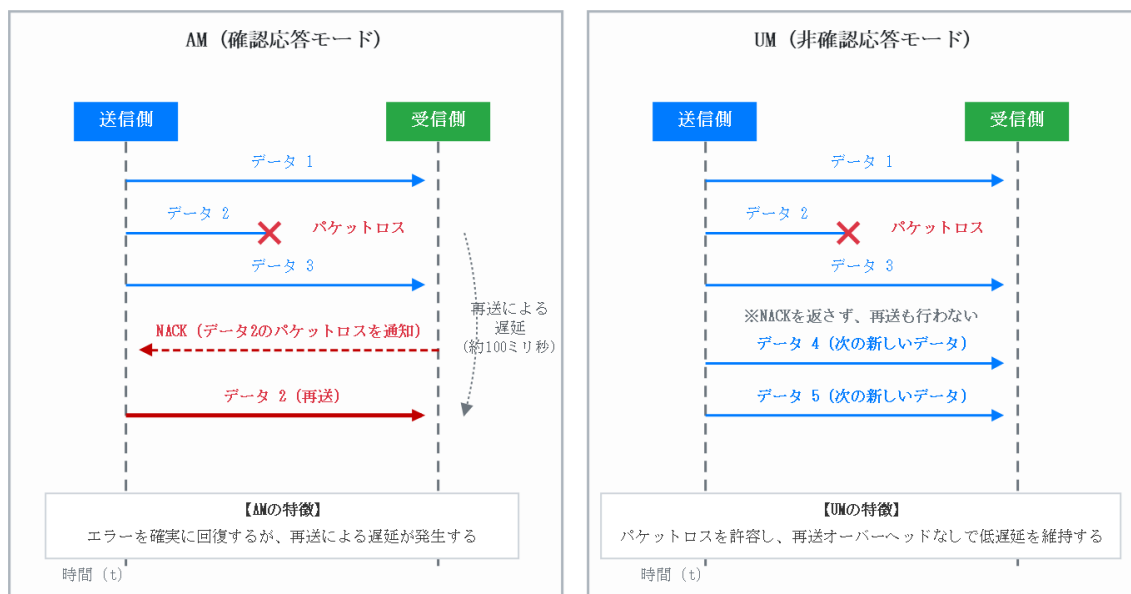


図 7 AM(確認応答モード)とUM(非確認応答モード)の概要

(イ) 5G/L5G の特徴との関係

RLC mode は、再送による信頼性確保と遅延抑制のどちらかを優先するかを決めるため、低遅延と高速大容量の双方に関係する。表 12 に 5G/L5G の特徴との関係を示す。

表 12 RLC mode と 5G/L5G の特徴との関係

関係する特徴	説明
低遅延	<ul style="list-style-type: none"> AM を使用した場合、無線品質の劣化時に RLC レイヤでの再送処理が繰り返されることがあり、再送のたびに遅延が発生するため、データ到達までの時間が変動し、ジッタの要因となる。 UM を使用した場合、再送が発生しないため、遅延の蓄積は起きないが、環境によってはパケットロスが発生する可能性がある。
高速大容量	<ul style="list-style-type: none"> AM を使用した場合、無線区間でのパケットロスは RLC レイヤの再送によって回復されるため、アプリケーションにはパケットロスなく届く。特に TCP を使用する通信では、無線区間のパケットロスによる送信速度の低下が避けられるため、スループットを維持しやすい。 UM を使用した場合、無線区間でのパケットロスがそのまま上位プロトコルに伝わる。TCP を使用するプロトコルでは、パケットロスを検知すると、「ネットワークが混雑している」と判断し、送信速度を落とす性質があるため、スループットが大きく低下する要因となる。

(ウ) 設定値の考え方

アプリケーションが求める要求性能に合わせて RLC mode を選択することが必要である。表 13 に RLC mode を設定する際の考え方を示す。なお、(ア)で述べたとおり、5G の再送は RLC レイヤと MAC レイヤの 2 段階がある。低遅延を重視する場合は、HARQ の設定も合わせて検討する必要がある。HARQ の詳細は④ HARQ Configuration(P20)を参照いただきたい。

表 13 RLC mode を設定する際の考え方

重視する観点	設定値の考え方
低遅延	<ul style="list-style-type: none"> UM を選択する方針とする。カメラ映像や音声通話、ロボットのリアルタイム制御など、データの完全性よりもリアルタイム性を優先するアプリケーション(一般に UDP プロトコルを使用)が該当する。 多少のパケットロスによるノイズよりも、再送待ちによる映像の停止や操作の遅れを回避することを優先する。 ただし、UM ではパケットロスが発生しても回復されないため、パケットロスが許容できないアプリケーションには適さない。

重視する観点	設定値の考え方
高速大容量	<ul style="list-style-type: none"> AM を選択する方針とする。TCP プロトコルを使用する一般的なデータ通信が該当する。 無線区間でのパケットロスを RLC レイヤで修復することで、上位アプリケーションへの影響を最小限に抑え、安定した通信速度とデータ整合性を確保する。

④ HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request) Configuration

製造現場では、人やモノの移動や反射波の影響で一時的にデータが正しく届かないことがある。

HARQ は、無線区間でデータが正しく届かなかった場合に、素早く再送を行う仕組みである。HARQ による再送では、受信に失敗したデータを破棄せずに保持し、再送データと合わせて復号するため、単純な再送よりも高い確率でデータを復元できる。HARQ Configuration は、この再送の有無や最大回数を決めるパラメータであり、低遅延、高速大容量に関係する。

(ア)パラメータの役割・意味

通常の再送制御 (ARQ) では、誤りが検出されたデータは即座に破棄され、再送データの到着を待つのみとなる。一方、図 8 に示す通り、HARQ では受信に失敗したデータを破棄せず、バッファに保持する。これにより、再送されたデータと合わせて復号を行うことで、通常の再送よりも高い確率でデータを復元できる。一般的には、再送回数が多いほど誤り訂正能力が向上するため、電波品質が低い環境でもデータを届けられる可能性が高まる。5G の再送には HARQ と RLC 再送の 2 段階がある (詳細は 3-2(1)③RLC mode (P17) 参照)。HARQ は RLC 再送に先立って高速に再送を行い (再送 1 回あたり数ミリ秒程度)、HARQ で回復できなかった場合にのみ RLC 再送 (100 ミリ秒程度) が動作する。

HARQ の再送を繰り返すことで、電波品質が低い環境でもデータを届けられる可能性が高まる。この点は MCS を低く設定した場合と似た効果があるため、MCS の設定 (P12) と合わせて HARQ Configuration の設定を検討することが望ましい。

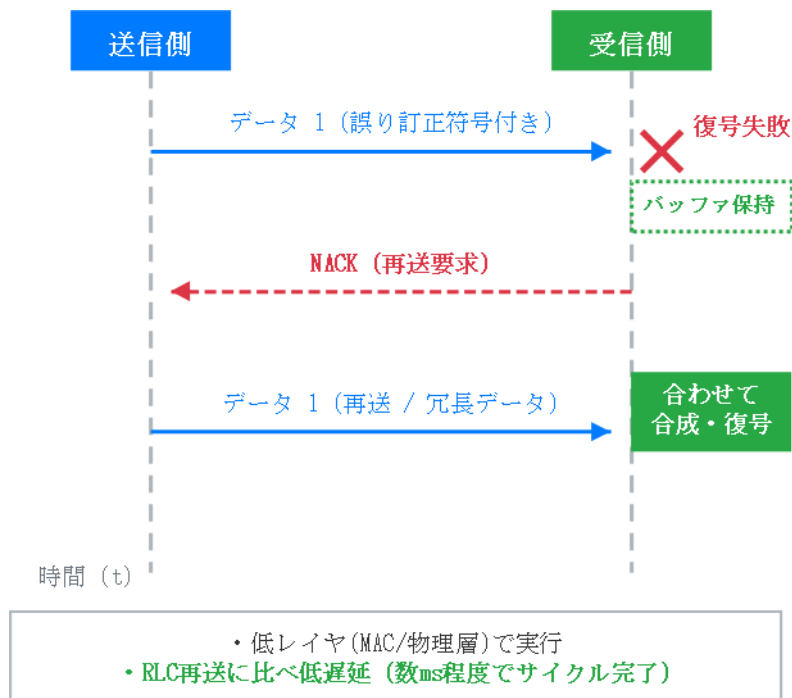


図 8 HARQ 再送の概要

(イ) 5G/L5G の特徴との関係

HARQ Configuration は、再送によるデータ復元の確実性と再送に伴う遅延のバランスを左右するため、低遅延と高速大容量の双方に関係する。表 14 に 5G/L5G の特徴との関係を示す。

表 14 HARQ Configuration と 5G/L5G の特徴との関係

関係する特徴	説明
低遅延	・ HARQ による再送では「受信失敗→NACK 通知→再送→合成→復号」というサイクルに数ミリ秒の時間を要し、再送が繰り返されるほど遅延が累積する。
高速大容量	・ HARQ の再送による復元能力があることで、システムは多少のエラー発生を許容しつつ、より高速な変調方式(高 MCS)を積極的に選択する運用が可能となる。変調方式が高速になれば一度に送れるデータ量が増えるため、結果として、再送を含めたトータルの平均スループットは向上する。

(ウ) 設定値の考え方

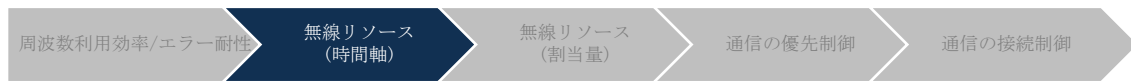
低遅延と高速大容量のどちらを重視するかによって設定方針は異なる。表 15 に HARQ

Configuration を設定する際の考え方を示す。

表 15 HARQ Configuration を設定する際の考え方

重視する観点	設定値の考え方
低遅延	<ul style="list-style-type: none"> 最大再送回数を少なく設定する。 低遅延性が重視されるリアルタイム通信では、再送を繰り返して遅れて届いたデータは、すでに新しいデータに置き換わっているため活用できないケースが多い。 このため、早い段階で「送信失敗」と判断し、次のデータの送信処理に移行させることで、システム全体の応答性を維持する。 ただし、再送回数を減らしすぎると、電波品質が低下した際にデータの復元ができず、パケットロスが増加する可能性がある。
高速大容量	<ul style="list-style-type: none"> 最大再送回数を標準的な上限値(4回など)に設定する。 特に電波環境が悪い場所では、再送と合成によって初めて復号可能になるケースが多い。一時的なスループット低下や遅延発生を許容し、アプリケーションでのタイムアウトを防ぐために、HARQによる再送によって確実にデータを届けることを最優先する。 ただし、再送回数が多いほど、最悪時の遅延が増大する点に注意が必要である。

(2) 無線リソース(時間軸)に関連する標準パラメータ



① スロット割当

製造現場でリアルタイム制御や映像伝送を行う場合、データを送信したいタイミングで確実に送信機会が得られるかが通信品質を左右する。

スロット割当は、時間方向の無線リソース(スロット)を端末にどのような周期で割り当てるかを定めるパラメータであり、主に低遅延に関係する。

(ア)パラメータの役割・意味

図 9 に示すように、5G では無線フレームがスロット単位に分割される。TDD(Time Division Duplexing)を利用する場合は、各スロットが DL、UL、または切替え用(S)としてあらかじめ定義される。

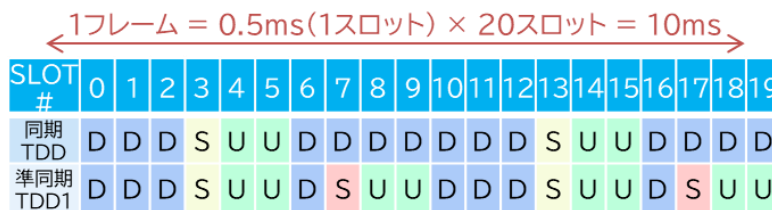


図 9 TDD スロット構成(同期、準同期)

現状、日本国内の L5G では TDD 方式が利用されるため、スロット割当は TDD のスロット構成の影響を大きく受ける。例えば、図 9 の同期のスロット構成の場合、UL 通信は最低でも 5 ミリ秒周期となる。

ただし、一般には図に示したスロット構成から想定される周期より大きな周期のスロット割当となることが多い。

特に UL 通信では、端末から基地局へ無線リソース割当要求を出してから実際の送信枠が割り当てられるため、設定上の TDD 周期よりも時間を要することが多い。

また、この要求を送信する制御用の無線リソースには制限があり、端末の同時接続数とスロット割当周期はトレードオフの関係にある。そのため、同時接続数が増えるほど各端末への割当周期は長くなり、設定上は 5 ミリ秒周期で UL スロットが存在する構成でも、実環境では数十ミリ秒に 1 回しか送信枠が割り当てられず、想定以上の通信遅延が生じるケースがある点に留意が必要である。

(イ)5G/L5Gの特徴との関係

スロット割当は、時間方向の無線リソースの割当周期を決めるため、主に低遅延に係る。表 16 にスロット割当と 5G/L5G の特徴との関係を示す。

表 16 スロット割当と 5G/L5G の特徴との関係

関係する特徴	説明
低遅延	<ul style="list-style-type: none"> ・ TDD 方式では、DL と UL が時間的に切り替わるため、双方向通信では切替え待ちが発生する。 ・ 特に UL は(ア)で述べた無線リソース割当要求の手順が必要なため、スロット構成上の周期よりも実際の遅延が大きくなることが多い。さらに、接続端末台数が増えると 1 台あたりの割当頻度が低下し、遅延がより大きくなる可能性がある。

(ウ)設定値の考え方

スロット割当は、多くの基地局では直接設定できないことが多い。また、基地局によっては、通信量や通信周期に応じてスロットの割当方法が変わることがある。ただし、以下の方法により間接的に遅延性能を改善できる場合がある。表 17 にスロット割当に関する設定値の考え方を示す。

表 17 スロット割当を設定する際の考え方

重視する観点	設定値の考え方
低遅延	<p>①アプリケーション側の調整</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ UL 方向の通信では、一定のトラフィックが継続している方が、基地局が端末に無線リソースを割り当てやすくなる場合がある。アプリケーションの通信周期を調整したり、バックグラウンドで定期的な通信が発生させたりすることで、無線リソース割当の応答性が改善する可能性がある。 <p>②TDD モードの変更(P27)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 後述する TDD モードの「準同期」設定への変更により、UL スロットの出現頻度を増やすことで遅延を低減できる場合がある。 <p>③SPS/Configured Grants の適用(P29)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ Configured Grants を適用すると、端末が無線リソース割当要求を行わなくても、事前に決められたタイミングで定期的にスロットが割り当てられるため、(ア)で述べた割当要求による遅延を回避でき、遅延低減に効果が期待できる。

② TTI(Transmission Time Interval)

数ミリ秒の遅延も許容できない通信では、1回の送信にかかる時間そのものを短くすることが求められる。

TTIは、無線区間でデータをひとかたまりとして送信する時間の基本単位である。TTIが短いほどデータ1回分の送信が早く完了し、再送時のリカバリも早くなるが、制御信号の割合が増えるため通信効率は下がる。基地局はこのTTI単位で端末への送信機会の割り当てや再送制御を行うため、低遅延と高速大容量の双方に関係する。

(ア)パラメータの役割・意味

図10に示すとおり、TTIは、データ発生から送信完了までの時間や、再送制御の応答時間を左右する。

・ TTIを短く設定した場合：

データ発生から送信完了までの時間が短縮され、再送が必要になった場合のリカバリも早くなるため、即応性が高まる。一方で、TTIごとに制御信号を付与する必要があるため、短いTTIを連続させるとデータ本体以外の制御情報が占める割合(オーバーヘッド)が増加し、通信効率が低下する。

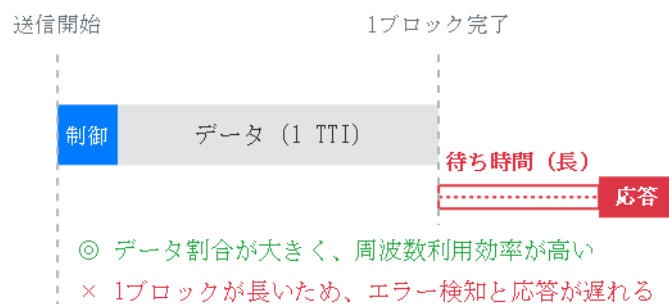
・ TTIを長く設定した場合：

制御信号の割合が下がり通信効率は高まるが、送信完了までの時間や再送時の遅延が大きくなる。

5GではTTIの長さを柔軟に変更でき、搬送波の周波数幅であるサブキャリア間隔(SubCarrier Spacing、以下「SCS」とする)に応じて決定される。SCSとそれに対応するスロット長・シンボル長の組み合わせはnumerologyとも呼ばれる。例えば、SCSが30kHzの場合、TTIが0.5ミリ秒となる。

さらに、通常の1スロット単位ではなく、スロットをさらに細かく分割した短い単位(ミニスロット)で送信することも可能である。ミニスロットを使うと、TDD方式で発生するDLとULの切替え期間の短い空き時間にもデータを割り当てることができるため、通信機会を増やし、送信待ち時間を短縮できる。

標準TTI (固定長 1ms 等)



短いTTI (可変長 / ミニロット化)



図 10 TTI の特徴

(イ)5G/L5G の特徴との関係

TTI は、1回の送信にかかる時間と制御信号のオーバーヘッドのバランスを左右するため、低遅延と高速大容量の双方に関係する。表 18 に 5G/L5G の特徴との関係を示す。

表 18 TTI と 5G/L5G の特徴との関係

関係する特徴	説明
低遅延	<ul style="list-style-type: none"> TTI が短いほど、データ 1 回分の送信にかかる時間が短縮される。また、再送が必要になった場合のリカバリも早くなるため、最悪時の遅延も抑えられる。 一方、TTI が長い場合は、データの送信開始から完了までの時間が長くなり、再送時の遅延も増大する。
高速大容量	<ul style="list-style-type: none"> TTI が短いと TTI ごとに付与される制御信号の比率が高まり、データを運ぶための無線リソースが減少するため、最大スループットが低下する傾向がある。 一方、TTI が長い場合は制御信号の比率が下がるため、スループットが高くなる。

(ウ)設定値の考え方

5G では主に SCS の設定を通じて TTI 長が決まる。また、ミニスロットを利用することで、スロットよりもさらに短い TTI を構成することも可能である。表 19 に TTI を設定する際の考え方を示す。

ただし、日本国内の Sub-6GHz 帯 L5G では、現実的に選択できる TTI に制約がある。隣接する他事業者の基地局との干渉を避けるため、TDD モードを同期・準同期のいずれかに設定することが一般的であるが、SCS を標準から変更すると、この同期パターンから外れる(非同期モード)ため、干渉調整が困難になる。したがって、Sub-6GHz 帯では SCS : 30kHz(スロット長 0.5 ミリ秒)、ミリ波帯では SCS : 120kHz(スロット長 0.125 ミリ秒)での運用が現実的である。

表 19 TTI を設定する際の考え方

重視する観点	設定値の考え方
低遅延	<ul style="list-style-type: none">より広い SCS (30kHz や 60kHz など) を選択し、スロット長を短縮する方針とする。さらに厳しい遅延要件がある場合は、ミニスロットを有効化し、スロットよりも短い単位 (2・4・7 シンボル) で送信を行うことで遅延をさらに短縮できる。
高速大容量	<ul style="list-style-type: none">標準的な SCS (15kHz や 30kHz) を選択し、基本的には 1 スロット (14 シンボル) をフルに使用する標準的な TTI 長とする。制御情報のオーバーヘッドを抑えることで、電波環境が悪い場所での接続安定性や、最大スループットの確保を優先する。

③ TDD モード

製造現場では、カメラ映像の UL 通信のように、DL よりも UL の通信量が多いユースケースがある。

TDD モードは、自営基地局の DL/UL パターンを、隣接する他事業者の基地局と合わせるか(同期モード)、一部独自のパターンで動作させるか(準同期モード)を決めるパラメータである。DL と UL の比率を変えることで主に低遅延、高速大容量に関係する。

(ア)パラメータの役割・意味

図 11 に示すとおり、日本の L5G では同期モードと準同期モードのパターンが定義されている。同期モード・準同期モード以外の非同期モードは他事業者の基地局との干渉調整が難しくなるため、主に「同期」ないし「準同期」での運用の選択となる。

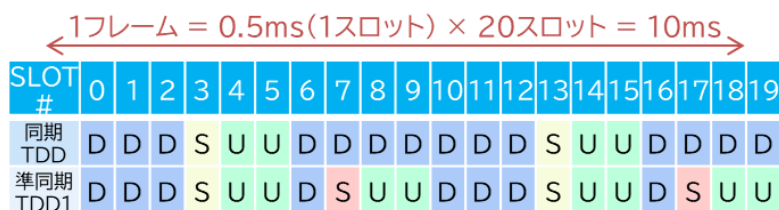


図 11 同期モードと準同期モードの運用の違い

・ **同期モード：DL 重視**

他事業者の基地局と同じ TDD パターン(DL/UL 比率)およびタイミングで動作するモードである。全ての基地局が同時に DL、同時に UL を行うため、基地局間での干渉が最小限に抑えられる。DL スロットの比率が高く、DL 重視の構成となる。

・ **準同期モード：UL 重視**

フレームの開始タイミングは他事業者の基地局と合わせつつ、同期モードの一部の DL スロットを UL スロットに置き換えたパターンで動作するモードである。他局との干渉を抑えながら、UL の比率を増やすことができるため、UL を重視する構成に適している。

・ **非同期モード**

5G の仕様上は図 11 以外の非同期モードでの運用も原理上は可能である。ただし、隣接する基地局間の干渉が大きくなるため、実運用では選択されないことが多い。

(イ) 5G/L5G の特徴との関係

TDD モードは、DL と UL の比率を左右するため、低遅延と高速大容量の双方に関係する。表 20 に 5G/L5G の特徴との関係を示す。

表 20 TDD モードと 5G/L5G の特徴との関係

関係する特徴	説明
低遅延	<ul style="list-style-type: none"> ・ 同期モードでは、UL スロットの出現頻度が少ないため、端末が UL データを送信したいタイミングで送信できず、次の UL スロットまでの待ち時間が発生しやすい。この待ち時間がそのまま通信の遅延に繋がる。 ・ 準同期モードでは UL スロットの比率が増えるため、この待ち時間が短縮され、遅延が改善する可能性がある。 ・ ただし、スロット割当の節で前述したとおり、UL スロットが増加しても端末に割り当たる周期は UL スロットの間隔よりは長いこともある点、留意が必要である。

関係する特徴	説明
高速大容量	<ul style="list-style-type: none"> 同期モードは DL スロットの比率が高いため、DL 方向の大容量化に有利である。 一方、準同期モードは、切替えによる無線リソース損失はあるものの、UL スロットを連続して確保できるため、UL の大容量化に有利である。

(ウ)設定値の考え方

設置場所の電波環境(近隣にキャリア 5G や他事業者の基地局が存在するか)と、アプリケーションが求める UL/DL 方向の通信性能に基づいて決定する。表 21 に TDD モードを設定する際の考え方を示す。

表 21 TDD モードを設定する際の考え方

重視する観点	設定値の考え方
低遅延(特に UL 方向)	<ul style="list-style-type: none"> 準同期モードを選択する。 UL スロットが増えることから UL 方向の通信機会が増加し、遅延が改善する可能性がある。
高速大容量 (DL 重視)	<ul style="list-style-type: none"> 同期モードを選択する。 DL スロットの比率が高く、他事業者の基地局との干渉も最小限に抑えられるため、最も安定した動作が期待できる。 一般的なオフィス利用や動画視聴など、DL 方向の通信が主体の用途に適している。
高速大容量 (UL 重視)	<ul style="list-style-type: none"> 準同期モードを選択する。 工場内で多数の高精細カメラ映像を基地局に送信する場合など、UL 方向の通信容量が不可欠なケースではこちらを選択する。

④ SPS(Semi-Persistent Scheduling)/Configured Grants

通常、無線通信ではデータが発生するたびに端末が基地局に無線リソース割当要求を行い、許可を受けてから送信を行う(これをダイナミックスケジューリングと呼ぶ)。

産業用ロボットの制御信号のように、一定の周期でデータが発生する通信では、毎回無線リソース割当要求が発生し、この手順自体が遅延の原因となる。

SPS/Configured Grants は、この手順を省略し、あらかじめ決められた周期で固定的に無線リソースを予約・割り当てておく制御機能、およびそのパラメータである。

(ア)パラメータの役割・意味

DL 方向の制御を SPS、UL 方向の制御を Configured Grants と呼ぶ。

- ・ **SPS : DL 方向の無線リソース割当の制御**

通常のダイナミックスケジューリングでは、基地局は DL 方向のデータ送信のたびに無線リソース割当を決定する。SPS を有効にすると、基地局が端末に対して DL 方向の無線リソースを周期的に割り当てるため、毎回の割当判断が不要になる。これにより、周期的に発生するデータを一定のタイミングで端末に送信でき、ジッタを抑えることが可能となる。

- ・ **Configured Grants : UL 方向の無線リソース割当の制御**

通常のダイナミックスケジューリングでは、端末がデータを送信する際、まず基地局へスケジューリング要求(SR)を送り、基地局からの送信許可(UL Grant)を受信するという手順が必須となる。Configured Grants を有効にすると、この「スケジューリング要求から送信許可」の手順が省略される。端末はデータが発生した際、あらかじめ予約された無線リソースを使って即座に送信を開始できるため、無線リソース割当要求に伴う待ち時間がなくなり、遅延時間を短縮できる。

(イ)5G/L5G の特徴との関係

SPS/Configured Grants は、スケジューリング遅延の排除と無線リソース利用効率のバランスを左右するため、低遅延と高速大容量の双方に関係する。表 22 に 5G/L5G の特徴との関係を示す。

表 22 SPS/Configured Grants と 5G/L5G の特徴との関係

関係する特徴	説明
低遅延	<ul style="list-style-type: none"> ・ ダイナミックスケジューリングでは、スケジューリング要求から送信許可までの往復に数ミリ秒の遅延が発生する。SPS/Configured Grants を有効にすると、この手順が省略されるため、遅延を短縮できる。

関係する特徴	説明
高速大容量	<ul style="list-style-type: none"> SPS/Configured Grants は、実際のデータ発生有無に関わらず、無線リソースを固定的に予約し続ける。 そのため、データ送信がない期間は予約した無線リソースが使われずに空き状態となり、システム全体の無線リソース利用効率が低下する。 トラフィック量の変動する通信においては、必要な時だけ動的に無線リソースを割り当てるダイナミックスケジューリングの方が効率的であり、スループットを確保しやすい。

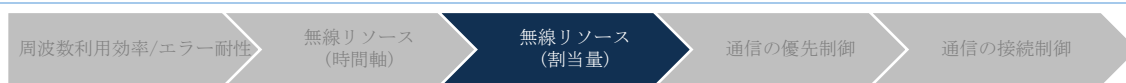
(ウ)設定値の考え方

SPS/Configured Grants は、アプリケーションのトラフィック特性に応じて有効/無効を選択する。表 23 に SPS/Configured Grants を設定する際の考え方を示す。

表 23 SPS/Configured Grants を設定する際の考え方

重視する観点	設定値の考え方
低遅延（周期的なトラフィックの場合）	<ul style="list-style-type: none"> SPS/Configured Grants を「有効」にし、アプリケーションのパケット発生間隔に同期した周期を設定する。 これにより、産業用ロボットの制御信号など、一定の周期でデータが発生するシステムにおけるスケジューリング遅延を排除し、安定通信を実現する。 ただし、予約した周期と実際のデータ発生周期がずれると、無線リソースの空きや送信待ちが発生する可能性がある。
高速大容量（一般的なデータ通信の場合）	<ul style="list-style-type: none"> SPS/Configured Grants を「無効」とし、ダイナミックスケジューリングでの運用を基本とする。 データサイズが大きく変動するトラフィックに対し、固定的な無線リソース予約を行わず、その都度ネットワークの空き無線リソースを最大限割り当てることで、スループットを最大化する。 ただし、ダイナミックスケジューリングでは無線リソース割当要求の手順が毎回発生するため、周期的な通信に対しては遅延が増加する。

(3) 無線リソース(割当量)に関連する標準パラメータ



① RB(Resource Block)割当率

製造現場では、1 台の基地局に複数の AGV/AMR やカメラ、センサが同時に接続することが一般的である。

RB 割当率は、こうした複数の端末に対して、無線リソース(Resource Block、以下「RB」とする)をどのような比率で配分するかに関するパラメータであり、低遅延、高速大容量、多数同時接続に関係する。

(ア)パラメータの役割・意味

5G では、無線リソースを時間・周波数方向に細分化して各端末に割り当てる。時間方向の単位は前述の通りスロットと呼ばれ、周波数方向の単位は RB と呼ばれる。5G システムでは、スロット毎に各端末に割り当てる RB の数を決定する。

5G は複数の端末が無線リソースを共有する通信方式であるため、端末台数が増えれば 1 台あたりが利用できる無線リソースや送信機会は減少し、端末台数が減れば 1 台が利用できる無線リソースは増加する。一般的に、基地局は各端末に対して概ね公平に RB を配分する。

ただし、配分される RB の数が同じでも、1 つの RB で伝送できる情報量は電波品質に依存するため(MCS の節を参照(P12))、端末ごとのスループットは異なり、電波品質の悪い端末ほどスループットが低くなる傾向がある。なお、5G では端末ごとに独立して RB が配分されるため、電波品質が悪い端末が存在しても、他の端末のスループットに直接的な影響を与えにくい特徴がある。

(イ)5G/L5G の特徴との関係

RB 割当率は、端末間の無線リソース配分を左右するため、低遅延、高速大容量、多数同時接続のいずれにも関係する。表 24 に 5G/L5G の特徴との関係を示す。

表 24 RB 割当率と 5G/L5G の特徴との関係

関係する特徴	説明
低遅延	<ul style="list-style-type: none"> 端末台数が増えると、各端末への無線リソースの配分量が減り、基地局での順番待ちが発生しやすくなる。 特に、多数の端末が同時に送信要求を行う状況では、送信機会が回ってくるまでの時間が延び、その分だけ通信の遅延やジッタが増大する要因となる。

関係する特徴	説明
高速大容量	<ul style="list-style-type: none"> 1つの基地局の無線リソース量は一定であるため、端末台数が増えると1台あたりに配分されるRBが減少する。 RBの配分が減った分だけ一度に送れるデータ量も減るため、結果として、スループットが低下する。
多数同時接続	<ul style="list-style-type: none"> 端末台数が増えるほど、各端末へ配分されるRBが減少する。 さらに、端末台数が多い場合は、データ通信そのものだけでなく、基地局が端末を制御するための制御信号の割合が高まるため、データ通信に使える無線リソースが圧迫される。このため、多数の端末を接続する環境ではRB割当比率の管理が重要となる。

(ウ)設定値の考え方

RB 割当率は、多くの基地局では直接設定できないことが多い。ただし、以下の関連パラメータや機能を活用することで、間接的に無線リソース配分を調整できる場合がある。

まず、前提として、基地局は各端末にRBを概ね公平に配分するが、電波品質の悪い端末は同じRB数でもスループットが低くなる(MCSの節を参照(P12))。このため、想定する端末台数・電波環境で、各端末に必要なスループットが確保できるかを事前に確認することが基本的な考え方となる。また、UE-AMBR(P37)やGFBR(P39)等の指定端末に対するスループットを制御するパラメータもRB割当率に影響を与えるため、必要に応じて調整等を検討する必要がある。

表 25 RB 割当率を設定する際の考え方

重視する観点	設定値の考え方
低遅延	<ul style="list-style-type: none"> ・ 端末台数が増えると、1 台あたりの RB が減少し、送信データが基地局内で順番待ちの状態になることで遅延が発生する可能性がある。 ・ 特に、電波品質が悪い状況で必要スループットが確保できない可能性が高まるため、想定する端末台数にて必要量が確保できるか確認する。 ・ 対策として、UE-AMBR や QoS 機能を活用し、電波品質の良い端末に無線リソースが過度に集中しないよう調整することを検討する。 ・ GFBR が利用可能な場合は、遅延を許容できない通信フローに最低限の通信速度を保証することも有効である。ただし、GFBR で特定端末に無線リソースを優先的に確保すると、その分だけ他の端末に配分できる無線リソースが減少する点に留意が必要である。
高速大容量	<ul style="list-style-type: none"> ・ 想定する端末台数において、電波品質が低下した場合にも必要なスループットが確保できるか確認する。電波品質が悪い端末は同じ RB 数でもスループットが低くなるため、端末の設置場所や電波環境の改善(アンテナ配置の見直し等)も合わせて検討する。
多数同時接続	<ul style="list-style-type: none"> ・ 低遅延・高速大容量と同様、端末台数が増えた場合に必要スループットが確保できるか確認する。 ・ UE-AMBR や端末の QoS 機能の利用を検討し、各端末が必要量を超えて無線リソースを占有しないよう調整することで、多数の端末間で安定した通信品質を確保する。

② Session-AMBR (Aggregate Maximum Bit Rate)

製造現場で複数のアプリケーション(映像伝送、ファイル転送、Web 閲覧など)を同時に利用する場合、特定のアプリケーションが帯域を占有して他の通信に影響を与えることがある。

Session-AMBR は、端末と 5G ネットワーク間に確立される論理的な通信路(セッション)に対して、通信速度の上限値を設定するパラメータである。主に Non-GBR 通信に対して適用され、低遅延、高速大容量、多数同時接続に関係する。

(ア)パラメータの役割・意味

5G では、通信の種類に応じて「帯域保証あり(GBR: Guaranteed Bit Rate)」と「帯域保証なし(Non-GBR)」の 2 つの扱いがある。Web 閲覧やファイルダウンロードなど、一般的なデータ通信は Non-GBR 通信として扱われる。

図 12 に示すとおり、Session-AMBR は、これら Non-GBR 通信に対して、無線区間の品質がどれだけ良くても、この設定値を超える通信速度が出ないように基地局/コアネットワーク側で帯域制限をかけるための上限値として機能する。

なお、ここでいう「セッション」とは、端末と 5G ネットワーク間に確立される論理的な通信路のことである。1 つの端末で複数のセッションを持つことも可能であり、セッションごとに異なる Session-AMBR を設定できる。

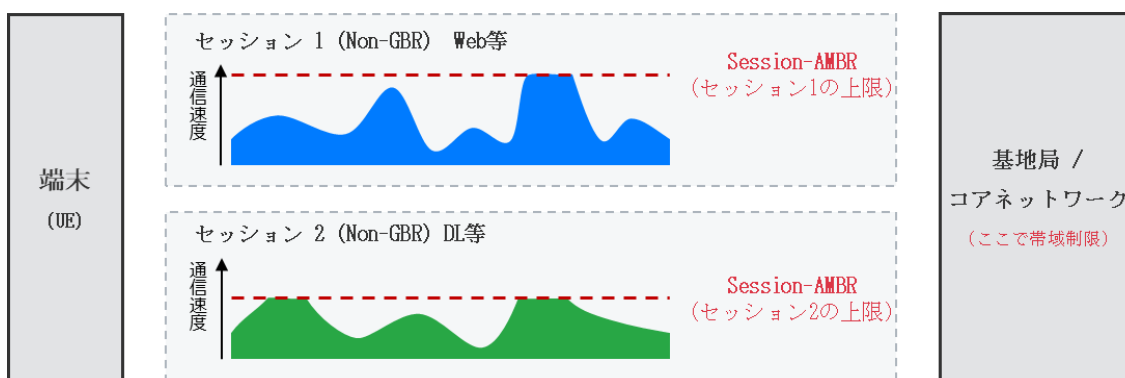


図 12 Session-AMBR を用いた通信速度上限の設定

(イ) 5G/L5G の特徴との関係

Session-AMBR は、セッション単位の通信速度の上限を規定するため、低遅延、高速大容量および多数同時接続に関係する。表 26 に 5G/L5G の特徴との関係を示す。

表 26 Session-AMBR と 5G/L5G の特徴との関係

関係する特徴	説明
低遅延	<ul style="list-style-type: none"> 直接的な遅延制御パラメータではないが、設定値がアプリケーションの実際の通信速度に対して小さすぎると遅延の原因となる。 アプリケーションが送信しようとするデータ量が Session-AMBR の上限を超えた場合、超過分のパケットはネットワーク内で待機させられるか破棄される。 待機されれば待ち時間が発生し、破棄されれば TCP の再送(RLC mode を参照(P17))が発生するため、いずれの場合も遅延につながる。
高速大容量	<ul style="list-style-type: none"> 無線区間のパラメータ(帯域幅やMIMOなど)を強化しても、Session-AMBR が低く設定されていると、スループットが頭打ちとなり、高速通信の恩恵を受けられない。

関係する特徴	説明
多数同時接続	<ul style="list-style-type: none"> 多数の端末が同時に通信する環境では、一部の端末が大量の無線リソースを消費すると、他の端末の無線リソースが圧迫される可能性がある。 Session-AMBR で端末ごとの速度上限を設定することで、無線リソースの偏りを防ぎ、多数の端末に対するサービス接続性を確保しやすくなる。

(ウ) 設定値の考え方

Session-AMBR は、セッション単位で速度上限を制御できるため、アプリケーションの要求性能に応じた柔軟な設定が可能である。表 27 に Session-AMBR を設定する際の考え方を示す。

表 27 Session-AMBR を設定する際の考え方

重視する観点	設定値の考え方
低遅延	<ul style="list-style-type: none"> アプリケーションが必要とするピーク時の通信速度以上の値を設定する。 設定値がアプリケーションの送信速度を下回ると、データの待機や破棄が発生し、遅延の原因となる。
高速大容量	<ul style="list-style-type: none"> 設定値を十分に大きな値(基地局や端末の最大通信速度以上)に設定する。 システム側で速度制限をかけず、その時の電波環境で出せる最高の速度を提供する設定であり、自営基地局などで、特定の産業用 PC の最大性能を引き出したい場合に適している。 なお、同一端末で複数のアプリケーションを同時に使用する場合、優先度の低い通信が帯域を圧迫する可能性がある。 例えば、高精細カメラ映像の送信と一般的なデータ通信を同一端末で行う場合、一般データ通信のセッションに Session-AMBR を低めに設定することで、カメラ映像のセッションにより多くの無線リソースを確保できる。

重視する観点	設定値の考え方
多数同時接続	<ul style="list-style-type: none"> 運用ポリシーに基づき、1セッションあたりの速度上限を設定する。 特に、動画閲覧など通信量の大きいサービスに対して Session-AMBR を低めに設定することで、一部の端末による帯域の占有を防ぎ、全体の通信混雑を抑える。 ただし、設定値を低くしすぎると個々の端末で必要なスループットが確保できなくなるため、アプリケーションの要件とのバランスを考慮する。

③ UE-AMBR

複数台の端末が同時に通信する製造現場では、特定の端末が帯域を過剰に消費し、他の端末の通信に影響を与えることがある。

UE-AMBR は、1台の端末が使用できる通信速度の合計上限値を定義するパラメータであり、低遅延、高速大容量および多数同時接続に関係する。Session-AMBR が「セッションごと」の制限であるのに対し、UE-AMBR は「端末ごと」の総量規制として機能する。1台の端末が複数のセッションを利用している場合でも、全セッションの通信速度の合計が UE-AMBR の設定値を超えないように制限される。

(ア)パラメータの役割・意味

UE-AMBR は、端末単位での通信速度制限としての役割を持つ。図 13 に示すとおり、基地局側でこの上限を超えないように、帯域制限が行われるため、特定の端末が無線リソースを過剰に占有することを防ぐことができる。

なお、UE-AMBR は Session-AMBR と同様に Non-GBR 通信に対して適用される。GBR 通信に対しては 3-2 (3)④GFBR, MFBR (P39) が対応する。

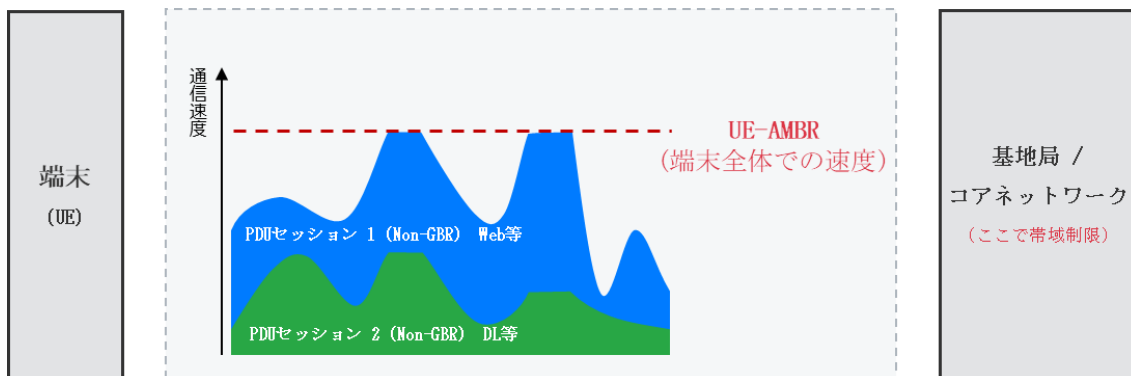


図 13 UE-AMBR を用いた通信速度上限の設定

(イ)5G/L5G の特徴との関係

UE-AMBR は、端末単位の通信速度上限を規定するため、低遅延、高速大容量および多数同時接続に関する。表 28 に 5G/L5G の特徴との関係を示す。

表 28 UE-AMBR と 5G/L5G の特徴との関係

関係する特徴	説明
低遅延	<ul style="list-style-type: none"> 設定値がアプリケーションの実際の通信速度に対して小さすぎると、遅延増大の直接的な原因となる。 アプリケーションのデータ発生量が UE-AMBR の上限を超えると、超過分のパケットは基地局内部で待機させられ、その待機時間が遅延として加算される。
高速大容量	<ul style="list-style-type: none"> UE-AMBR は、その端末が出せるスループットの上限となる。無線区間のパラメータ(帯域幅や MIMO)や端末性能がどれほど高くても、UE-AMBR が低く設定されていれば、速度はその値で頭打ちとなる。
多数同時接続	<ul style="list-style-type: none"> システム全体の帯域幅が限られている環境において、多数の端末を収容するための調整弁として機能する。UE-AMBR を適切に低く制限することで、特定の端末による帯域の独占を防ぎ、残りの帯域を他の多数の端末に分配することが可能となる。

(ウ)設定値の考え方

アプリケーションの通信要件と端末の収容数に応じて設定する。表 29 に UE-AMBR を設定する際の考え方を示す。

表 29 UE-AMBR を設定する際の考え方

重視する観点	設定値の考え方
低遅延	<ul style="list-style-type: none"> アプリケーションの実際の通信速度に対して余裕を持った値を設定する。設定値が実トラフィックに対して小さすぎると、データの待機が発生し遅延の原因となる。
高速大容量	<ul style="list-style-type: none"> 設定値を端末および基地局の最大スループット以上に設定する。 ネットワーク側で速度制限をかけず、その時の電波環境で出せる最高速度を端末に提供する設定である。 なお、一つの端末で通信要件の異なる複数のアプリケーションを利用する場合は、Session-AMBR の活用も検討するとよい。

重視する観点	設定値の考え方
多数同時接続	<ul style="list-style-type: none"> ・ 1台あたりの上限を必要最低限の値に制限する。 ・ 限られた無線リソースを多数の端末で公平に分け合う必要がある場合、各端末の上限を抑えることで、通信の混雑やパケットロスを防ぐ運用とする。

④ GFBR(Guaranteed Flow Bit Rate), MFBR(Maximum Flow Bit Rate)

製造現場では、ネットワークが混雑しても一定の通信速度を確保しなければならないアプリケーションが想定される。

GFBR, MFBR は、GBR 通信に対して適用されるパラメータであり、低遅延、高速大容量および多数同時接続に関する。GFBR はネットワークが最低限保証する通信速度、MFBR はその通信で許容される通信速度の上限値を定義する。これらは、個別のアプリケーションフロー(特定のアプリケーションの通信をひとまとまりとして扱う単位)に対して厳格な帯域保証・速度上限を適用できる。

(ア)パラメータの役割・意味

GFBR, MFBR は、通信中の帯域保証・制限値としての役割を持つ。

・ GFBR の役割：最低保証

GFBR は、通信中の帯域保証としての役割に加え、通信開始時の接続可否の判断基準としても用いられる。基地局は新規の接続要求があった際、現在の空き無線リソースで GFBR 分の帯域を確保できるかを計算し、確保可能であれば接続を許可し、不可能であれば接続を拒否する。これにより、一度接続が許可された通信は、ネットワークが混雑した場合でも GFBR 以上の通信速度が保証される。

・ MFBR の役割：速度上限

MFBR は、許可されたフローに対する速度の上限値として機能する。アプリケーションの通信量が一時的に急増して、MFBR を超えた場合、超過分のパケットは即座に破棄されるか、送信が遅らされるため、特定のフローが無線リソースを過剰に消費してシステム全体に影響を与えることを防ぐ。

なお、Non-GBR 通信に対する類似のパラメータとして 3-2(3)②Session-AMBR(P34)や 3-2(3)③UE-AMBR(P37)がある。

(イ)5G/L5G の特徴との関係

GFBR、MFBR は、個別フローに対する帯域保証と速度上限を規定するため、低遅延、高速大容量および多数同時接続に関する。表 30 に 5G/L5G の特徴との関係を示す。

表 30 GFBR、MFBR と 5G/L5G の特徴との関係

関係する特徴	説明
低遅延	<ul style="list-style-type: none"> GFBR によって帯域が予約されている場合、ネットワークが混雑してもそのフロー用の無線リソースは常に確保されている状態となる。 そのため、送信データが基地局内で待たされる事態が起きにくく、ジッタの少ない安定した低遅延通信を維持しやすい。
高速大容量	<ul style="list-style-type: none"> MFBR の設定値が、そのフローにおける通信速度の上限となる。 例えば、高精細映像の伝送を行う場合、MFBR を実際の映像のピーク速度よりも低く設定してしまうと、動きの激しいシーンなど一時的にデータ量が増加する場面でパケットが破棄され、ブロックノイズや映像停止の原因となる。
多数同時接続	<ul style="list-style-type: none"> GFBR の合計値は基地局全体の無線リソース量で上限が決まるため、接続可能な端末台数とトレードオフの関係にある。 高い GFBR を設定した端末を多数接続しようとする、無線リソースが不足し、新規の接続が拒否される場合がある。

(ウ)設定値の考え方

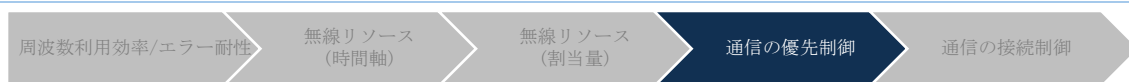
GFBR/MFBR は、アプリケーションの通信速度の変動パターン(常に一定か、場面によって変動するか)に基づいて設定する。表 31 に GFBR、MFBR を設定する際の考え方を示す。

表 31 GFBR、MFBR を設定する際の考え方

重視する観点	設定値の考え方
低遅延	<ul style="list-style-type: none"> GFBR と MFBR を同じ値に設定する。 音声データのように常に一定の速度で流れる通信の場合、保証値と上限値を一致させ、無線リソースの過不足ない予約を行うことで、帯域不足による処理遅延やパケットロスを防ぐ。
高速大容量	<ul style="list-style-type: none"> GFBR をアプリケーションの平均的なスループット、MFBR をピーク時のスループットに設定する。 可変ビットレートの高精細映像などに対し、最低限の品質を GFBR で保証しつつ、動きの激しいシーンでの一時的なトラフィック増大を MFBR まで許容し、大容量伝送を実現する。

重視する観点	設定値の考え方
多数同時接続	<ul style="list-style-type: none"> 1台あたりのGFBRを必要最小限の値に設定する。 これにより、限られた無線リソースの中で多数の端末に帯域保証を確保しやすくなり、新規接続の拒否を回避できる。MFBRについても、過大に設定すると一時的に他端末の無線リソースを圧迫する可能性があるため、アプリケーションのピーク速度に応じた必要な範囲にとどめる。

(4) 通信の優先制御に関連する標準パラメータ



① 5QI (5G QoS Identifier)

製造現場では、ロボットの制御信号のように遅延が許されない通信と、ログデータの送信のように多少遅れても問題ない通信が混在する。

5QIは、こうした通信の種類ごとに、どのような品質基準で処理すべきかを指定する識別番号である。5QIの番号を選ぶことで、そのデータの優先度、許容される遅延時間、許容されるパケットロス率といった品質特性がまとめて決まる仕組みとなっている。このため、低遅延、高速大容量、多数同時接続のいずれにも関係する。

(ア)パラメータの役割・意味

5QIは、基地局やコアネットワークが「このデータをどの程度優先して届けるか」を判断するための基準となる。5QIの番号ごとに、以下の品質特性があらかじめ定義されている。

- リソースタイプ：**
 GBR通信、Non-GBR通信、低遅延保証(Delay Critical GBR)通信のいずれか。
- データの優先度：**
 無線リソースが不足した際に、どのデータを優先して送るかの順位。
- 許容される遅延時間：**
 データが端末からネットワークの出口まで届くまでに許容される最大時間。
- 許容されるパケットロス率：**
 許容されるパケットロスの上限。

図 14 に示すとおり、基地局のスケジューラは、5QI の番号を参照して、優先度の高いデータには無線リソースを優先的に割り当て、優先度の低いデータは空き無線リソースがある時に処理する、といった制御を行う。

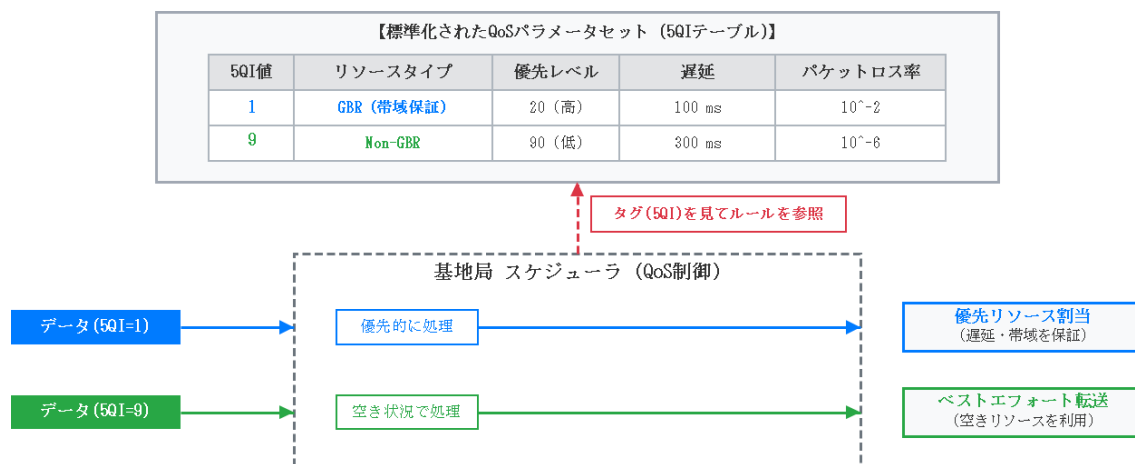


図 14 5QI 値と QoS パラメータセットの関係

(イ) 5G/L5G の特徴との関係

5QI は、データの優先度・許容遅延時間・許容パケットロス率といった品質特性をまとめて決定するため、低遅延、高速大容量および多数同時接続のいずれにも関係する。表 32 に 5G/L5G の特徴との関係を示す。

表 32 5QI と 5G/L5G の特徴との関係

関係する特徴	説明
低遅延	<ul style="list-style-type: none"> 許容遅延時間が短い 5QI を選択すると、基地局はそのデータを最優先で処理し、規定時間内に届くよう無線リソースを割り当てる。 一方、許容遅延時間が長い 5QI では、他のデータとの兼ね合いで処理が後回しになる場合がある。
高速大容量	<ul style="list-style-type: none"> 許容遅延時間が長い 5QI では、基地局がデータをまとめて効率よく送信しやすくなるため、無線リソースの利用効率を高めることができる。 一方、許容遅延時間が短い 5QI では即時処理が求められるため、無線リソース効率よりも即時性が優先される。

多数同時接続	<ul style="list-style-type: none"> 通信量が基地局の処理能力を超えた場合、優先度の高い 5QI のデータが優先的に維持され、優先度の低いデータは待機や破棄の対象となる。 5QI の優先度設計により、混雑時にどの通信を保護するかを制御できる。
--------	---

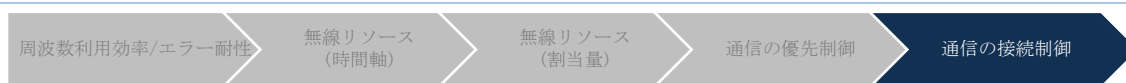
(ウ)設定値の考え方

アプリケーションの通信特性と、求められる品質要件に基づき、適切な 5QI 値を選択する。表 33 に 5QI を設定する際の考え方を示す。

表 33 5QI を設定する際の考え方

重視する観点	設定値の考え方
低遅延 (リアルタイム通信)	<ul style="list-style-type: none"> 低遅延保証(Delay Critical GBR)の 5QI の設定値(例：5QI 82, 83, 85)とする。 接続が許可された通信に対しては、データ発生時に即座に無線リソースが割り当てられるため、産業用制御信号や生産ラインのリアルタイム通信など、確実な低遅延が必要な用途に適している。 ただし、GBR 系の 5QI では、基地局が接続開始時に無線リソースを確保できるかを判断し、確保可能な場合のみ接続を許可する仕組みとなっている。このため、同時に接続できる端末台数に上限が生じる。接続が必要な端末台数と、1 台あたりに保証する帯域(GFBR)の組み合わせが、基地局の無線リソース総量を超えないことを事前に確認する必要がある。
高速大容量	<ul style="list-style-type: none"> Non-GBR の 5QI の設定値(例：5QI 8, 9)とする。 帯域を固定で確保しない分、ネットワークの空き無線リソースを最大限に活用した瞬間的な高速通信が可能となる。 大容量ファイルの転送や高精細映像のダウンロードなど、ピーク時の通信速度を引き上げたい用途に適している。
多数同時接続	<ul style="list-style-type: none"> Non-GBR の 5QI の設定値(例：5QI 8, 9)とする。 GBR 系の 5QI のような帯域確保に伴う同時接続数の制限がないため、多数同時接続の要件に適しており、システム全体の無線リソースを効率的に利用できる。 ただし、混雑時には通信速度の低下や遅延の増大が発生する可能性がある。

(5) 通信の接続制御に関連する標準パラメータ



① RRC (Radio Resource Control) 切断タイマー

製造現場のセンサのように、データを断続的に送信する端末では、通信していない間の端末の状態管理が遅延時間や接続可能台数に影響を与える。

RRC 切断タイマーは、端末が通信を終えた後、どのくらいの時間で「通信可能な状態」から「待機状態」に移行するかを制御するパラメータであり、低遅延、多数同時接続に関係する。

(ア) パラメータの役割・意味

5G では、端末と基地局の間の無線接続状態を RRC という仕組みで管理しており、端末は主に以下の 2 つの状態のいずれかにある。

- ・ **RRC Connected : 通信可能状態**

端末が基地局と通信可能な状態。データの送受信をすぐに開始できる。

- ・ **RRC Idle : 待機状態(通信不可)**

端末が基地局との接続を切った省電力状態。再び通信するには、接続を確立し直す処理(再接続処理)が必要となり、その分だけ通信開始が遅れる。

端末は常に RRC Connected (通信可能状態) で維持されるのではなく、電力や通信管理用の制御リソースに対する制約があるために、一定時間通信が行われない場合(タイマー値を超えた場合)には RRC Idle へ遷移する。RRC 切断タイマーのタイマー値が大きいほど端末は RRC Connected を長く維持し、小さいほど早く RRC Idle へ移行する。

図 15 に示すように、通信が発生すると端末は RRC Connected へ移行し、通信が終了した後は RRC 切断タイマーが満了するまで Connected 状態を維持し、満了時に RRC Idle へ移行する。

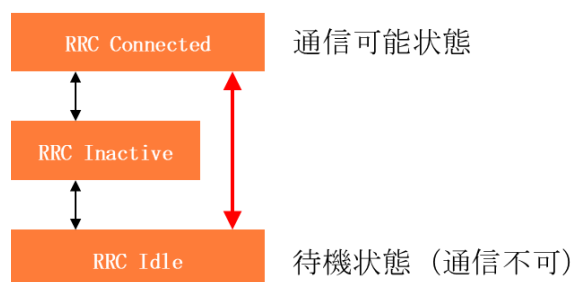


図 15 RRC の 3 つの状態と遷移関係

(イ)5G/L5G の特徴との関係

RRC 切断タイマーは、端末が RRC Connected 状態を維持する時間を左右するため、低遅延と多数同時接続の双方に関係する。表 34 に 5G/L5G の特徴との関係を示す。

表 34 RRC 切断タイマーと 5G/L5G の特徴との関係

関係する特徴	説明
低遅延	<ul style="list-style-type: none"> 図 16 に示すとおり、RRC Idle へ移行した端末が再び通信を行うには、RRC Connected へ戻るための再接続処理が必要となり、その間はデータの送受信を開始できないため、初送時に遅延が発生する。 このため、通信が断続的に発生する通信形態では、RRC Idle への遷移が挟まるたびに初送遅延が生じやすくなり、通信の応答時間やそのばらつきに影響を与える。
多数同時接続	<ul style="list-style-type: none"> RRC Connected の端末が多いほど、基地局はそれぞれの端末を管理するために制御リソースを消費する。 通信していない端末が RRC Connected に長く留まると、その分だけ制御リソースが占有される。 一方、RRC Idle へ遷移する端末が増えると、基地局が RRC Connected として管理する端末台数は減少し、限られた制御リソースの中で、より多くの端末を効率よく収容しやすくなる。

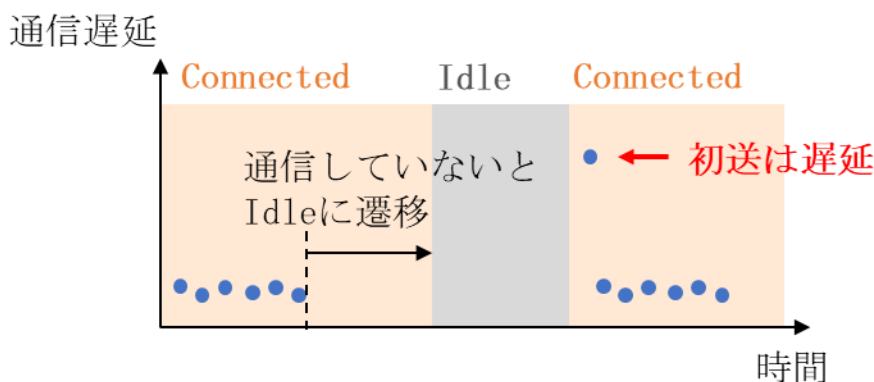


図 16 RRC Idle 状態からの復帰に伴う初送遅延(イメージ)

(ウ)設定値の考え方

機器やシステム構成によっては、複数のタイマー値があらかじめ用意され、運用方針に応じて選択・設定される場合がある。表 35 に RRC 切断タイマーのタイマー値を設定する際の

考え方を示す。

表 35 RRC 切断タイマーを設定する際の考え方

重視する観点	設定値の考え方
低遅延	<ul style="list-style-type: none"> 通信が断続的に発生し、通信間隔が比較的短い端末については、タイマー値を通信間隔よりも長く設定する。 これにより、端末が RRC Idle へ遷移する前に次の通信が発生しやすくなり、RRC 再接続処理を挟まずに通信を再開できるため、初送時の遅延を抑えやすくなる。
多数同時接続	<ul style="list-style-type: none"> 基地局に収容可能な RRC Connected の端末台数には上限が存在するため、端末台数が多い環境ではタイマー値を短めに設定する。 端末台数が多い環境で、一部の端末に低遅延が求められる場合は、タイマー値は短めに設定しつつ、低遅延が必要な端末において、設定したタイマー値以下の周期で通信を発生させる。これにより、低遅延が必要な端末は RRC Connected を維持して即座に通信を開始でき、それ以外の端末はタイマー満了後に RRC Idle へ移行するため、全体の同時接続数を上限内に収めやすくなる。

② RRC Inactivity タイマー

RRC 切断タイマーと同様に、端末の状態管理に関わるパラメータである。

RRC Inactivity タイマーは、通信中の端末が一定時間データのやり取りを行わなかった場合に、「RRC Inactive (省電力待機状態)」へ移行させるまでの時間を制御するパラメータであり、低遅延、多数同時接続に関係する。なお、現状の 5G/L5G において、この省電力待機状態はあまり利用されていないが、参考情報として記載する。

(ア)パラメータの役割・意味

図 15 に示したように、RRC Inactive は、RRC Connected と前述した RRC Idle の中間状態としての役割を持つ。

・ RRC Inactive : 省電力待機状態

RRC Inactive は RRC Idle と同様に基地局との接続は確立していないが、基地局・5G コア側には端末情報を保持したままとなる。このため、RRC Idle に比べて接続し直すための手続きが少なく、より短い時間で通信を再開できる。

(イ)5G/L5G の特徴との関係

RRC Inactivity タイマーの基本的な性質は RRC 切断タイマーと同様であるため、5G/L5G の特徴との関係も表 34 に示した内容と同様となる。

(ウ)設定値の考え方

設定値の考え方についても表 35 に示した内容と同様である。なお、RRC Inactive は RRC Idle に比べて、RRC Connected への復帰が早いことから、同時多接続性と低遅延性を両立したい場合は、RRC Inactive の利用を検討するとよい。

③ Measurement Report Configuration

広い工場敷地内を AGV/AMR が移動する場合、複数の基地局の間を端末が行き来することになる。このとき、接続先の基地局を適切なタイミングで切り替えられないと、通信の途切れや速度低下の原因となる。

5G では、端末が接続中の基地局と周囲の基地局の電波品質を定期的に計測し、隣接する基地局の電波品質の方が良くなった場合に、その計測結果を基地局に報告する仕組みがある。この報告を Measurement Report と呼び、基地局はこの報告をもとに、接続先をより電波品質の良い基地局に切り替える動作(ハンドオーバー)を実施するかどうかが判断する。

Measurement Report Configuration はその挙動を規定するためのパラメータである。

(ア)パラメータの役割・意味

端末は定期的に接続中の基地局の電波と隣接基地局の電波を計測している。図 17 に示すとおり、接続中の基地局の電波品質より隣接基地局の電波品質が強くなった場合に、両者の電波品質情報を含む Measurement Report を基地局に送信する。基地局は Measurement Report に基づきハンドオーバーの実施を判断する。

Measurement Report Configuration は、以下の 2 つの値で構成される。

- ・ オフセット :

周囲の基地局の電波品質が、接続中の基地局よりもどれだけ上回ったらハンドオーバーの検討を開始するかの基準値

- ・ ヒステリシス :

オフセットに加えて設ける追加の余裕幅。電波品質が境界付近で細かく変動した際に、ハンドオーバーが頻繁に行ったり来たりすること (Ping-Pong) を防ぐための値

周囲の基地局の電波品質値が接続中の基地局の電波品質値よりも、オフセットとヒステ

リシスの和だけ大きくなった場合に Measurement Report が送信される。

上記の通り、ハンドオーバーは Measurement Report を契機とするため、本パラメータの調整により、ハンドオーバーの遅れや Ping-Pong を抑制することができる。

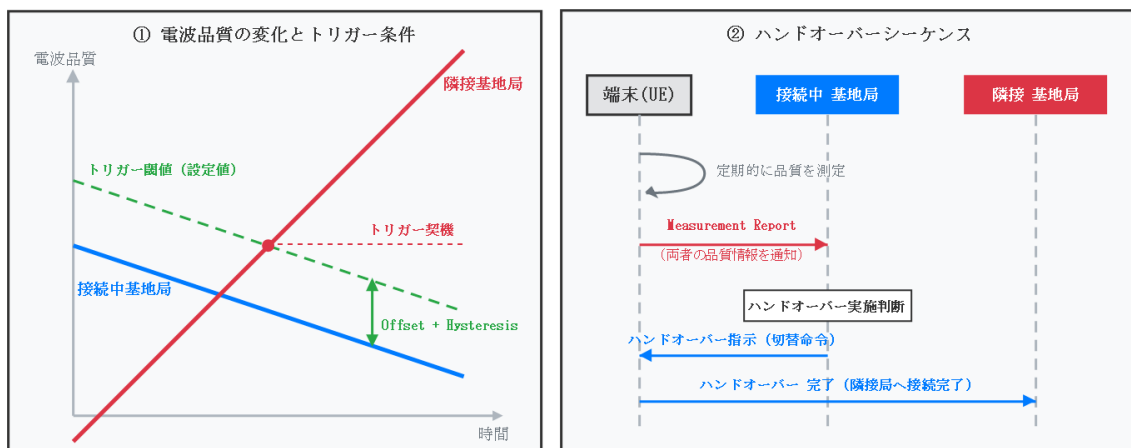


図 17 電波品質の変化とトリガー条件、ハンドオーバーシーケンス

(イ) 5G/L5G の特徴との関係

Measurement Report Configuration は、ハンドオーバーの発生タイミングを左右するため、低遅延と高速大容量の双方に関係する。表 36 に 5G/L5G の特徴との関係を示す。

表 36 Measurement Report Configuration と 5G/L5G の特徴との関係

関係する特徴	説明
低遅延	<ul style="list-style-type: none"> ハンドオーバーが発生すると、接続先の切替え処理中は通信が一時的に中断するため、一般的に 100 ミリ秒程度の遅延が発生する。ハンドオーバーの発生回数が多いほど、この遅延が繰り返し発生する。
高速大容量	<ul style="list-style-type: none"> 端末のスループットは電波品質に大きく依存する。 電波品質の良い基地局に素早くハンドオーバーすることで、良好な通信速度を維持しやすくなる。 一方、Ping-Pong が発生すると、ハンドオーバー中の通信中断が頻繁に起きるため、通信速度が低下する要因となる。

(ウ) 設定値の考え方

オフセットとヒステリシスの設定により、ハンドオーバーの発生頻度を調整する。低遅延と高速大容量では方針が異なる。表 37 に設定値の考え方を示す。

表 37 Measurement Report Configuration を設定する際の考え方

重視する観点	設定値の考え方
低遅延	<ul style="list-style-type: none"> ・ オフセットやヒステリシスを大きめの設定にする。ハンドオーバーの発生条件を厳しくし、不要なハンドオーバーを抑制することで、切替えに伴う遅延を抑制する。 ・ ただし、オフセットやヒステリシスを大きくしすぎると、電波品質の悪い基地局に長く接続し続けることになり、電波品質の低下による再送の増加で結果的に遅延が増大する可能性がある。 ・ このため、Ping-Pong が発生しない範囲で、なるべく小さい値を探り、そこに一定の余裕を加えた設定とするのがよい。
高速大容量	<ul style="list-style-type: none"> ・ オフセットやヒステリシスを小さめに設定する。電波品質の良好な基地局に素早くハンドオーバーすることで、良好なスループットを保つことが目的である。 ・ ただし、小さくしすぎると Ping-Pong が発生し、ハンドオーバー中の通信中断が頻繁に起きて通信速度が低下するため、Ping-Pong が発生しない範囲にとどめる。

3-3 標準パラメータを設定・調整するにあたっての留意点

本節では、標準パラメータを設定・調整するにあたっての留意点を示す。製造現場において最終的に求められるのは、5G/L5G 通信機器単体の性能向上そのものではなく、各アプリケーションが期待どおりに動作することである。標準パラメータの設定・調整は、その実現に向けた一つの手段である。

アプリケーションの動作は標準パラメータだけで決まるものではない。図 18 に映像伝送を例としたシステム全体の構成を示す。映像伝送の場合、工場内の固定カメラで取得した映像データは、端末から基地局 (RU・DU・CU) およびコアネットワーク (5GC) を経由して、監視室の映像表示ソフトに届く。

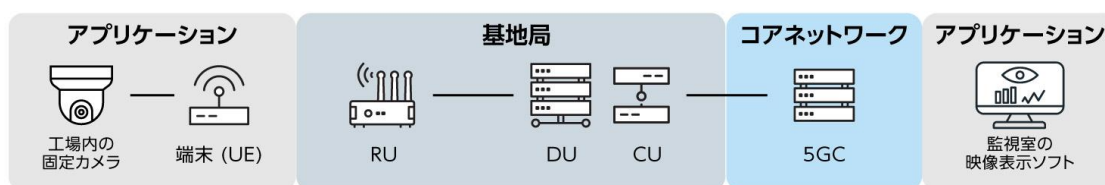


図 18 アプリケーション動作に関わるシステム全体の構成例 (映像伝送の場合)¹²

アプリケーションの動作は、この経路全体の状態に左右される。そのため、例えば監視室の映像表示に遅延やコマ落ちが発生した場合、標準パラメータの設定や調整を行うだけでなく、カメラ側の映像コーデックやフレームレートを変更する、送信タイミングを調整するなど、アプリケーションの調整やネットワーク全体の調整を視野に入れた対応を検討いただきたい。調整可能な要素としては、例えば以下のようなものが挙げられる。

表 38 標準パラメータ以外で調整可能な要素の例

調整項目	調整例
通信プロトコル	TCP から UDP への変更 等。
送信タイミング・頻度	送信間隔の拡大、送信タイミングの分散 等。
送信するデータ量	映像の場合はコーデックの変更、解像度・フレームレートの低減 等。
帯域制御	QoS 機能を持つ端末またはスイッチによる帯域制限 等。

¹² 出典：NEDO「製造現場における無線通信技術の導入ガイドライン ～無線活用シーン・ユースケースに応じた導入・運用のポイント～(2024)」をもとに作成

4 ケース別 5G/L5G システムの挙動把握およびそれを踏まえた設定方法

本章では、具体的なユースケースを想定し、標準パラメータの状態をどのように可視化し、どのように調整・対応するかについての手順を示す。

4-1 本章の対象範囲と前提条件

本章で示す手順・設定方法は、5G/L5G システム上で単一のユースケースを運用することを前提としている。

製造現場においては、「AGV・AMR の操作・映像取得と工場内の設備や備品及び資産管理(部品管理・在庫管理・資産管理)を同一の 5G/L5G システム上で同時に運用したい」といったように、複数の異なるユースケースを 1 つの 5G/L5G システムで実現させたいというニーズが想定される。

しかしながら、複数ユースケースの混在環境では、各ユースケースの通信要件が相互に影響し合い、標準パラメータの最適な設定がユースケースの組み合わせや機器台数・環境等によって大きく変わる。

そのため、ガイドラインとして正確な指針を示すことは難しく、本章では複数ユースケース混在時の個別具体的な設定方法は対象範囲外としている。

ただし、混在運用を検討する読者に向けて、以下の考え方を示す。

表 39 複数ユースケース混在時の考え方

ユースケースの性質	考え方
安全性や生産継続に直結する重要度の高いユースケース	<ul style="list-style-type: none">他のユースケースとの共用は慎重に検討する必要がある。高い信頼性が求められるユースケースでは専用の利用も検討いただきたい。
多少の遅延や帯域変動が許容されるユースケース	<ul style="list-style-type: none">コスト削減の観点から、複数のユースケースを同一の 5G/L5G システム上にまとめて運用することも選択肢となる。

多少の遅延や帯域変動が許容されるユースケース同士を同一システムにまとめて運用する場合は、以下の流れで検討を進めることが考えられる。ただし、通信要件が大きく異なるユースケース同士を混在させる場合や、以下の流れで判断が難しい場合は、通信機器提供事業者やシステム構築事業者等と協議のうえ設計することを推奨する。

表 40 遅延や帯域変動が許容されるユースケースを
同一システムにまとめる場合の検討の流れ

ステップ	内容
①要求性能の整理と収容可否の見積もり	<ul style="list-style-type: none"> ・ 混在を検討する各ユースケースについて、要求性能(スループット、遅延、接続台数等)を確認する。各ユースケースの要求性能については巻末資料(P129)を参照いただきたい。 ・ そのうえで、すべてのユースケースが同時稼働した場合に、5G/L5G システム全体として必要なスループットや遅延の要件を満たせるかを見積もる。 ・ 特に、ピーク時の負荷が重なった際に帯域や無線リソースが競合し、いずれかのユースケースの要求性能を満たせなくなる可能性がないかを確認しておくことが重要である。 ・ なお、同一システムへの収容を検討する際は、要求性能が類似したユースケース同士をまとめることを基本とする。 ・ 例えば、低遅延を重視するユースケースと、多数同時接続を重視するユースケースでは、無線リソースの配分方針等が異なるため、同一システムでの共存は設計の複雑化やいずれかの性能劣化を招きやすい。
②模擬トラフィックによる実測	<ul style="list-style-type: none"> ・ ①の見積もりに加え、実際の運用を想定した測定を行うことが望ましい。 ・ シミュレーションや机上の計算だけでは、工場環境の影響(遮蔽物、反射、干渉等)や、アプリケーションごとのトラフィック特性を十分に反映できない場合がある。 ・ 模擬的なアプリケーショントラフィックを生成し、複数ユースケースの同時稼働を再現したうえで、5G/L5G システム全体のスループットおよび遅延を実測することで、各ユースケースの要求性能が実際に収容可能かどうかをより確実に判断できる。
③標準パラメータ・環境設定等の調整	<ul style="list-style-type: none"> ・ 上記の見積もりおよび実測の結果を踏まえ、基地局と端末間の距離や遮蔽物の有無といった工場環境も考慮したうえで、標準パラメータ等の調整を行う。 ・ なお、通信要件が大きく異なるユースケース同士を混在させる場合や、上記の流れで判断が難しい場合は、通信機器事業者やシステム構築事業者等と協議のうえ設計することを推奨する。

4-2 本章で取り上げるケース

製造現場での導入ニーズの高さ、通信要件の特徴、ユースケースの分類を踏まえ、本章で取り上げるケースを選定した。

表 41 本章で取り上げるケース

カテゴリー	具体的なケース
機器の制御に関連するケース	4-3 節 AGV/AMR の操作・映像取得 (P54)
	4-4 節 機械に関する動作制御・遠隔操作 (P74)
設備・資産管理に関連するケース	4-5 節 工場内の設備や備品及び資産管理(部品管理・在庫管理・資産管理) (P89)
安全管理・品質に関連するケース	4-6 節 カメラ映像を用いた現場モニタリング(稼働監視) (P103)

なお、本章で取り上げていないケースについても、通信要件が類似する場合は、本章の内容を参考にできる。以下に各ケースに関連するユースケース例を示す。

一部のユースケース例が複数のケースに記載されているが、これはケースごとに着目する通信上の課題や標準パラメータが異なるためである。自社のユースケースが複数のケースに該当する場合は、それぞれのケースを参照し、関連する標準パラメータを併せて確認いただきたい。

表 42 各ケースに関連するユースケース例

ケース	関連するユースケース例
4-3 節 AGV/AMR の操作・映像取得	<ul style="list-style-type: none"> パトロールの自動化(移動ロボット、遠隔ロボット) ドローン+温度センサによる工場環境計測(移動ロボット等) 動画像による異常検知
4-4 節 機械に関する動作制御・遠隔操作	<ul style="list-style-type: none"> パトロールの自動化(移動ロボット、遠隔ロボット) ロボット等によるプラント内点検
4-5 節 工場内の設備や備品及び資産管理(部品管理・在庫管理・資産管理)	<ul style="list-style-type: none"> 製品数カウント等 検査データの取得・書き込み(映像含む)
4-6 節 カメラ映像を用いた現場モニタリング(稼働監視)	<ul style="list-style-type: none"> 動画像による異常検知 カメラを用いた不法侵入者の検知(進入禁止エリア検知含む)

4-3 機器の制御に関連するケース：AGV/AMR の操作・映像取得

本ケースでは、以下の標準パラメータを扱う。各パラメータの詳細は3章の該当箇所を参照いただきたい。

表 43 4-3 節で扱う標準パラメータ

標準パラメータ	概要	3章の参照先
RB 割当率	<ul style="list-style-type: none"> 同一基地局に接続する複数端末への無線リソースの配分比率を決める。 	3-2(3)① (P32)
UE-AMBR	<ul style="list-style-type: none"> 1台の端末が使用できる通信速度の合計上限値を定義する。 	3-2(3)③ (P37)

(1) 概要・前提



① 想定する状況

自動車部品の製造工場で、複数台の AGV/AMR を L5G で無線接続し、搭載カメラの映像を中央監視システムへリアルタイム伝送する運用を計画した。AGV/AMR は工場内の様々な場所を移動するため、基地局からの距離や高層ラック、機械設備などによる遮蔽の影響を受け、電波環境(Reference Signal Received Power: RSRP)が刻々と変化する。

初期検証として1台の AGV/AMR でテスト運用を実施した結果、L5G の通信可能範囲内のどの位置でも必要なスループットが確保でき、映像伝送に問題がないと判断された。この成功を受けて、敷地全体への展開(複数台稼働)を計画したが、本番運用開始後に以下の問題が発生した。

- 基地局から遠い位置や遮蔽物が多い位置を走行している AGV/AMR を中心に、映像の途切れ、コマ落ち、ブロックノイズが発生する。
- 事前テストでは問題がなかったはずの AGV/AMR が、複数台導入後に不安定になる。

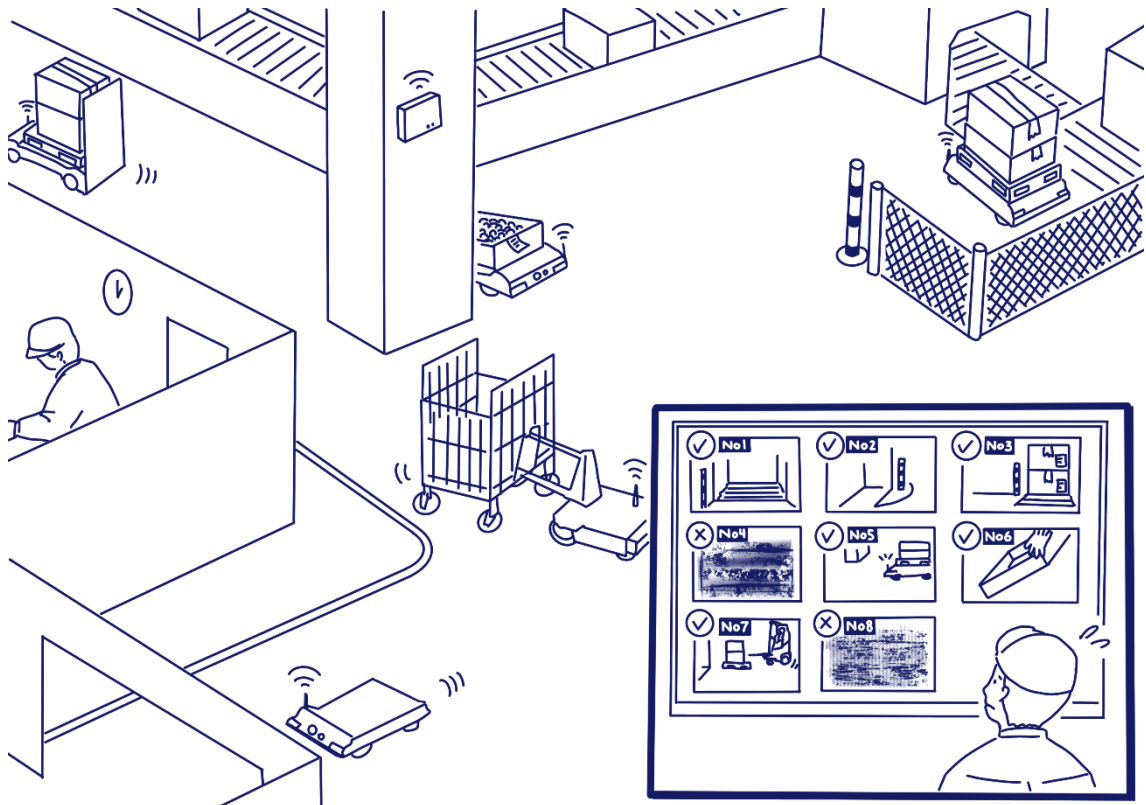


図 19 4-3 節で想定する状況(イメージ)

② 運用の構成

本ケースのシステム構成を以下に示す。複数台の AGV/AMR が工場敷地内(屋内・屋外含む)を自律走行し、搭載カメラの映像を中央監視システムへ L5G で伝送する構成である。必要に応じて、中央監視システムから遠隔で映像確認・走行指示を行う。

AGV/AMR には 5G 対応の産業用通信モジュールを搭載し、自律走行用の各種センサ(LiDAR、IMU、カメラ等)を備える。基地局は Sub-6GHz 帯の L5G を工場内の複数箇所に設置し、工場全体をカバーする。

表 44 本ケース (AGV/AMR の操作・映像取得) で想定する運用の構成

機器	台数・配置	内容
AGV/AMR	10 台規模 工場敷地内を移動	<ul style="list-style-type: none"> 搭載カメラの高精細映像 (FullHD 30fps、約 5Mbps/台) を中央監視システムへアップロード
中央監視システム	1 台	<ul style="list-style-type: none"> 停止指示・経路変更指示等を AGV/AMR へ送信 複数 AGV/AMR の映像をリアルタイム表示・記録、位置情報・稼働状況のダッシュボード表示

③ 通信への要求

各通信の要件を以下に示す。AGV/AMR から中央監視システムへの映像アップロードが通信量の大部分を占めている。複数台の AGV/AMR が同時に稼働しても、安定した映像品質と制御応答性が維持されていること、電波環境の変化が激しい環境でも、極端な通信品質の劣化が発生しないことが求められる。

表 45 本ケース (AGV/AMR の操作・映像取得) における通信への要求

通信	方向	要求性能
映像伝送 (AGV/AMR → 中央監視システム)	UL	<ul style="list-style-type: none">スループット : 3 ~ 8Mbps/ 台 (FullHD 30fps H. 264/H. 265)遅延 : 150 ~ 500 ミリ秒以内 (リアルタイム監視が可能であれば許容可能)ジッタ : 許容範囲内 (再生時に著しい途切れやコマ落ちが発生しないこと)パケットロス : 許容範囲内 (ブロックノイズが視認性に影響を与えないこと)
制御・指示 (中央監視システム → AGV/AMR)	DL	<ul style="list-style-type: none">遅延 : 100 ミリ秒以内 (停止指示や経路変更指示など、応答性が重要)帯域 : 1 台あたり数 kbps ~ 数十 kbps (低頻度、小データサイズ)

(2) 現場において発生しやすい現象



① 事前評価

本格導入の前にテスト環境を構築し、L5G の通信性能を評価した。テストでは、1 台の AGV/AMR を運用し、敷地内の様々な場所での映像伝送を確認した。スループットは期待値（例：5Mbps）を上回り、映像は滑らかに伝送され、ブロックノイズもなく、遅延も許容範囲内に収まっていた。この結果を受け、複数台への展開を決定した。

② 運用規模拡大時に発生した現象

複数台（10 台規模）の運用を開始したところ、以下の 2 つの現象が発生した。

現象 1：電波環境の悪い AGV/AMR で映像品質が著しく劣化

単体運用では問題なかった AGV/AMR のうち、基地局から遠い位置（RSRP が低い位置）や金属製設備による遮蔽がある位置を走行中の AGV/AMR において、他の AGV/AMR が通信を開始すると映像品質が急激に劣化した。一方、電波環境が良い AGV/AMR（例：RSRP が約-85dBm）のスループットは比較的維持される傾向にあった。

表 46 現象 1 - 電波環境の悪い AGV/AMR における映像品質劣化の影響

影響箇所	具体的な影響
障害物検知	・ 映像品質の劣化により、搭載カメラによる障害物検知の精度が低下し、AGV/AMR の予期せぬ停止や衝突のリスクが増加。
遠隔監視	・ 中央監視システムにおいて、一部 AGV/AMR の映像が乱れることで、オペレータによる状況把握が困難になり、迅速な対応を妨げる。
原因特定	・ 特定の AGV/AMR のみが不安定になるため、故障か電波環境要因か、あるいは全体的なシステム設計の問題か、原因特定が難しい。

現象 2：電波環境の良い AGV/AMR も全体の負荷増加でスループットが低下

全体の AGV/AMR の通信負荷が許容量を超えると、電波環境の良い AGV/AMR も含め映像スループットが全体的に低下する現象が確認された。この現象は、基地局のカatalogスペックより低い水準の負荷であっても発生した。

表 47 現象 2 - 全体負荷増加による映像スループット低下の影響

影響箇所	具体的な影響
作業効率	・ 全体の映像品質が低下し、複数の AGV/AMR の同時監視が困難になることで、遠隔での作業指示やライン状況の確認に支障が生じる。

(3) 影響を与えていると考えられる標準パラメータ



(2)の現象を踏まえ、状況を確認した結果、以下の事実が確認できた。

- ・ AGV/AMR 個体では単体運用時に正常動作する。
- ・ 電波品質(RSRP)が低い場所で問題が顕在化しやすく、該当する AGV/AMR のスループットが低下する。
- ・ 電波環境の悪い端末は、電波環境の良い端末が通信を開始するとさらにスループットが低下する傾向がある。

これらの傾向から、端末台数の増加と電波環境の差に起因するスループットの低下が主因と考えられる。以下に、影響を与えていると考えられる標準パラメータを示す。

① 影響を与えていると考えられる標準パラメータ：RB 割当率

(ア)理由

5G/L5G では、基地局が持つ RB を複数の端末で共有する。基地局は各端末に対して RB を概ね公平に配分するが、電波環境の良い端末と悪い端末では、同じ RB で得られるスループットが異なる。電波環境の良い端末は高い MCS が選択されるため少ない RB で高スループットを実現できるが、電波環境の悪い端末は低い MCS しか使えないため、同じスループットを得るには多くの RB を必要とする。(RB 割当率の詳細は 3-2(3)①RB 割当率(P32)を参照。)

端末台数が増えると 1 台あたりに配分される RB 数が減少するが、この影響は電波環境の悪い端末ほど大きい。電波環境の良い端末は少ない RB でも必要なスループットを確保しやすいのに対し、電波環境の悪い端末は RB の減少によって必要なスループットを確保できなくなり、映像品質の劣化が発生する。

表 48 RB 割当率による映像品質劣化の要因整理

要因	内容
電波環境によるRBあたりのスループットの差	<ul style="list-style-type: none"> 電波環境が良い端末は効率の高い変調方式(高い MCS)を使えるため、少ないRBで高スループットを実現できる。 一方、電波環境が悪い端末は効率の低い変調方式(低い MCS)しか使えないため、同じスループットを得るのに多くのRBを消費する。 例えば、電波が強い端末が10Mbpsを伝送するのに全体の5%のRBで済む場合でも、電波が弱い端末は同じ10Mbpsの伝送に10%以上のRBを必要とする場合がある。
端末台数の増加による1台あたりのRBの減少	<ul style="list-style-type: none"> 端末ごとに電波品質が異なる場合、基地局のスケジューリングポリシー(公平性やシステム全体のスループット最大化など)に基づきRBが配分される。 端末台数が増加すると1台あたりに配分されるRB数が減少し、特に電波環境の悪い端末では必要なスループットを確保できなくなる場合がある。

(イ)簡易的な確認方法

RB 割当率の影響が疑われる場合、以下の方法で簡易的に切り分けができる。

表 49 RB 割当率の影響が疑われる場合の簡易的な確認方法

確認方法	内容	結果の見方
場所による映像品質の違い確認	<ul style="list-style-type: none"> 複数台を同時に稼働させた状態で、基地局に近いAGV/AMRと遠いAGV/AMRの映像品質を目視で比較する。 	<ul style="list-style-type: none"> 基地局から遠いAGV/AMRの映像品質のみが明らかに劣化している場合、電波環境によるRBあたりのスループットの差が原因と考えられる。
稼働台数を減らした場合の映像品質の確認	<ul style="list-style-type: none"> AGV/AMRの稼働台数を段階的に減らし(例:10台→5台→1台)、各段階で電波環境の悪いAGV/AMRの映像品質を目視で確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 台数を減らしたことで映像の途切れやブロックノイズが改善すれば、端末台数の増加に伴う1台あたりのRB数の減少が原因と考えられる。

(4) 標準パラメータの状況を把握する方法



(3)で挙げた標準パラメータ(RB 割当率)が実際に映像品質劣化の原因となっているかを確認するため、以下の測定を行う。なお、RB 割当率は基地局の管理ツール等から直接確認することが難しい場合が多い。そのため、各端末のRSRPとスループットの関係を測定することで、RB 割当率に起因するスループット低下の有無を間接的に把握する。

① 測定：端末台数・RSRPとスループットの関係の確認

(ア)目的

複数AGV/AMRが同時に映像をアップロードする環境下で、各AGV/AMRのRSRPとそれに対応する実効スループットの変化を把握する。特に、電波環境の悪いAGV/AMRが、他のAGV/AMRの通信によってどの程度影響を受けるかを確認する。

(イ)手順

測定には、実際のカメラ映像の代わりに、同程度のデータ量を連続的に送信する方法を用いる。これは、映像の内容に左右されずに通信の性能だけを安定して測定するためである。具体的には、iperfなどのネットワーク性能測定ツールを使用し、各AGV/AMRから1台あたり5～8Mbps程度のデータをUL方向に連続送信する。

表 50 端末台数・RSRPとスループットの関係の測定手順

ステップ	内容
1	<ul style="list-style-type: none"> 複数のAGV/AMRを用意し、基地局からの距離や遮蔽物の有無によって電波環境が異なるように配置する。 全てのAGV/AMRのRSRP値を定期的に記録できる環境を構築する。
2	<ul style="list-style-type: none"> 各AGV/AMRから中央監視システムへ、映像トラフィックを模擬したULのUDPトラフィック(iperf等、1台あたり5～8Mbps程度)を送信できるよう準備する。 可能であれば、基地局の管理ツールを用いて、各AGV/AMRに割り当てられているRB割当率やMCSも取得できるようにする。
3	<ul style="list-style-type: none"> 全端末の電波環境が均一な状態で、AGV/AMRの台数を段階的に増やしながら(例：30秒ごとに1台ずつ追加)、各AGV/AMRのスループット、遅延等を記録する。 端末台数の増加に伴い1台あたりのRBが減少し、スループットが低下するかを確認する。

ステップ	内容
4	<ul style="list-style-type: none"> 特定の AGV/AMR に電波吸収シート (EMC シート等) を装着して RSRP を低下させた状態で、ステップ 3 と同様に台数を段階的に増やしながら測定する。 電波環境の悪い端末が、台数増加に伴いどの程度スループットの影響を受けるかを確認する。

(ウ) 得られる情報

この測定から以下の情報が得られる。

- ・ 端末台数の増加に伴う 1 台あたりの RB 数の減少が、各 AGV/AMR のスループットに与える影響の程度
- ・ 複数台接続時のシステム全体の総スループットの変化
- ・ 電波環境の差に伴う RB あたりのスループットの違いが、各 AGV/AMR のスループットに与える影響の程度
- ・ 電波環境が一定以上悪化した場合に、正常な映像伝送が維持できなくなる閾値の目安

(エ) 結果の例

(イ) の試験手順のステップ 3、4 それぞれで取得した結果から、以下のパターンで判断できる。

表 51 ステップ 3 の測定結果パターンと見方

結果のパターン	結果の見方
各端末のスループットが均一	<ul style="list-style-type: none"> 電波環境が均一な場合、台数が増加しても各端末に配分された RB で必要なスループットが得られている。この場合、スループット低下の原因は台数増加単体ではなく、電波環境の差にある可能性が高い。ステップ 4 に進む。
台数増加に伴い全体的にスループットが低下	<ul style="list-style-type: none"> 基地局の RB が全体として不足しており、台数増加自体がスループット低下の原因となっている可能性が高い。

表 52 ステップ 4 の測定結果パターンと見方

結果のパターン	結果の見方
電波環境を大幅に悪化させた場合に、スループットが映像伝送に必要な帯域を下回る	<ul style="list-style-type: none"> 電波環境の悪い端末は、台数増加によるRBの減少の影響を大きく受け、必要なスループットを確保できなくなる。 この閾値を把握した上で、(5)の対応方法を検討する。

以下にステップ 3、4 の結果例を示す。図 20(a)はステップ 3(EMC シートなし)の測定結果であり、全ての端末は 10Mbps のスループットを出すことができ、10 台同時に通信している状態で総スループット 100Mbps が得られていることが確認できる(表 51 の 1 つ目のパターンに該当)。

一方、図 20(b)はステップ 4(端末 01 に EMC シート 2 枚を装着)の測定結果である。図 21 に示すとおり、シートなしで端末 01 の RSRP が約-85dBm、シート 2 枚で約-115dBm となり、他の端末(端末 02~端末 10)の RSRP はいずれの条件でも-80dBm 付近で安定している。

図 20(b)では、端末 01 は単独では 10Mbps が得られるものの、他の端末が通信に参加してくるとスループットが減少し、総トラフィックも基地局の能力を十分に引き出せない結果が確認できる。

これは、電波環境の悪い端末は台数増加によるRBの減少の影響を大きく受け、必要なスループットを確保できなくなることを示している(表 52 のパターンに該当)。

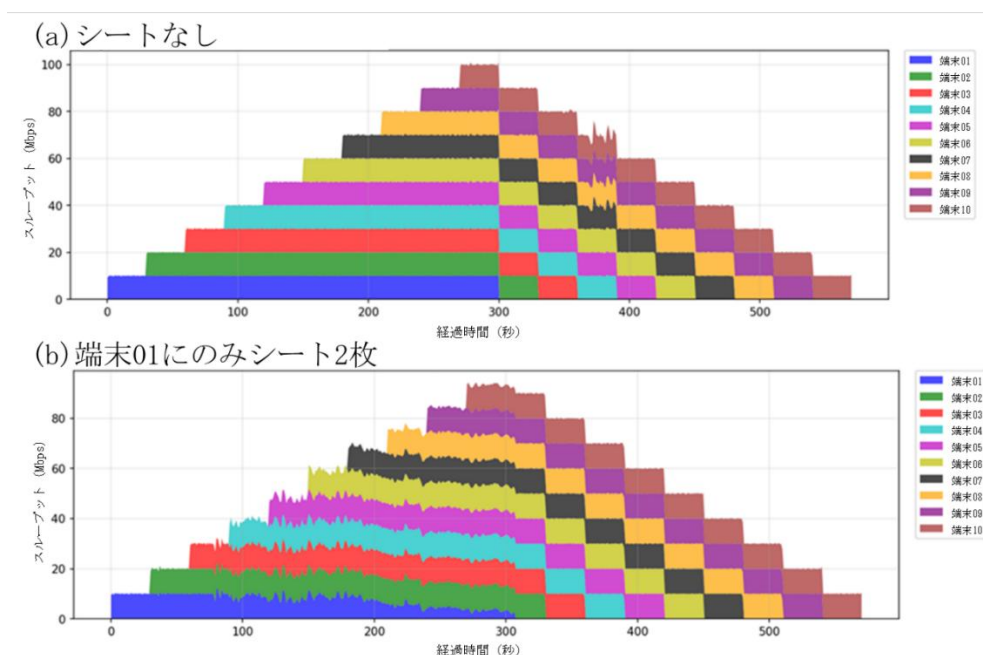


図 20 端末ごとのスループットの測定結果の例

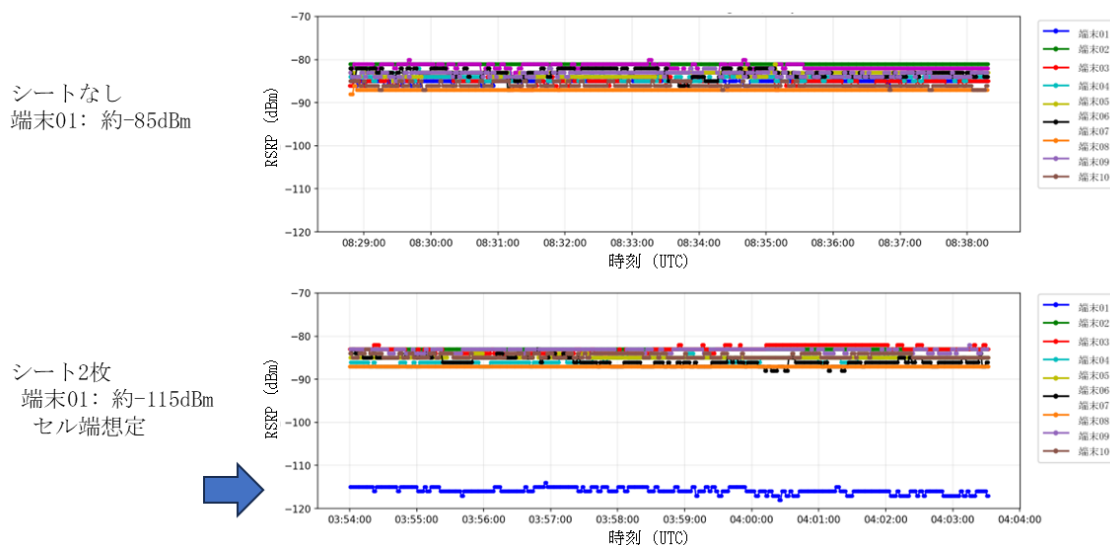


図 21 EMC シートの有無による RSRP の測定結果例

図 22 は、図 20(b)の端末 01 における通信遅延の推移を示したものである。端末 01 (弱電界)では他の端末が通信を開始した時点(90 秒付近)で、送信待ちのデータが端末内部に溜まったことにより映像の遅延が数秒以上に急増している。このような状態は、表 52 で示した「必要なスループットを大幅に下回っている状態」に該当し、正常な映像伝送が維持できない状態を示している。

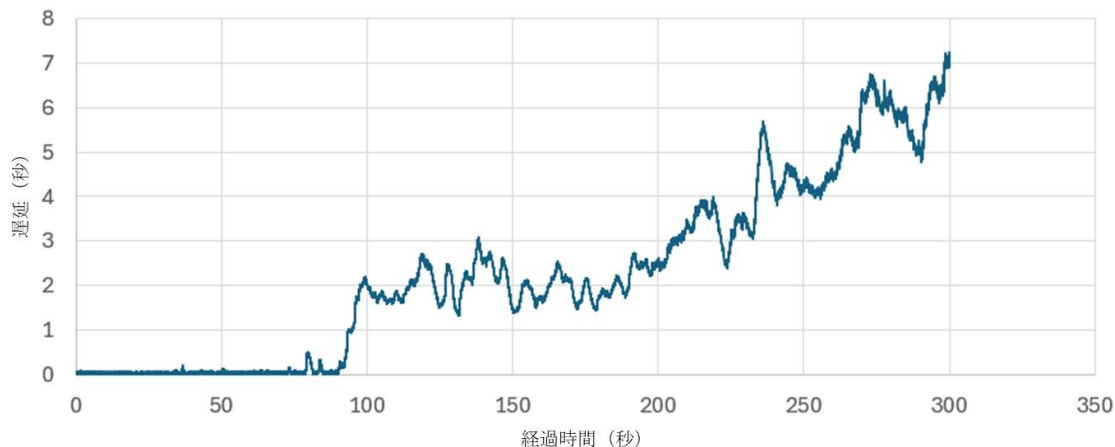


図 22 端末 01 の通信遅延

(5) 対応方法



① 対応の考え方

まず、(4)の測定結果から RB 割当率に起因するスループット低下が原因であることを確認した上で、以下の対応を検討する。RB 割当率は多くの基地局では直接制御できないため、UE-AMBR の調整等により各端末のスループット上限を制限し、特定の端末が RB を過剰に消費することを抑制する方針をとる。

対応方法 1：UE-AMBR の調整【標準パラメータの調整】

UE-AMBR の調整により、電波環境の良い AGV/AMR が必要以上に RB を消費することを抑制する。

対応方法 2：アプリケーション側での映像レート制御【標準パラメータの調整以外の手段】

対応方法 1 だけでは改善が不十分な場合、アプリケーション側の映像レート制御により、電波環境に応じて映像品質を動的に調整する。

対応方法 3：外部帯域制限デバイスの活用【標準パラメータの調整以外の手段】

対応方法 2 が困難な場合、外部帯域制限デバイスの活用により、ネットワーク層でスループットの上限を制限する。

※なお、映像伝送アプリケーションに画質自動調整機能がある場合、電波環境の良い AGV/AMR が過剰に RB を消費する可能性があるため、特に注意が必要である。



UE-AMBRの調整

各端末の通信速度に上限を設定する。



映像レート制御の実施

映像の解像度、フレームレート、ビットレートを調整する。



外部帯域制限デバイスの活用

端末と5G通信モジュールの間に挿入し、帯域上限を制限する。

図 23 対応方法

② 対応方法 1：UE-AMBR の調整【標準パラメータの調整】

(ア) 目的

電波環境の良い AGV/AMR が必要以上に RB を消費することを抑制し、電波環境の悪い AGV/AMR にも RB が配分されやすくすることで、多数端末接続時の通信品質の安定性を向上させる。

(イ) 設定内容

基地局側で、各 AGV/AMR に設定されている UE-AMBR を、映像伝送に必要な最大スループット以下に制限する。例えば、FullHD 映像の平均ビットレートが 5Mbps である場合、UE-AMBR を 6～7.5Mbps 程度に設定する。

なお、本対応方法では UE-AMBR の調整方法を解説するが、複数のアプリケーションが動作する端末では、動画閲覧など高負荷なサービスの Session-AMBR を抑制的に設定することも有効である。Session-AMBR の詳細は 3-2(3)②Session-AMBR(P34)を参照いただきたい。

(ウ) 設定値の決め方

アプリケーション開発者や運用担当者と協議しながら、以下の手順で設定を進める。

表 53 UE-AMBR の調整における設定値の決め方

ステップ	実施事項	内容
1	必要な映像レートの決定	<ul style="list-style-type: none">アプリケーション開発者や運用担当者と協議し、監視用途として許容できる最低限の映像品質(解像度、フレームレート、ビットレート)を決定する。
2	UE-AMBR の設定値の決定	<ul style="list-style-type: none">決定した最低限の映像レートに対し、一時的なビットレートの増加(バースト)を考慮した余裕を持たせた値を UE-AMBR の設定値とする。例えば、平均レートの 1.2 倍～1.5 倍程度の値を上限とするといった対応が考えられる。

(エ) 設定が適切かを確認する方法

UE-AMBR 調整後、多端末環境下で各 AGV/AMR からの映像伝送が安定しているか、特に電波環境の悪い AGV/AMR の映像品質が改善しているかを以下の手順で確認する。

表 54 UE-AMBR の設定が適切かを確認する方法

ステップ	実施事項	内容
1	多端末環境での再測定	<ul style="list-style-type: none"> ・ (4)①(P61)と同様の手順で、再度多端末稼働時のRSRPと各AGV/AMRのスループット、パケットロス、ジッタを測定する。
2	実走行での映像確認	<ul style="list-style-type: none"> ・ 実際にAGV/AMRを走行させ、カメラ映像のリアルタイム性や品質を目視で確認する。

■ 判定基準(例)

次表の基準(例)を目安として対応の効果を判定する。本ケースでは映像品質の判定が主であり、定量的な閾値は運用要件により異なるため、定性的な基準を示す。

表 55 UE-AMBR の設定が適切かを確認する際の判定基準(例)

項目	基準(例)
スループット	<ul style="list-style-type: none"> ・ 電波環境の悪いAGV/AMRのスループットが、UE-AMBRの設定値の範囲内で安定していること。 ・ 各AGV/AMRの映像伝送に必要な最低スループットを継続的に確保できていること。
映像品質	<ul style="list-style-type: none"> ・ 特定のAGV/AMRの映像が、他のAGV/AMRの稼働によって顕著に途切れたり、コマ落ちしたりする現象が改善されていること。
RBの配分	<ul style="list-style-type: none"> ・ UE-AMBRによる制限により、電波環境の良いAGV/AMRのRB消費が抑制され、電波環境の悪いAGV/AMRにもRBが配分されるようになっていること。

③ 対応方法 2：アプリケーション側での映像レート制御【標準パラメータの調整以外の手段】

(ア) 目的

電波環境の変化に応じて AGV/AMR 側で映像レートを自律的に調整することで、必要な RB 数を減らし、電波環境が悪い状況でも配分された RB の範囲内で映像伝送を継続しやすくする。

(イ) 設定内容

AGV/AMR の映像伝送システムにおいて、RSRP の値またはネットワークから取得可能な通信品質指標(例：SINR、BLER、利用可能な RB 数)を参照し、映像の解像度・フレームレート・圧縮率を動的に変更する機能を実装する。電波環境が良い場合でも映像レートを上げすぎないように、一律の CBR(固定ビットレート)でエンコードする設定も検討する。

表 56 映像レート制御の設定例

基準	設定例
RSRP が-95dBm を下回った場合	・ 映像解像度を FullHD から HD(720p)に下げ、ビットレートを 5Mbps から 3Mbps に変更する。
さらに RSRP が-105dBm を下回った場合	・ フレームレートを 15fps に制限し、ビットレートを 2Mbps にする。

(ウ) 設定値の決め方

アプリケーション側の最低品質レベルを考慮しながら、以下の手順で映像レート制御を行う。

表 57 アプリケーション側での映像レート制御における設定値の決め方

ステップ	実施事項	内容
1	最低品質レベルの定義	・ AGV/AMR の運用において許容できる最低限の映像品質(解像度、フレームレート、ビットレート)を決定し、それを下限値とする。
2	RSRP の閾値の決定	・ (4)①(P61)の測定結果を参照し、映像品質に影響が出始める RSRP の値を把握する。
3	複数段階のレート調整ステップの定義	・ AGV/AMR の走行範囲で想定される RSRP の変動幅を考慮し、複数のレート調整ステップ(例：RSRP -90dBm 以下でレート 1、-105dBm 以下でレート 2 など)を定義する。

(エ) 設定が適切かを確認する方法

RSRP の変動に応じてアプリケーションが適切に映像レートを調整し、映像伝送の安定性が確保されているかを以下の手順で確認する。

表 58 アプリケーション側での映像レート制御の設定が適切かを確認する方法

ステップ	実施事項	内容
1	閾値動作の検証	<ul style="list-style-type: none">電波吸収シートやアッテネータで RSRP を強制的に変化させ、設定したステップどおりに映像レートの制御が行われるかを確認する。

■ 判定基準(例)

以下の基準(例)を目安として対応の効果を判定する。本ケースでは映像品質の判定が主であり、定量的な閾値は運用要件により異なるため、定性的な基準を示す。

表 59 アプリケーション側での映像レート制御の設定が適切かを確認する際の判定基準(例)

項目	基準(例)
レート調整	<ul style="list-style-type: none">RSRP が低下するにしたがって、アプリケーションが設定されたステップ通りに映像レートを下げていること。
映像品質	<ul style="list-style-type: none">映像レートが下がっても、最低限必要な映像品質が維持され、運用上の視認性やデータとしての利用価値が損なわれていないこと。
安定性	<ul style="list-style-type: none">映像が途切れる、コマ落ちするなどの現象が発生せず、伝送が安定していること。

④ 対応方法 3：外部帯域制限デバイスの活用【標準パラメータの調整以外の手段】

(ア) 目的

アプリケーション側での映像レート制御が困難な場合、または UE-AMBR の調整では十分な効果が得られない場合に、外部帯域制限デバイスを用いてネットワーク層でスループットの上限を制限する。各端末のスループットを制限することで、必要以上の RB の消費を抑制し、電波環境の悪い端末にも RB が配分されやすくなる。

(イ) 設定内容

AGV/AMR と 5G/L5G 通信モジュールの間に、QoS 機能を持つ L2 スイッチや帯域制限機能を備えたルータなどの外部帯域制限デバイスを挿入し、当該 AGV/AMR からの UL 通信の最大スループットを制限する。例えば、AGV/AMR からの UL 通信を最大 10Mbps に制限するよう、L2 スイッチのポート設定を行うことが考えられる。

(ウ) 設定値の決め方

運用上許容できる最大映像レートを確認し、以下の手順で設定値を決定する。

表 60 外部デバイスによる帯域制限の設定値の決め方

ステップ	実施事項	内容
1	最大スループットの決定	<ul style="list-style-type: none">対応方法 1 と同様に、各 AGV/AMR が運用上許容できる最大映像レートを決定する。例えば、対応方法 1 で決定した UE-AMBR の設定値と同等の値を目安とする。
2	外部帯域制限デバイスの設定	<ul style="list-style-type: none">決定した最大スループットの値を外部帯域制限デバイスの UL 帯域制限値として設定する。

(エ) 設定が適切かを確認する方法

外部帯域制限デバイスによって、特定の AGV/AMR の帯域が効果的に制限され、他の AGV/AMR の通信品質が改善しているかを以下の手順で確認する。

表 61 外部デバイスによる帯域制限の設定が適切かを確認する方法

ステップ	実施事項	内容
1	多端末環境での再測定	・ (4)①(P61)と同様の手順で、再度多端末稼働時の RSRP と各 AGV/AMR のスループット、パケットロス、ジッタを測定する。
2	帯域制限の動作確認	・ 外部デバイスを挿入した AGV/AMR のスループットが、設定した制限値を超えていないことを確認する。
3	実走行での映像確認	・ 実際に AGV/AMR を走行させ、カメラ映像のリアルタイム性や品質を目視で確認する。

■ 判定基準(例)

以下の基準(例)を目安として対応の効果を判定する。本ケースでは映像品質の判定が主であり、定量的な閾値は運用要件により異なるため、定性的な基準を示す。

表 62 外部デバイスによる帯域制限の設定が適切かを確認する判定基準(例)

項目	基準(例)
スループット	・ 外部デバイスを挿入した AGV/AMR からのスループットが、設定した制限値を超えないこと。
映像品質	・ 特定の AGV/AMR の映像が、他の AGV/AMR の稼働によって顕著に途切れたり、コマ落ちしたりする現象が改善されていること。
RB の配分	・ スループットの制限により、電波環境の悪い AGV/AMR にも RB が配分されるようになり、映像品質の劣化が改善されていること。

(6) 同様の対応が有効なユースケース



本節で示した対応方法(UE-AMBR の調整、アプリケーション側の映像レート制御、外部帯域制限デバイスの活用)は、本ケースと同様の通信特性を持つユースケースに対しても有効である。以下に、適用できる条件とユースケース例、適用時の留意点を示す。

① 本節の内容が適用できる条件

本節の対応が有効なのは、以下の条件を満たすケースである。いずれも本ケースと共通する特徴であり、RB 割当率に起因するスループット低下が発生しやすい環境といえる。

表 63 本節の内容が適用できる条件

条件	内容	本ケースでの該当例
通信パターン	UL 方向の映像トラフィックが中心で、複数端末が同時に通信する。	各 AGV/AMR から 3~8Mbps/台の映像を同時にアップロードする。
電波環境	移動に伴い電波環境が変動し、端末ごとに RSRP の差がある。	AGV/AMR が工場内を移動し、基地局からの距離や遮蔽物の影響を受ける。

② ユースケース例

上記の条件を満たすユースケースの例を以下に示す。なお、DL 主体の通信(映像配信、ファイル配信等)は、本節で扱った UL 方向の RB 割当率に起因するスループット低下とは通信特性が異なる。DL 主体のケースでは基地局から端末への通信が帯域の大部分を占めるため、UE-AMBR や映像レート制御では改善が見込めない。

表 64 本節の対応方法が有効なユースケース例

ユースケース例	概要
パトロールの自動化 (移動ロボット、遠隔ロボット)	<ul style="list-style-type: none"> 複数のパトロールロボットが工場・倉庫内を巡回し、監視カメラ映像をアップロードするケース。 複数台が同時に映像を伝送し、巡回に伴い電波環境が変動するため、本節の対応が有効である。

ユースケース例	概要
ドローン+温度センサによる工場環境計測 (移動ロボット等)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 複数台のドローンが工場内を飛行し、温度センサデータや映像を伝送するケース。 ・ 飛行に伴い電波環境が変動しやすく、複数台の同時通信により RB の競合が発生するため、本節の対応が有効である。
動画像による異常検知	<ul style="list-style-type: none"> ・ 多数のカメラが工場各所に設置され、動画像を常時監視システムにアップロードし、異常検知を行うケース。 ・ カメラの増設に伴い 1 台あたりに配分される RB が減少し、個々のカメラの映像品質に影響が生じるため、本節の対応が有効である。

③ 適用時の留意点

本節の内容を適用する際は、以下の点に留意いただきたい。

表 65 本節の内容を適用する際の留意点

留意点	内容	対策の例
基地局のスケジューリングポリシーの違い	<ul style="list-style-type: none"> ・ 基地局のメーカーや設定により、RB の配分方法（例：PF(Proportional Fair)スケジューラの挙動)が異なる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ UE-AMBR や映像レートの設定変更の際は、事前に使用している基地局のスケジューリングポリシーの仕様を確認し、その挙動を理解した上で調整する。
UE-AMBR とアプリケーションへの影響	<ul style="list-style-type: none"> ・ UE-AMBR の調整やアプリケーション側の映像レート制御は、AGV/AMR の最終的な性能(映像品質、制御応答性)に直接影響する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 運用要件とのバランスを慎重に検討し、過度な制限とならないように設定する。
将来の拡張性	<ul style="list-style-type: none"> ・ 本節の対応で一度改善しても、AGV/AMR の増設や高精細映像アプリケーションの導入により、1 台あたりに配分される RB がさらに減少する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 端末台数や映像要件の変更に応じて、UE-AMBR や映像レートの設定値の見直しを定期的に行う。

4-4 機器の制御に関連するケース：機械に関する動作制御・遠隔操作

本ケースでは、以下の標準パラメータを扱う。各パラメータの詳細は 3 章の該当箇所を参照いただきたい。

表 66 4-4 節で扱う標準パラメータ

標準パラメータ	概要	3 章の参照先
スロット割当	<ul style="list-style-type: none"> 時間方向の無線リソースを端末にどのような周期で割り当てるかを定める。 	3-2(2)① (P23)
TDD モード	<ul style="list-style-type: none"> 自営基地局の DL/UL パターンを隣接する他事業者の基地局と合わせるか、一部独自のパターンとするかを定める。 	3-2(2)③ (P27)

(1) 概要・前提



① 想定する状況

自動車部品の組立工場で、①コンベア制御通信 (PLC と制御盤間の指令・応答) と②センサデータ収集 (振動・温度・圧力等) の 2 種類の通信を L5G で無線化し、配線削減とライン組み替えの迅速化を計画した。いずれも小パケット・数十ミリ秒周期の通信で、許容遅延は 100 ミリ秒程度である。

小規模な初期検証では安定動作したが、複数ラインに拡大し端末台数が増加したところ、以下の問題が発生した。

- ・ 制御応答やセンサデータの遅延が散発的に 100 ミリ秒を超過
- ・ コンベア動作タイミングのばらつきや設備異常検知の遅れ
- ・ 複数ライン同時稼働時に問題が顕著化

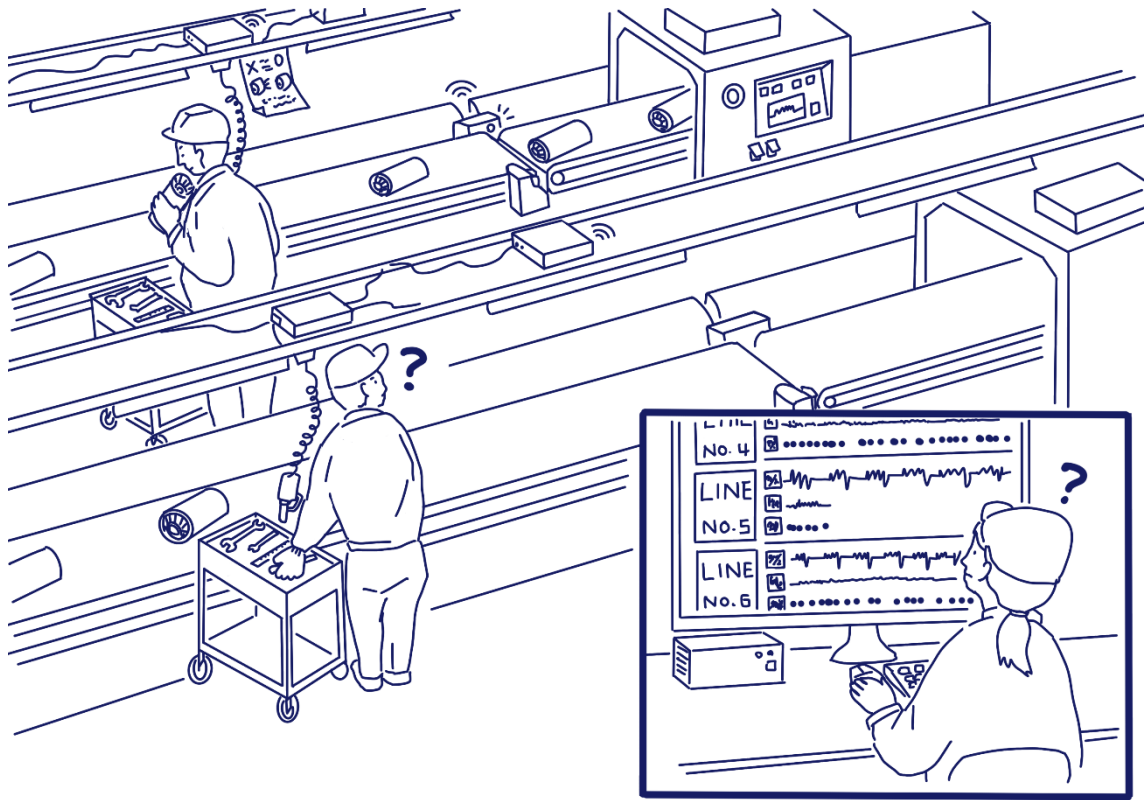


図 24 4-4 節で想定する状況(イメージ)

② 運用の構成

本ケースのシステム構成を以下に示す。複数の組立ラインそれぞれに PLC・制御盤、センサ端末を配置し、ライン管理サーバおよびセンサデータ収集サーバと L5G で接続する構成である。

PLC・制御盤には L5G 対応の産業用通信モジュールを接続する。センサ端末には小型の通信モジュールを搭載するか、複数センサをゲートウェイ経由で集約して接続する。

表 67 本ケース(機械に関する動作制御・遠隔操作)で想定する運用の構成

機器	台数・配置	内容
PLC	各ラインに 1 台	<ul style="list-style-type: none"> 制御盤からの状態応答を受信 コンベアの起動/停止/速度変更指令を送信
制御盤	各ラインに 1 台	<ul style="list-style-type: none"> PLC 指令に基づきコンベアモータを制御し、状態(回転数・電流値・異常フラグ等)を PLC に返送
センサ端末	各ラインに複数台	<ul style="list-style-type: none"> 数十ミリ秒周期で計測データ(振動加速度・温度・圧力等)をサーバへ送信
ライン管理サーバ	1 台	<ul style="list-style-type: none"> PLC 状態の一元監視、コンベア制御の統合管理
センサデータ収集サーバ	1 台	<ul style="list-style-type: none"> 各センサからの計測データを受信・蓄積・分析

③ 通信への要求

各通信の要件を以下に示す。制御盤から PLC への制御応答と、センサ端末からサーバへのセンサデータ送信が通信量の大部分を占めており、いずれも UL 通信である。大容量通信ではなく、小パケット・数十ミリ秒周期・許容遅延 100 ミリ秒の通信が多数の端末から同時に発生するため、UL 無線リソースの競合が起きやすい。

表 68 本ケース(機械に関する動作制御・遠隔操作)における通信への要求

通信	方向	送信周期	データサイズ	許容遅延
制御応答 (制御盤→PLC)	UL	数十ミリ秒	50~200byte/回程度	100 ミリ秒以下
センサデータ送信 (端末→サーバ)	UL	数十ミリ秒	50~200byte/回程度	100 ミリ秒以下
制御指令 (PLC→制御盤)	DL	数十ミリ秒	50~100byte/回程度	50 ミリ秒以下

(2) 現場において発生しやすい現象



① 事前評価

本格導入の前に1ラインのPLC・制御盤・センサ端末による小規模なテスト環境を構築し、L5Gの通信性能を評価した。結果は良好で、制御応答・センサデータの遅延はいずれも数十ミリ秒程度で安定しており、許容遅延である100ミリ秒に対して十分なマージンがあった。この結果を受け、複数ラインへの展開を決定した。

② 運用規模拡大時に発生した現象

複数ラインへ展開し端末台数が増加したところ、以下の2つの現象が発生した。

現象1：制御応答・センサデータの遅延が散発的に増大

事前評価では数十ミリ秒程度だった遅延が、複数ライン同時稼働で100ミリ秒以上などに増大する場面が不規則に発生した。また、コンベアの起動/停止タイミングにばらつきが生じ、部品の搬送間隔が乱れた。

表 69 現象1 - 制御応答・センサデータの散発的な遅延増大の影響

影響箇所	具体的な影響
ライン稼働	・ 許容遅延超過によりPLCの安全停止を発動、ライン停止頻度が増加。
生産タクト	・ コンベア速度変更指令の遅延により搬送タイミングにずれが発生。
設備異常検知	・ センサデータの到達が遅れ、異常の早期発見ができない。

現象2：ジッタの増大

遅延の最小値と最大値の差が大きくなった。一定時間データが届かず、その後まとめて届く(バースト的な到着)現象も見られた。端末台数が多いほど、また複数ラインが同時稼働するほど顕著になった。

表 70 現象2 - ジッタの増大の影響

影響箇所	具体的な影響
PLC制御	・ データの到着遅れによる意図しない安全停止の発生。
センサデータ分析	・ データの到着順序が乱れ、時系列分析の精度が低下。
サーバ処理	・ バースト的な到着による処理負荷の増大。

(3) 影響を与えていると考えられる標準パラメータ



(2)の現象を踏まえ、システムの状態を確認した結果、以下のことが分かった。

- ・ 少数端末での運用では問題が発生しないが、端末台数が増えると問題が顕著になる。
- ・ UL (制御応答+センサデータ) への影響が支配的である。
- ・ パケットロスは最小限であり、通信エラーが原因ではない。

これらの傾向から、端末台数の増加に伴う UL の無線リソースの競合が主因と考えられる。以下に、影響を与えていると考えられる標準パラメータを示す。

① 影響を与えていると考えられる標準パラメータ：スロット割当/TDD モード

(ア)理由

一般的な TDD 設定では、DL に多くの時間が割り当てられていることが多い。本ケースでは、制御盤から PLC への状態応答(UL)と、各センサからの計測データ(UL)が通信量の大半を占めるため、UL スロットの不足が遅延の直接的な原因となりうる。(スロット割当の詳細は 3-2(2)①スロット割当(P23)、TDD モードの詳細は、3-2(2)③TDD モード(P27)を参照。)

具体的には以下の2つの要因が重なって遅延が発生していると考えられる。

表 71 スロット割当/TDD モードによる遅延発生の変因整理

変因	内容
UL スロットの不足	<ul style="list-style-type: none"> ・ TDD の同期モードでは、UL スロットの周期が5ミリ秒程度となる。 ・ 送信周期が数十ミリ秒のデータが多数の端末から同時に発生するため、限られた UL スロットを共有することになり、UL の無線リソースの競合が激しくなる。
スケジューリングによる送信待ちの発生	<ul style="list-style-type: none"> ・ 5G/L5G では、端末がデータを送信していない間は UL の無線リソースが解放される。送信を再開する際に基地局のスケジューリングによるリソース割当を待つ必要があり、この手順に数十ミリ秒程度の追加遅延が発生する。端末台数が多いほど、この待ち時間が増大し、遅延に影響する。

(イ)簡易的な確認方法

スロット割当/TDD モードの影響が疑われる場合、以下の方法で簡易的に切り分けができる。

表 72 スロット割当/TDD モードの影響が疑われる場合の簡易的な確認方法

確認方法	内容	結果の見方
稼働ライン数を減らした場合の遅延の確認	・ 稼働ライン数を段階的に減らし(例：全ライン→1 ライン)、各段階で制御応答やセンサデータの遅延を体感で確認する。	・ ライン数を減らすことで遅延が改善すれば、端末台数の増加に伴う UL スロットの不足が原因と考えられる。
遅延揺らぎのチェック	・ Ping 連続送信でジッタを測定する。	・ 最大値と最小値の差が大きい場合は、スケジューリングによる送信待ちの影響の可能性が考えられる。

(4) 標準パラメータの状況を把握する方法



(3)で挙げた標準パラメータ(スロット割当/TDD モード)が実際に遅延増大の原因となっているかを確認するため、以下の測定を行う。

① 測定：UL スロット割当と送信タイミングの可視化

本測定では、L5G ルータなどに接続された送信端末(クライアント PC 等)から受信端末(サーバ)へ小パケットを周期的に送信し、受信時刻の分布パターンから基地局の TDD 設定状況とスケジューリングの影響を把握する。特別な測定機器は不要であり、L5G に接続された送信端末と受信端末があれば実施可能である。

(ア)目的

基地局の TDD モード(同期/準同期)を確認するとともに、5G 特有のスケジューリングにより送信タイミングが制約されることで生じる遅延の揺らぎを把握する。

(イ)手順

L5G ルータなどに接続された送信端末(クライアント PC 等)と受信端末(サーバ)を用意する。両端末は、受信時刻分析の精度確保のため、NTP(Network Time Protocol)等によりミリ秒単位で時刻同期しておくことが望ましい。パケット送信には UDP で小パケットを周期送

信できるツール(iperf、自作スクリプト等)を使用する。

表 73 スロット割当/TDD モードの可視化の手順

ステップ	内容
1	・ L5G に接続され、かつ時刻同期された送信端末と受信端末を用意する。
2	・ 送信端末から受信端末へ小パケット(数十バイト程度)を一定周期(例：100 ミリ秒間隔)で連続送信する。
3	・ 受信端末側で各パケットの受信時刻を記録する。

(ウ)得られる情報

この測定から以下の情報が得られる。

- ・ 基地局の同期モード(同期/準同期)の設定状況
- ・ UL スロットの割当周期と、送信可能タイミングの制約
- ・ スケジューリング起因の遅延揺らぎ(送信待ち時間のばらつき)

(エ)結果の例

取得した受信時刻データを以下の2つの観点で分析する。

観点1：TDD モードの判別

受信時刻を TDD フレーム周期(10 ミリ秒)で剰余を取り、散布図を作成する。パケットの到着タイミングの分布から、TDD モードを判別できる。

表 74 TDD フレーム周期に対するパケット到着分布の結果パターンと見方

結果のパターン	結果の見方
パケット到着が特定の時間帯に集中	<ul style="list-style-type: none"> ・ 同期モードの可能性が高い。 ・ UL スロットが固定周期で限定されており、送信可能なタイミングが制約されている。
パケット到着が時間帯全体に分散	<ul style="list-style-type: none"> ・ 準同期モードの可能性が高い。 ・ UL スロットが柔軟に割り当てられている。

以下に観点1の結果例を示す。図 25 は同期モードの散布図であり、パケットの到着タイミングが特定の時間帯に集中していることが確認できる。これは、UL スロットが固定周期で限定されており、端末が送信できるタイミングが制約されている状態を示している(表 74 の1つ目のパターンに該当)。

同期モード

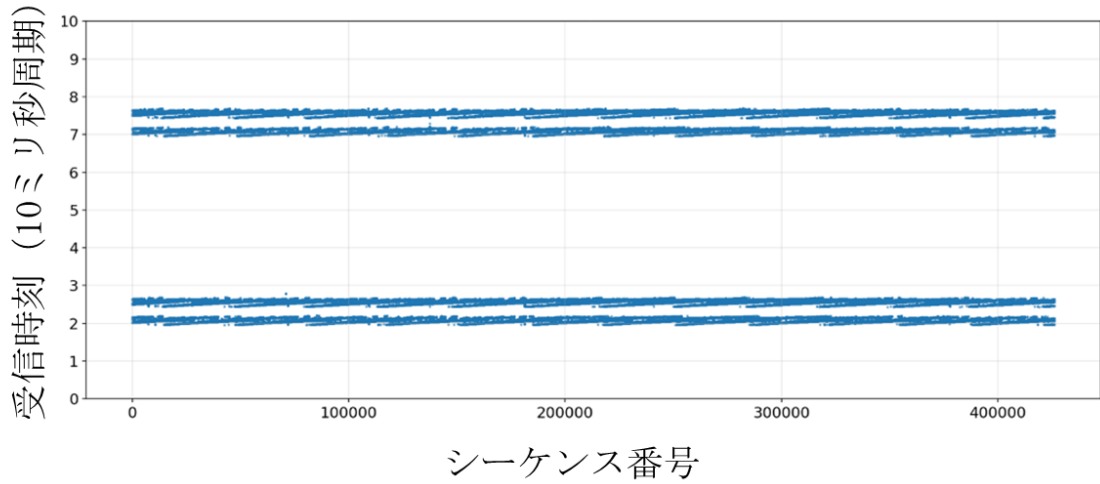


図 25 同期モードにおける散布図

一方、図 26 は準同期モードの散布図であり、パケットの到着タイミングが時間帯全体に分散していることが確認できる。これは、UL スロットが柔軟に割り当てられており、送信タイミングの制約が少ない状態を示している(表 74 の 2 つ目のパターンに該当)。

準同期モード

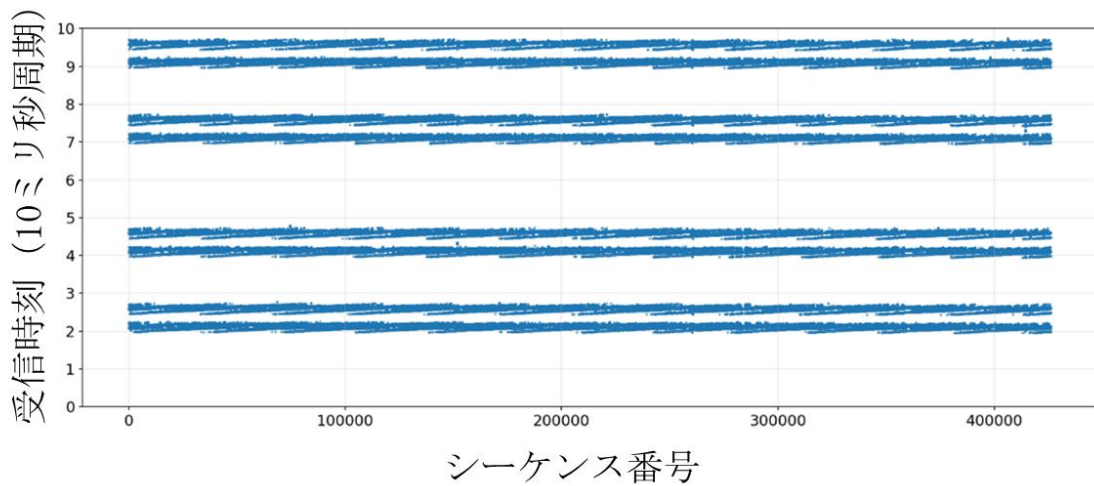


図 26 準同期モードにおける散布図

観点2：スケジューリングによる送信待ちの影響

連続送信時の受信間隔(パケット間隔)の分布を確認し、スケジューリングによる送信待ちの影響を把握する。

表 75 受信間隔分布の結果パターンと見方

結果のパターン	結果の見方
遅延時間が周期的に増減する	<ul style="list-style-type: none"> 送信周期が端末の処理遅延などにより実際には送信周期より少し(1 ミリ秒未満)遅れ、そのわずかなずれが積み重なることで UL のスロットとの当たり方が周期的に変化し、遅延がのこぎり型に変動する。

以下に観点2の結果例を示す。図 27 は連続送信時の受信間隔の分布である。遅延時間がのこぎり型に周期的に増減していることが確認できる。これは、端末の送信タイミングと UL のスロットのタイミングが周期的にずれることで、スケジューリングによる送信待ち時間が変動していることを示している(表 75 のパターンに該当)。

準同期モード

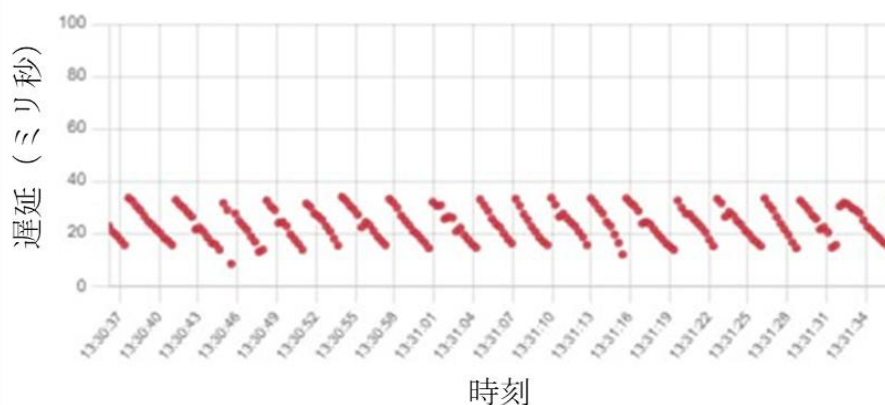


図 27 受信間隔分布図の例

(5) 対応方法



① 対応の考え方

まず、(4)の測定結果からULの無線リソースの競合が原因であることを確認した上で、以下の対応を検討する。

対応方法1：TDDモードの変更【標準パラメータの調整】

TDDモードを同期モードから準同期モードに変更することで、ULスロットの周期を短くし、UL帯域を増加させる。

対応方法2：背景トラフィックの付加【標準パラメータの調整以外の手段】

TDDモードの変更だけでは改善が不十分な場合、背景トラフィック(低ビットレートのデータパケット)の付加により、スケジューリングに起因する追加遅延を抑制する。

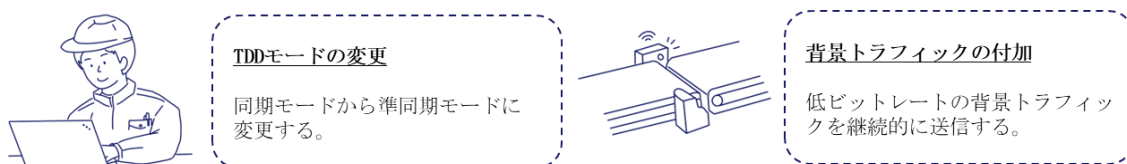


図 28 対応方法

② 対応方法1：TDDモードの変更【標準パラメータの調整】

(ア)目的

TDDモードを同期モードから準同期モードに変更することで、ULスロットの周期を短くし、UL帯域を増加させる。多数の端末がUL無線リソースを共有する本ケースでは、ULスロットの増加が遅延改善に直結する。

(イ)設定内容

同期モードから準同期モードに変更する。なお、使用する機器やシステムによって、通信機器提供事業者やシステム構築事業者への依頼が必要となる場合がある。また、取得している免許の内容によっては設定変更が制限される場合があるため、事前に免許条件を確認する必要がある。

(ウ)設定値の決め方

まずUL帯域の不足が遅延の原因であることを確認した上で、準同期モードへの変更を行う。

ただし、UL帯域に余裕がある場合(帯域使用率が低い場合)は、TDDモードの変更では効果が見込めないため、対応方法2(背景トラフィックの付加)を優先して検討いただきたい。

表 76 TDDモードの変更における設定値の決め方

ステップ	実施事項	内容
1	UL帯域の使用率を確認	・ (4)①(P79)の測定結果を参照し、UL帯域の不足が遅延の原因であることを確認する。
2	準同期モードへの変更	・ 基地局のTDDモードを同期モードから準同期モードに変更する。

(エ)設定が適切かを確認する方法

TDDモードを変更後、制御応答・センサデータ送信の遅延が数十ミリ秒程度で安定しているかを以下の手順で確認する。

表 77 TDDモードの設定が適切かを確認する方法

ステップ	実施事項	内容
1	ULスロット周期の短縮確認	・ (4)①(P79)と同様の測定を対応前後で実施し、受信時刻の剰余ヒストグラムを比較し、準同期モードへの変更後にULスロットの割当周期が短縮されていることを確認する。
2	遅延・ジッタの許容値確認	・ 制御応答・センサデータの遅延を測定し、許容値以内に収まっているか確認する。
3	複数台運用時の改善確認	・ 複数ライン同時稼働時の遅延を測定し、対応前と比較して改善していることを確認する。

■ 判定基準(例)

以下の基準(例)を目安として、対応の効果を判定する。

表 78 TDD モードの設定が適切かを確認する際の判定基準(例)

項目	目標値	許容値
遅延(95 パーセンタイル値等)	50 ミリ秒以内(複数台運用時)	100 ミリ秒以内
ジッタ (95 パーセンタイル値等)	±20 ミリ秒以内	±50 ミリ秒以内
パケットロス率 (99 パーセンタイル値等)	0.01%以内	0.1%以内
台数依存性	全台稼働時でも遅延が目標値を維持	—

③ 対応方法 2: 背景トラフィックの付加【標準パラメータの調整以外の手段】

(ア) 目的

5G/L5G ではデータを送信していない端末から UL 無線リソースが解放され、スケジューリングによる無線リソース割当が必要となることで追加遅延が発生する。

データ送信の合間にも低ビットレートの背景トラフィックを継続的に送信することで、基地局から「常に UL の無線リソースを必要としている端末」と認識させ、無線リソース割当を維持させる。これにより、送信再開時の追加遅延を抑え、ジッタを安定化させる。

(イ) 設定内容

各端末(PLC、制御盤、センサ端末)から、データ送信の合間に低ビットレートの背景トラフィックを送信する。

表 79 背景トラフィックの設定例

項目	内容
データ内容	定期通信信号またはダミーパケット
プロトコル	UDP
送信先	管理サーバ(サーバ側では受信後破棄)

(ウ)設定値の決め方

背景トラフィックを流しすぎると、制御データやセンサデータの帯域を圧迫し逆効果となる。また、多数の端末すべてに一律で適用すると帯域への影響が大きいため、遅延が問題となる端末から優先的に適用する。以下の手順で、効果と帯域負荷のバランスを確認しながら設定を進める。

表 80 背景トラフィックによる遅延安定化における設定値の決め方

ステップ	実施事項	内容
1	送信間隔の決定	<ul style="list-style-type: none"> 無線リソースが解放されない間隔で送信する。(4)の測定結果を参照し、無線リソース再確保による追加遅延が発生しない間隔を目安とする(例:数十ミリ秒~数百ミリ秒間隔)。
2	パケットサイズ・ビットレートの決定	<ul style="list-style-type: none"> パケットサイズは最小限(数百 byte/パケット)とし、ビットレートは制御データ・センサデータの通信量を大きく超えない範囲(例:数百 kbps/台程度)を初期値とする。
3	背景トラフィックの設定	<ul style="list-style-type: none"> 決定した送信間隔・パケットサイズで対象端末から背景トラフィックを送信する設定を行う。

(エ)設定が適切かを確認する方法

背景トラフィック付加後、制御応答・センサデータの遅延が安定しているかを以下の手順で確認する。特に、付加前後での突発的な遅延の有無に着目する。効果が不十分な場合はビットレートを段階的に変更し、遅延安定化の効果と帯域負荷のバランスが取れた設定を採用する。

表 81 背景トラフィックによる遅延安定化が適切かを確認する方法

ステップ	実施事項	内容
1	スロット割当/TDDモードの可視化	<ul style="list-style-type: none"> (4)①(P79)と同様の測定を背景トラフィック付加前後で実施し、受信時刻の剰余ヒストグラムおよびパケット間隔の分布を比較する。
2	追加遅延の抑制確認	<ul style="list-style-type: none"> 背景トラフィックの付加により、スケジューリングによる送信待ちに起因する追加遅延が抑制されていることを確認する。
3	遅延・ジッタの許容値確認	<ul style="list-style-type: none"> 制御応答・センサデータの遅延およびジッタを測定し、許容値以内に収まっているか確認する。

ステップ	実施事項	内容
4	複数運用時の改善確認	・ 複数ライン同時稼働時の遅延を測定し、対応前と比較してジッタが改善していることを確認する。

■ 判定基準(例)

②(エ)と同様の基準(例)で判定するため、内容を参照いただきたい。

(6) 同様の対応が有効なユースケース



本節で示した対応方法(TDD モードの変更、背景トラフィックの付加)は、本ケースと同様の通信特性を持つユースケースに対しても有効である。以下に、適用できる条件とユースケース例、適用時の留意点を示す。

① 本節の内容が適用できる条件

本節の対応が有効なのは、以下の条件を満たすケースである。いずれも本ケースと共通する特徴であり、同じ仕組みで遅延が発生しやすい環境といえる。

表 82 本節の内容が適用できる条件

条件	内容	本ケースでの該当例
通信パターン	小パケット・数十ミリ秒周期の UL 通信が中心で、映像等の大容量通信を伴わない	制御応答 50~200byte、センサデータ 50~200byte を数十ミリ秒周期で送信
帯域特性	各端末の帯域は小さいが端末台数が多い	各端末は数十~数百 kbps 程度だが、複数ラインで多数の端末が同時送信
許容遅延	100 ミリ秒程度	100 ミリ秒程度

② ユースケース例

上記の条件を満たすユースケースの例を以下に示す。なお、カメラ映像を用いた現場モニタリング(稼働監視)のように映像帯域が通信量の大部分を占めるケースでは、小パケットの UL の無線リソース競合ではなく、映像データそのものの帯域不足が問題となるため、TDD モードの変更や背景トラフィックの付加では改善が見込めない。また、工場内の設備や備品及び資産管理(部品管理・在庫管理・資産管理)のように通信頻度が低いイベントトリガー型のケースでは、UL スロットの競合がそもそも発生しにくいいため、本節の対応は不要である。

表 83 本節の対応方法が有効なユースケース例

ユースケース例	概要
パトロールの自動化 (移動ロボット、遠隔ロボット)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 広い敷地内のセキュリティ巡回と設備点検を効率化するために自動巡回パトロールロボットを L5G で監視室から一元管理するユースケース。 ・ 複数台が同時に小パケットを送信し、端末台数の増加に伴い UL スロットの競合が発生するため、本節の対応が有効である。
ロボット等によるプラント内点検	<ul style="list-style-type: none"> ・ 遠隔または自律型ロボットの制御コマンド・テレメトリデータ (15~250byte 程度) を 10~100 ミリ秒周期で送受信するケース。 ・ 複数台の同時運用により小パケットの UL 通信が集中し、スケジューリングによる送信待ちが発生するため、本節の対応が有効である。

③ 適用時の留意点

本節の内容を適用する際は、以下の点に留意いただきたい。

表 84 本節の内容を適用する際の留意点

留意点	内容	対策の例
許容遅延と制御周期の関係	<ul style="list-style-type: none"> ・ TDD モードの変更や背景トラフィックの付加で遅延を改善しても、許容値以内に収まらない場合がある。遅延が許容値を超えると PLC が通信異常と判定する場合がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 安全設計としてフォールバック (有線への自動切替) の検討を推奨する。
端末台数と帯域設計	<ul style="list-style-type: none"> ・ 本節の対応で一度改善しても、端末台数の追加により UL 帯域が逼迫し、遅延の問題が再発する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 端末追加時には UL 帯域の余裕を再確認する。 ・ また、センサの送信周期や送信データ量の調整も有効な対策となる場合があるため検討いただきたい。

4-5 設備・資産管理に関連するケース：工場内の設備や備品及び資産管理(部品管理・在庫管理・資産管理)

本ケースでは、以下の標準パラメータを扱う。各パラメータの詳細は3章の該当箇所を参照いただきたい。

表 85 4-5 節で扱う標準パラメータ

標準パラメータ	概要	3章の参照先
RRC 切断タイマー	<ul style="list-style-type: none">通信終了後、端末が通信可能な状態から待機状態に移行するまでの時間を制御する。	3-2(5)① (P44)

(1) 概要・前提



① 想定する状況

ある物流倉庫では、ピッキング作業と入出庫管理を効率化するため、ハンディターミナルをL5G接続に置き換えることを検討していた。作業者がRFIDタグやバーコードをスキャンすると、サーバに照会を行い、その場で確認音(OK/NG)やピッキング指示が表示される仕組みである。

本格導入の前にテスト環境を構築し、3台のハンディターミナルを用いてL5Gの通信性能を評価した。テスト担当者が連続してスキャン操作を行ったところ、結果は良好であり、スキャンからサーバ応答までの時間は100ミリ秒以下に収まり、即座にOK/NG音を聞くことができた。

しかし、実際の作業パターンを想定した追加検証を行ったところ、以下の問題が発覚した。

- ・ 移動や棚探しの後にスキャンすると、確認音が鳴るまで1秒近くかかることがある
- ・ 連続スキャン時には問題ないが、しばらく通信がない状態からの1回目のスキャンで遅延(以降、「初送遅延」と呼ぶ)が発生する

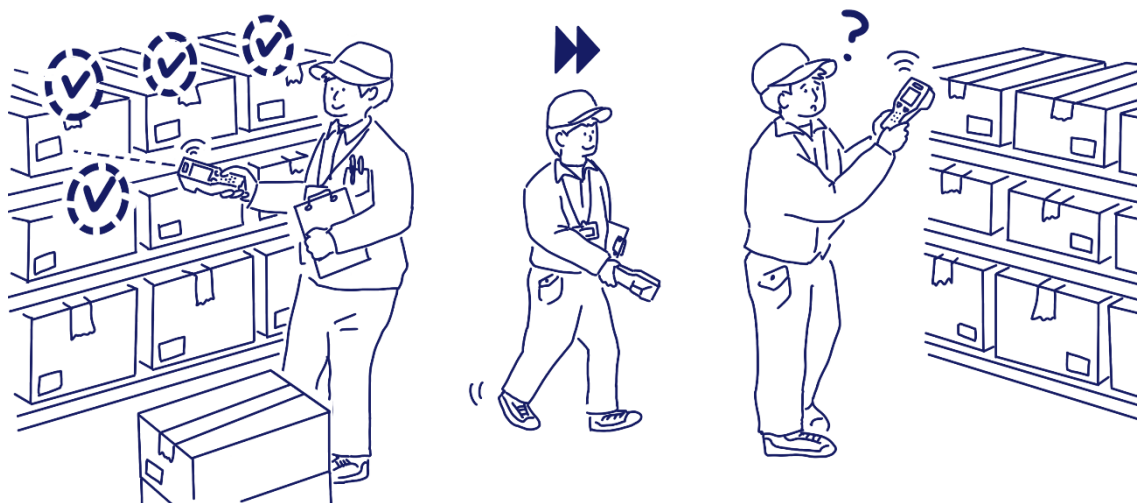


図 29 4-5 節で想定する状況(イメージ)

② 運用の構成

本ケースのシステム構成を以下に示す。物流倉庫内にハンディターミナルを配置し、在庫管理システム(WMS)等のサーバと L5G で接続する構成である。

ハンディターミナルには 5G 通信モジュールを内蔵し、RFID リーダーまたはバーコードリーダーでスキャンしたデータをサーバへ照会する。サーバは照合結果を即時応答し、端末側で画面表示・音声発報を行う。

表 86 本ケース(工場内の設備や備品及び資産管理(部品管理・在庫管理・資産管理))で想定する運用の構成

機器	台数・配置	内容
ハンディターミナル	30 台程度	<ul style="list-style-type: none"> スキャンデータ(RFID タグ ID、バーコード情報等)をサーバへ送信・照会 サーバからの照合結果(OK/NG 判定、ピッキング指示等)を受信し、画面表示・音声発報
在庫管理サーバ またはピッキング管理サーバ	1 台	<ul style="list-style-type: none"> スキャンデータを受信し、在庫情報との照合結果を即時応答 入在庫履歴・ピッキング実績の記録

③ 通信への要求

各通信の要件を以下に示す。スキャン操作による読み取り照会とその応答がイベントトリガー型で発生する通信であり、普段は無通信状態が続く。

照会・応答および入出庫記録のデータが欠落することは業務上許容されないため、信頼性の確保も求められる。なお、入出庫処理がゲート通過型の場合、処理遅延がスループットに直結するため、遅延要件の充足が特に重要となる。

表 87 本ケース(工場内の設備や備品及び資産管理(部品管理・在庫管理・資産管理))における通信への要求

通信	方向	送信タイミング	許容遅延
読み取り照会 (端末→サーバ)	UL	スキャン操作時	スキャンから応答表示まで 200 ミリ秒以内(初送遅延を含む)
照会応答 (サーバ→端末)	DL	照会受信後即時	上記に含む
入出庫データ送信 (端末→サーバ)	UL	タグ読み取り後	タグ読み取りから処理完了まで 200 ミリ秒以内
入出庫処理応答 (サーバ→端末)	DL	データ受信後即時	上記に含む

(2) 現場において発生しやすい現象



① 事前評価

本格導入の前にテスト環境を構築し、L5G の通信性能を評価した。テストでは、3 台のハンディターミナルを用いてスキャン応答の遅延を確認した。テスト担当者が連続してスキャン操作を行ったところ、結果は良好だった。スキャンからサーバ応答まで 80 ミリ秒程度に収まり、既存の Wi-Fi 環境と同等以上の性能が確認できた。この結果を受け、本格導入を決定した。

② 実運用時に発生した現象

本格導入後、以下の現象が発生した。

現象：しばらく通信がない状態からのスキャンで遅延が発生

事前評価では 80 ミリ秒程度だった遅延が、作業間隔が 1 分程度空いた後にスキャンを実施すると 200 ミリ秒以上、場合によっては 1 秒程度に増大した。連続スキャン時には大きな遅延は発生しないが、作業の合間(移動、棚探し等)を挟んだ後に初送遅延が発生した。

表 88 現象 - 通信休止後の初送遅延による影響

影響箇所	具体的な影響
作業効率	・ 応答待ちが発生し、作業効率が低下。
ピッキング精度	・ NG 音を聞かずに次へ進むことで、誤ピッキングが増加。
入出庫処理	・ ゲート通過時の処理遅延により、入出庫ゲートでの処理滞留が発生。

(3) 影響を与えていると考えられる標準パラメータ



(2)の現象を踏まえ、調査した結果、以下の事実が確認された。

- ・ 連続してスキャン操作を行っている間は遅延に問題がない。
- ・ しばらく通信がない状態からの1回目のスキャンで遅延が発生する。

これらの傾向から、無通信状態が続いた後の接続再確立に要する時間が主因と考えられる。以下に、影響を与えていると考えられる標準パラメータを示す。

① 影響を与えていると考えられる標準パラメータ：RRC 切断タイマー

(ア)理由

5G/L5G では、端末と基地局の間でデータを送受信するために RRC 接続と呼ばれる接続状態を確立する必要がある。RRC 切断タイマーは、端末が一定時間無通信の状態になった場合に、この RRC 接続を自動的に切断するまでの時間を規定するパラメータである (RRC 切断タイマーの詳細は 3-2(5)①RRC 切断タイマー(P44)を参照)。なお、RRC 切断後の状態を RRC Idle 状態と呼ぶ。一般的な設定値は数十秒程度であるが、機器により異なる。

本ケースのようなイベントトリガー型の通信では、スキャン操作の間に移動や棚探し等の無通信期間が生じるため、手持ちの端末の RRC 切断タイマーが満了して RRC Idle 状態に遷移しやすく、それにより初送遅延が生じる。

表 89 RRC 切断タイマーによる初送遅延の要因整理

要因	内容
RRC Idle 遷移による初送遅延	・ RRC Idle 状態からデータを送信するには RRC 接続の再確立手順が必要となり、これに数百ミリ秒～1 秒の時間がかかる。この時間が初送遅延として現れる。

(イ)簡易的な確認方法

RRC 切断タイマーの影響が疑われる場合、以下の方法で簡易的に切り分けができる。

表 90 RRC 切断タイマーの影響が疑われる場合の簡易的な確認方法

確認方法	内容	結果の見方
無通信後と連続操作時の応答速度の比較	・ しばらく操作していない状態からスキャンした場合と、連続してスキャンした場合で、応答の速さを体感で比較する。	・ 無通信後の1回目のスキャンで明らかに応答が遅く、連続スキャン時は速い場合、RRC 再接続が初送遅延の原因と考えられる。

(4) 標準パラメータの状況を把握する方法



(3)で挙げた標準パラメータ(RRC 切断タイマー)が実際に遅延増大の原因となっているかを確認するため、以下の測定を行う。

① 測定：初送遅延の分布の確認

本測定では、無通信時間を段階的に変化させながら通信を実行し、応答時間の変化から RRC 切断タイマーの設定値と初送遅延の発生タイミングを把握する。特別な測定機器は不要であり、L5G に接続された端末があれば実施可能である。

(ア)目的

RRC Idle 状態からの初送遅延の大きさと発生タイミングを把握し、RRC 切断タイマーの設定値を推定する。

(イ)手順

L5G に接続された端末(テスト用端末等)を用意し、以下の手順で実施する。

表 91 初送遅延の分布の確認手順

ステップ	内容
1	・ 端末を一定時間無通信状態にする(RRC Idle 状態に遷移するのを待つ)。
2	・ 無通信時間を段階的に伸ばしながら(例：10 秒、30 秒、60 秒、3 分)イベント(Ping など)を発生させ、応答到達までの時間を測定する。

(ウ)得られる情報

この測定から以下の情報が得られる。

- ・ RRC 切断タイマーの設定値(推定値)
- ・ RRC 接続維持状態と未接続状態の遅延差

(エ)結果の例

(イ)の試験手順で取得した結果から、以下のパターンで判断できる。

表 92 初送遅延の分布の結果パターンと見方

結果のパターン	結果の見方
Ping 送信間隔が一定値を超えた時点で応答時間が急増	<ul style="list-style-type: none"> ・ RRC 切断タイマーがその時間付近に設定されている可能性が高い。 ・ RRC Idle 遷移後の再接続が初送遅延の原因である。
Ping 送信間隔にかかわらず応答時間が一定(数十ミリ秒程度)	<ul style="list-style-type: none"> ・ RRC 切断タイマーが十分に長い、または RRC 接続が維持されている可能性が高い。 ・ 初送遅延はRRC再接続以外の原因によって生じている可能性がある。

以下に取得した結果例を示す。下図の例は、Ping 間隔を 5 秒、10 秒、30 秒、60 秒、70 秒、80 秒、90 秒と段階的に伸ばしながら平均応答時間を取得した結果である。

Ping 送信間隔が 60 秒以下の場合、平均応答時間は 30～34 ミリ秒程度で安定している。一方、70 秒以上になると平均応答時間が 240 ミリ秒前後に急増している。本結果の場合、60 秒～70 秒の間で RRC 切断タイマーが満了し、RRC Idle 状態に遷移していることが確認できる(表 92 の 1 つ目のパターンに該当)。

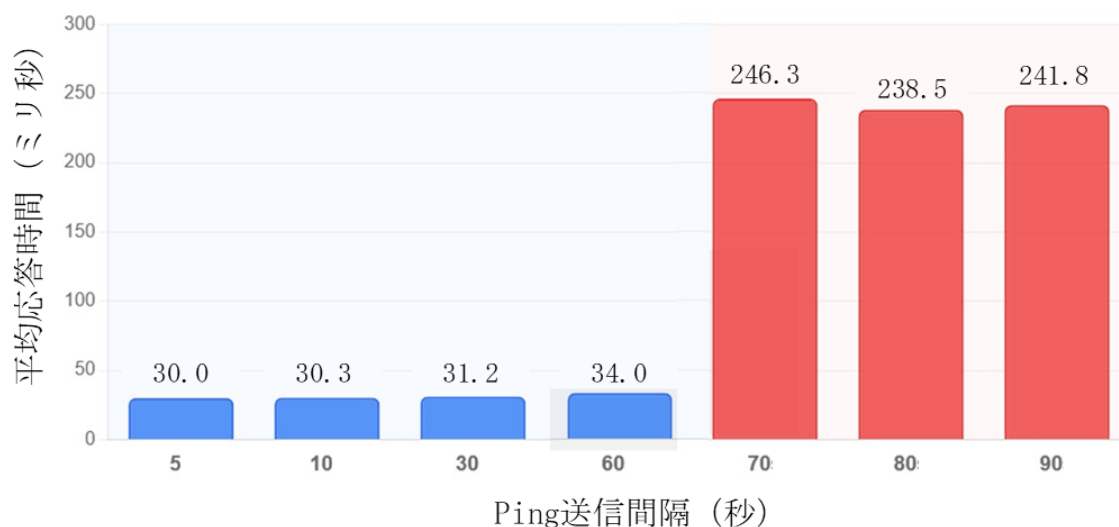


図 30 初送遅延の分布結果の例

(5) 対応方法



① 対応の考え方

まず、(4)の測定結果から RRC 切断タイマーの満了による初送遅延が原因であることを確認した上で、対応を検討する。

ただし、初送遅延を解消するために RRC 切断タイマーを長く設定する、または RRC 接続を維持し続けると、同時接続数が増加し、基地局の最大同時接続数の上限に達する可能性がある。このため、初送遅延と最大同時接続数のトレードオフを考慮した設計が必要となる。

最大同時接続数はシステムによって異なるため、通信機器提供事業者やシステム構築事業者への問い合わせにより確認可能である。もし、明確な回答が得られない場合は、実際に使用する端末を 1 台ずつ追加接続していき、全台が同時に接続・通信できる状態になるかを確認することで、上限に達しているかどうかを判断できる。全台が同時接続でき通信可能な場合、最大同時接続数はそれよりも大きいと判断可能である。

このトレードオフを踏まえ、以下の表に従って対応方法を選択する。

対応方法 1：RRC 切断タイマーの調整【標準パラメータの調整】

RRC 切断タイマーを延長することで、RRC Idle 遷移を抑制し、初送遅延を解消する。ただし、基地局の設定変更が必要であり、かつ全端末に影響が及ぶため、適用できる場面が限られる。

対応方法 2：接続維持用の定期通信の送信【標準パラメータの調整以外の手段】(推奨)

端末側で個別に対応可能であるため、まずは本対応方法を推奨する。周期的に接続維持用の定期通信を送信することで、RRC 切断タイマーの満了を防ぎ、RRC 接続を維持する。対応方法 1 と併用することで、定期通信の送信間隔を長くでき、端末側の負荷を軽減できる。

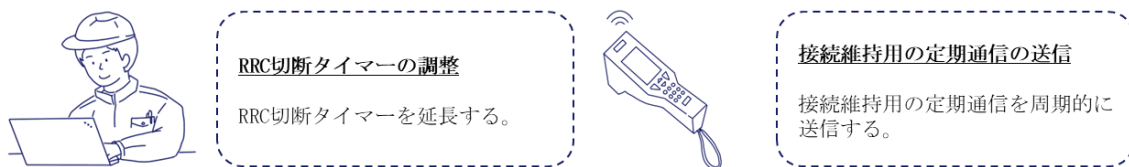


図 31 対応方法

なお、対応方法 2 の適用範囲は、最大同時接続数の余裕度合いに応じて以下のとおり判断する。

表 93 同時接続数の余裕度合いに応じた対応方法の選択

状況	対応方法
最大同時接続数に余裕がある場合 (上限の 50%以下など)	・ 対応方法 2(接続維持用の定期通信の送信)を全端末に適用する。
最大同時接続数に余裕がない場合 (上限の 70%以上など)	・ 対応方法 2 を遅延要求の厳しい端末(ピッキング、入在庫ゲート等)のみに適用する。

② 対応方法 1：RRC 切断タイマーの調整【標準パラメータの調整】

(ア)目的

基地局設定の変更が可能な場合に、RRC 切断タイマーを延長することで、RRC Idle 遷移を抑制し、初送遅延を解消する。

(イ)設定内容

基地局の RRC 切断タイマーを延長する。

(ウ)設定値の決め方

RRC 切断タイマーを長くしすぎると同時接続数が増加し、基地局無線リソースを占有する。また、RRC 切断タイマーはすべての端末に適用されるため影響範囲が広い。

端末の通信タイミングと RRC 切断タイマーから同時刻に RRC 接続状態となる端末台数を推定し、基地局の最大同時接続数の上限に対してマージンを持った設定値にすることが推奨される。以下の手順で設定値を決定する。

表 94 RRC 切断タイマーの延長における設定値の決め方

ステップ	実施事項	内容
1	作業パターンの把握	<ul style="list-style-type: none">作業者のスキャン間隔の実績を把握し、無通信時間の分布を確認する。
2	RRC 切断タイマーの設定値の仮設定	<ul style="list-style-type: none">無通信時間の大部分をカバーできる RRC 切断タイマーの設定値を仮設定する。
3	同時接続数の推定	<ul style="list-style-type: none">仮設定した RRC 切断タイマーの設定値で同時刻に RRC 接続状態となる端末台数を推定し、基地局の最大同時接続数の上限に対して余裕があることを確認する。上限を超える場合はステップ 2 に戻り、RRC 切断タイマーの設定値を短くして再度推定する。

(エ)設定が適切かを確認する方法

RRC 切断タイマーの延長後、初送遅延が目標値以内に改善し、同時接続数の上限にも余裕があることを以下の手順で確認する。

表 95 RRC 切断タイマーの設定が適切かを確認する方法

ステップ	実施事項	内容
1	初送遅延の測定	・ (4)①(P93)と同じ手順で、RRC 切断タイマーの設定値変更後の初送遅延を測定する。
2	遅延改善の確認	・ 変更前後の遅延を比較し、RRC 再接続に起因する初送遅延が改善されていることを確認する。
3	同時接続数の確認	・ 同時接続数を確認し、タイマー延長に伴う同時接続数の増加が上限に対して十分な余裕をもって収まっていることを確認する(目安の例：上限の 80%以下など、環境に応じて適切な閾値を設定する)。
4	他端末への影響確認	・ タイマー延長はすべての端末に適用されるため、他端末に新規接続失敗や既存接続の切断が発生していないことを確認する。

■ 判定基準(例)

以下の基準(例)を目安として、対応の効果を判定する。

表 96 RRC 接続維持が適切かを確認する際の判定基準(例)

項目	目標値	許容値
初送遅延	500 ミリ秒以内 (遅延要求の厳しい端末)	1 秒程度 (遅延要求の緩い端末)
同時接続数	上限の 70%以下	上限の 80%以下
他の端末への影響確認	新規接続失敗や既存接続の切断が発生しないこと	—

③ 対応方法 2：接続維持用の定期通信の送信【標準パラメータの調整以外の手段】（推奨）

（ア）目的

周期的に接続維持用の定期通信を送信することで、RRC 切断タイマーの満了を防ぎ、RRC 接続を維持する。これにより、イベント発生時の初送遅延を解消する。

（イ）設定内容

各ハンディターミナルから、スキャン操作の合間に接続維持用の定期通信を周期的に送信する。

表 97 接続維持用の定期通信の設定例

項目	内容
データ内容	定期通信信号
プロトコル	UDP
送信先	在庫管理サーバまたはピッキング管理サーバ

（ウ）設定値の決め方

接続維持用の定期通信により全ハンディターミナルが RRC 接続を維持し続けると、最大同時接続数の上限に達する可能性がある。また、ハンディターミナルすべてに一律で適用すると帯域への影響も生じうる。①で示したとおり、最大同時接続数の余裕度合いに応じて適用範囲を判断した上で(表 93 参照)、以下の手順で効果と最大同時接続数のバランスを確認しながら設定を進める。

表 98 接続維持用の定期通信による RRC 接続維持における設定値の決め方

ステップ	実施事項	内容
1	定期通信間隔の設定	・ (4)①(P93)の結果を踏まえ、RRC 切断タイマーが満了しない間隔で設定する(例：タイマー10 秒の場合、間隔5 秒)。
2	データサイズの設定	・ データサイズは最小限(数十バイト)とする。
3	適用端末の選定	・ 最大同時接続数に余裕がない場合や上限を超える場合は、優先度の高い端末のみに適用する。

(エ) 設定が適切かを確認する方法

定期通信の適用後、初送遅延が目標値以内に改善し、最大同時接続数の上限にも余裕があることを確認する。

表 99 接続維持用の定期通信による RRC 接続維持が適切かを確認する方法

ステップ	実施事項	内容
1	初送遅延の測定	<ul style="list-style-type: none"> ・ (4)①(P93)と同じ手順で、定期通信適用前後の初送遅延を測定する。
2	遅延改善の確認	<ul style="list-style-type: none"> ・ 定期通信適用前後の遅延を比較し、初送遅延が解消されていることを確認する。
3	同時接続数の確認	<ul style="list-style-type: none"> ・ 同時接続数を確認し、定期通信追加による接続数の増加が例えば最大同時接続数の上限の 80%以下に収まっていることを確認する。
4	他端末への影響確認	<ul style="list-style-type: none"> ・ 定期通信を適用していない端末(他のイベント端末や AGV 等)に新規接続失敗や既存接続の切断が発生していないことを確認する。

■ 判定基準(例)

②(エ)と同様の基準(例)で判定するため、内容を参照いただきたい。

(6) 同様の対応が有効なユースケース



本節で示した対応方法(RRC 切断タイマーの調整、接続維持用の定期通信の送信)は、本ケースと同様の通信特性を持つユースケースに対しても有効である。以下に、適用できる条件とユースケース例、適用時の留意点を示す。

① 本節の内容が適用できる条件

本節の対応が有効なのは、以下の条件を満たすケースである。いずれも本ケースと共通する特徴であり、同じ仕組みで初送遅延が発生しやすい環境といえる。

表 100 本節の内容が適用できる条件

条件	内容	本ケースでの該当例
通信パターン	イベントトリガー型の通信で、操作直後に即応答が必要だが、発生頻度は不定期である	スキャンから応答表示まで 200 ミリ秒以内
無通信時間	無通信時間が存在する	移動・棚探し・荷物整理等の合間が存在

② ユースケース例

上記の条件を満たすユースケース例を以下に示す。なお、カメラ映像を用いた現場モニタリング(稼働監視)のように高頻度・連続的に通信が行われるケースでは、RRC 切断タイマーが満了する前に次の通信が発生するため、RRC Idle 状態への遷移が起こらず初送遅延の問題が生じない。同様に、機械に関する動作制御・遠隔操作のような周期的に通信が行われるケースでも、通信間隔が RRC 切断タイマーより十分に短いため RRC 接続が維持される。これらのケースには本節の対応は不要である。

表 101 本節の対応方法が有効なユースケース例

ユースケース例	概要
製品数カウント等	<ul style="list-style-type: none"> ・ 作業者が製造ラインのワーク数や完成品数をカウント端末で断続的にカウント・記録するケース。 ・ カウント操作の合間に無通信時間が生じ、RRC Idle 遷移による初送遅延が作業滞留を招くため、本節の対応が有効である。
検査データの取得・書き込み(映像含む)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 検査装置から数値データや画像を取得・書き込みするケース。 ・ 検査対象の入れ替えや段取り替えの間に無通信時間が生じ、検査再開時の初送遅延が検査スループットの低下につながるため、本節の対策が有効である。

③ 適用時の留意点

本節の内容を適用する際は、以下の点に留意いただきたい。

表 102 本節の内容を適用する際の留意点

留意点	内容	対策の例
作業パターンの変化への対応	<ul style="list-style-type: none"> ・ RRC 切断タイマーの延長や定期通信の送信間隔は、現在の作業パターンに基づいて設定する。 ・ しかし、作業パターンの変化(スキャン間隔の変動、作業フローの変更等)により無通信時間の分布が変わり、初送遅延が再発する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 作業ログの分析により無通信時間の分布を定期的に把握し、RRC 切断タイマーの調整や定期通信間隔に反映する。
最大同時接続数の上限の管理	<ul style="list-style-type: none"> ・ RRC 切断タイマーの調整や定期通信の送信により全端末の RRC 接続を維持している状態で、端末の追加や AGV/フォークリフト端末など他の L5G 機器を導入すると、最大同時接続数の上限に達する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 端末追加時には最大同時接続数の余裕を再確認する。 ・ 遅延要求の厳しい端末(ピッキング、入在庫ゲート)と緩い端末(棚卸し等)を分類し、前者を優先的に RRC 接続維持の対象とする。

4-6 安全管理・品質に関連するケース：カメラ映像を用いた現場モニタリング（稼働監視）

本ケースでは、以下の標準パラメータを扱う。各パラメータの詳細は3章の該当箇所を参照いただきたい。

表 103 4-6 節で扱う標準パラメータ

標準パラメータ	概要	3章の参照先
MCS	<ul style="list-style-type: none">変調方式と符号化率の組合せにより、1回の送信に詰め込む情報量を定める。	3-2(1)① (P12)

(1) 概要・前提



① 想定する状況

ある自動車部品の製造工場では、製品検査と工程監視のため、製造ラインに10台のカメラを設置し、L5Gで映像を管理室へ伝送するシステムを導入していた。

本格導入の前にテスト環境を構築し、3台のカメラで動作確認したところ問題なく動作した。この結果を受け、計画どおり10台のカメラを導入し、本番運用を開始することとなった。

しかし、10台への展開を進めたところ、以下の問題が発生した。

- ・ 特定のカメラでブロックノイズが頻発する
- ・ 基地局から離れた位置のカメラで映像品質が低下する
- ・ 動きの多い映像で品質劣化が顕著になる

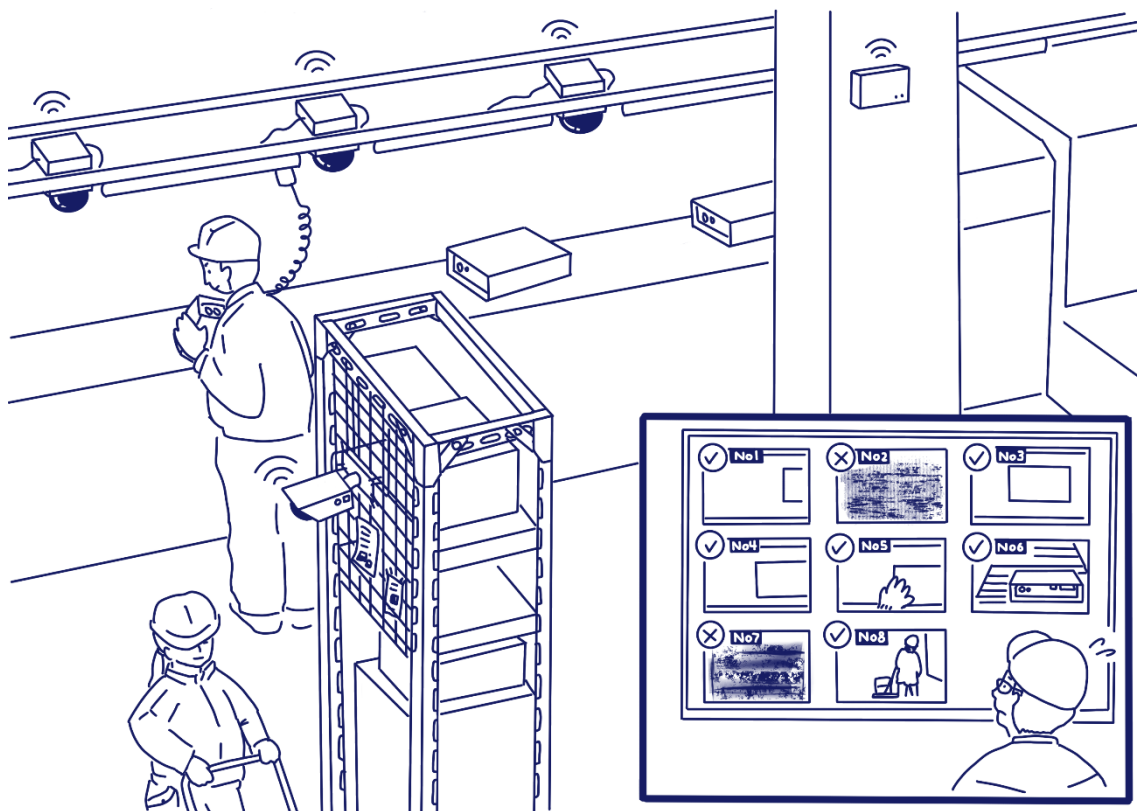


図 32 4-6 節で想定する状況(イメージ)

② 運用の構成

本ケースのシステム構成を以下に示す。製造ライン各工程にカメラを設置し、映像管理システム(VMS)と L5G で接続する構成である。L5G 基地局を製造エリア中央に設置し、1つの基地局で製造エリア全体をカバーしている。

各カメラには 5G 通信モジュールを接続し、ネットワーク側では 5G 対応の産業用ルータをカメラごとに設置し、映像を常時伝送する。管理室ではカメラ映像を同時に表示し、製品外観検査・組立工程確認・異常検知に活用する。

表 104 本ケース(カメラ映像を用いた現場モニタリング(稼働監視))
 で想定する運用の構成

機器	台数・配置	内容
カメラ	10 台(各工程に設置)	<ul style="list-style-type: none"> HD・30fps(約 3Mbps/台)の映像を常時伝送
映像管理サーバ	1 台	<ul style="list-style-type: none"> 10 台のカメラ映像を一元管理 マルチモニタで同時表示、録画・再生

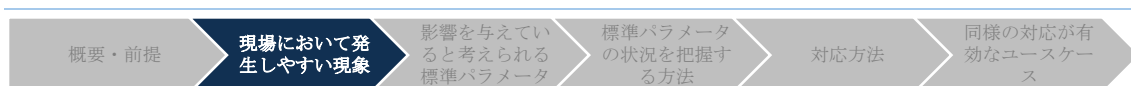
③ 通信への要求

各通信の要件を以下に示す。10台のカメラから常時映像を伝送するため、ULの帯域が通信量の大部分を占める。カメラ1台あたり約3Mbps、10台で約30Mbpsの帯域が必要となる。

表 105 本ケース(カメラ映像を用いた現場モニタリング(稼働監視))
における通信への要求

通信	方向	帯域	許容遅延
映像伝送 (カメラ→サーバ)	UL	10台で約30Mbps マージン1.5倍で約 45Mbps程度を確保	表示遅延:1秒以内(リアルタイム監視) AI検査連携時:500ミリ秒以内 が望ましい

(2) 現場において発生しやすい現象



① 事前評価

本格導入の前にテスト環境を構築し、L5Gの通信性能を評価した。テストでは、3台のカメラを設置し、HD・30fps(約3Mbps)の映像伝送を確認した。結果は良好だった。映像は滑らかに伝送され、ブロックノイズもなく、遅延は500ミリ秒程度に収まっていた。テスト結果は問題なし。計画どおり10台のカメラを導入し、本番運用を開始することとなった。

② 複数台運用時に発生した現象

10台への展開を進めたところ、以下の現象が発生した。

現象1: 特定カメラの映像にブロックノイズが発生

10台中2~3台のカメラでブロックノイズが頻発した。他のカメラは正常であり、時間帯や作業員の配置により変動が見られた。

表 106 現象1 - ブロックノイズによる影響

影響箇所	具体的な影響
品質検査	・ 製品の傷が確認できず、品質検査業務に支障。
録画映像	・ 録画映像の品質が劣化し、後からの確認が困難。

現象2：場所によって映像品質の違いが発生

基地局からの距離やカメラ設置場所により、映像品質に差が生じた。基地局から近いカメラはRSRP -85dBm、基地局から遠いカメラや金属製設備の陰になっているカメラはRSRP -105dBmであった。

表 107 現象2 - 映像品質の違いによる影響

影響箇所	具体的な影響
品質検査	・ 電波品質の悪い場所のカメラでは映像の鮮明さが不足し、製品の傷や異常の確認に支障。
録画映像	・ 録画映像の品質が劣化し、後からの確認が困難。

現象3：動きの多い映像で品質劣化発生

静止状態(設備停止中)では高品質であったが、作業員が動いている場面ではブロックノイズが増加し、製品が高速で流れる場面ではコマ落ちが発生した。

表 108 現象3 - 映像の品質劣化による影響

影響箇所	具体的な影響
品質検査	・ 高速で流れる製品の外観確認ができず、検査精度が低下。
異常検知	・ 作業員の動作が正確に捉えられず、異常検知の信頼性が低下。

(3) 影響を与えていると考えられる標準パラメータ



(2)の現象を踏まえ、状況を確認した結果、以下のことが確認できた。

- ・ カメラ個別では正常動作しており、機器故障ではない。
- ・ 電波品質(RSRP)が低い場所で問題が顕在化している。
- ・ 動きの多い映像(ビットレートが増加するシーン)で劣化が顕著になる。

これらの傾向から、フェージングに伴う無線伝送効率の変化が主因と考えられる。以下に、影響を与えていると考えられる標準パラメータを示す。

① 影響を与えていると考えられる標準パラメータ：MCS (Modulation and Coding Scheme)

(ア)理由

5G/L5G では、電波品質に応じて MCS が自動調整される。電波品質が良いときは高い MCS (高速だが誤りに弱い) が選択され、電波品質が悪いときは低い MCS (低速だが誤りに強い) が選択される。一般的なデフォルト設定では MCS 上限は 28 で設定されている (MCS の詳細は 3-2(1)①MCS (P12) を参照)。

工場などの電波環境では、人の動き、金属製の各種機器の配置変更、他の無線通信機器からの干渉などにより電波品質が刻々と変動する。この変動に追従して MCS も頻繁に変更されるが、MCS が高い状態で電波品質が急に低下すると、送信中のデータの一部が正しく届かなくなる。映像データの場合、このパケットロスがブロックノイズ(映像の一部がモザイク状に乱れる現象)やコマ落ち(映像が一瞬止まる現象)として現れる。

具体的には以下の要因により問題が発生していると考えられる。

表 109 MCS 変動による映像品質劣化の要因

要因	内容
電波品質が低い場所での帯域不足	<ul style="list-style-type: none"> 基地局から遠い、または金属設備の陰になる場所では、実効 MCS が低くなり、実効スループットが低下する。それによって、映像伝送に必要な帯域を確保できなくなる。
電波品質変動に伴う MCS 変動	<ul style="list-style-type: none"> 工場内の電波環境変動により、実効 MCS が高い値と低い値の間を頻繁に行き来する。 実効 MCS が変わる際に一時的な品質低下が発生し、映像のブロックノイズやコマ落ちとして現れる。

(イ)簡易的な確認方法

MCS の影響が疑われる場合、以下の方法で簡易的に切り分けができる。

表 110 MCS の影響が疑われる場合の簡易的な確認方法

確認方法	内容	結果の見方
場所による映像品質の違い確認	<ul style="list-style-type: none"> 基地局に近いカメラと遠いカメラの映像品質を目視で比較する。 	<ul style="list-style-type: none"> 基地局から遠いカメラの映像品質のみが劣化している場合、電波品質が低い場所での帯域不足が原因と考えられる。

確認方法	内容	結果の見方
動きの多い場面での映像品質の確認	・ 静止状態(設備停止中等)と動きの多い場面(作業員の動作、製品の搬送等)で映像品質を目視で比較する。	・ 動きの多い場面でのみブロックノイズやコマ落ちが発生する場合、電波品質変動に伴うMCS変動が原因と考えられる。

(4) 標準パラメータの状況を可視化する方法



(3)で挙げた標準パラメータ(MCS)が実際に映像品質劣化の原因となっているかを確認するため、以下の測定を行う。

① 測定1：RSRPの違いによるスループットへの影響の可視化

(3)で挙げた標準パラメータ(MCS)の調整にあたり、MCS上限を下げた場合にセルスループット(1つの基地局が提供できる総通信容量)がどの程度低下するかを事前に把握する必要がある。カメラの所要スループット × 台数が基地局の最大スループットを超えると映像が送れなくなるため、MCS調整前にどの程度の帯域余裕があるかを確認する。

(ア)目的

各カメラ設置場所の電波品質(RSRP)と実効スループットの関係性を把握し、MCS上限を下げた場合の帯域余裕を確認する。

(イ)手順

各カメラ設置場所でRSRPとスループットをそれぞれ測定する。RSRPの測定には端末ログ取得ツールまたは測定用端末を使用し、スループットの測定にはiperf等のツールを使用する。

表 111 RSRPとスループットの関係の確認手順

ステップ	内容
1	・ 各カメラ設置場所でRSRPを記録する。
2	・ 各RSRP条件下でスループットを測定する。 ・ 良好な場所(RSRP -85dBm程度)と悪い場所(RSRP -105dBm程度)の両方で測定する。

(ウ)得られる情報

この測定から以下の情報が得られる。

- ・ RSRP とスループット/MCS の関係
- ・ 帯域マージンの有無

(エ)結果の例

取得したデータから、横軸を RSRP、縦軸をスループット/MCS としてグラフ化し、セル全体での性能特性を把握する。以下のパターンで判断できる。

表 112 RSRP とスループット/MCS の関係の結果パターンと見方

結果のパターン	結果の見方
RSRP が高いとスループット/MCS が高くなり、逆に低くなるとどちらも低くなる	<ul style="list-style-type: none">・ 電波品質に応じて MCS が調整されている。・ RSRP が低い場所では MCS の変動が大きく、スループットが不安定になっている。
MCS 上限を下げるとスループット上限が制限されるが、RSRP の低い場所での MCS 変動が抑えられる	<ul style="list-style-type: none">・ MCS 上限を下げることによって MCS 変動が抑制され、スループットが安定する。ただし、最大スループットも低下するため、必要総帯域を確保できるかの確認が必要である。

以下に、MCS 上限を 28、15、8 の 3 条件で、RSRP に対する UL スループットおよび MCS を測定した結果の具体例を示す。

図 33 の左に示すとおり、MCS 上限が 28(青)の場合、RSRP が-85dBm 程度の電波品質が高い場所ではスループットが最大 130Mbps 程度得られている。RSRP が-105dBm 以下の場合ではスループットが大きくばらつき不安定となっている。図 33 の右に示すとおり、RSRP の変動に応じて、MCS が 17~28 の間で変動しており、この MCS 変動がスループットの不安定さの原因であることが確認できる(表 112 の 1 つ目のパターンに該当)。

一方、MCS 上限が 15(緑)の場合、図 33 の左グラフではスループットは 60Mbps 程度に制限されるが、RSRP が低い場所でもスループットのばらつきが小さくなっている。図 33 の右グラフでも MCS が 13~15 の間で安定していることが確認できる。また、MCS 上限が 8(赤)の場合、図 33 の左グラフではスループットが 25Mbps 程度に制限されるが、RSRP が低い場所でもスループットが安定しており、図 33 の右グラフでも MCS が 8 付近でほぼ一定に保たれている(表 112 の 2 つ目のパターンに該当)。

なお、本ケースではカメラ 10 台で必要総帯域が 45Mbps 程度(3Mbps/台×10 台×マージン 1.5)であるため、MCS 上限 8(25Mbps 程度)ではスループットが不足するが、MCS 上限 15(60Mbps 程度)であれば必要総帯域を確保できる。

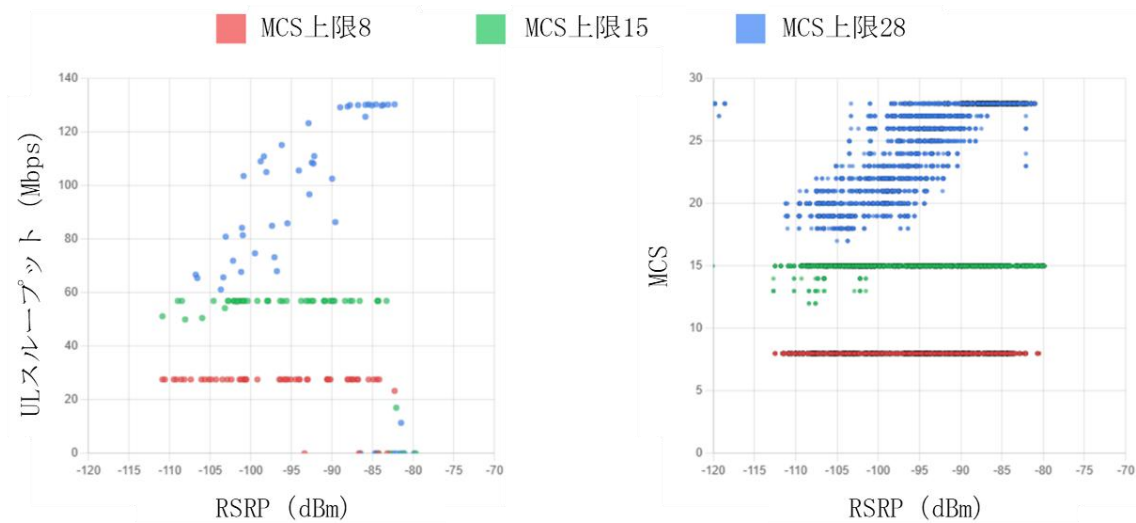


図 33 MCS 上限ごとの RSRP に対する UL スループットおよび MCS の関係

② 測定 2 : MCS 変動と映像品質の関係の可視化

(ア)目的

MCS の選択パターンと映像品質の関係を把握し、MCS 上限制限の効果を予測する。

(イ)手順

端末ログ取得ツールおよび VMS の統計機能を用いて、MCS と映像品質の時系列データを取得する。

表 113 MCS 変動と映像品質の関係の確認手順

ステップ	内容
1	・ 端末ログ取得ツールで各カメラの MCS 値を時系列で記録する。
2	・ VMS の統計機能または専用ツールを用いて、ビットレート・フレームレート・パケットロス率、遅延時間を記録する。

(ウ)得られる情報

この測定から以下の情報が得られる。

- ・ 各カメラの MCS 分布(平均値、標準偏差)
- ・ MCS 変動が大きいカメラの特定
- ・ MCS 低下と映像品質低下の相関の強さ

(エ)結果の例

取得したデータから、MCS 変動と映像品質変動のタイミングを比較し、高 MCS 使用時に品質が不安定かを確認する。以下のパターンで判断できる。

表 114 MCS 変動と映像品質の関係の結果パターンと見方

結果のパターン	結果の見方
MCS 上限が高い場合、MCS 変動が大きく突発的な遅延が発生する	・ MCS が高い状態で電波品質が急に低下した際に、送信中のデータの一部が正しく届かなくなっている。MCS 変動が映像品質劣化の原因であると考えられる。
MCS 上限を低くすると、MCS 変動が安定し、突発的な遅延は低減する	・ MCS 上限を下げることで MCS 変動が抑制され、映像品質が安定する。MCS 上限の制限が有効な対策であると考えられる。

以下に取得した結果例を示す。下図の例は、RSRP -105 dBm 程度の場所で端末を揺らす(フェージング)ことでMCSが変動しやすい環境を作り、iperf UL(映像データ送信の代替)とPing(遅延時間測定用)通信を同時に行った結果である。

図 34 左側(MCS 上限 28)の上段グラフ(MCS 分布)を見ると、MCS が4~25の間で大きくばらついていることが確認できる。同じく左側の下段グラフ(遅延分布)を見ると、MCS が変動するタイミングで遅延が100 ミリ秒以上に達する突発的な遅延が頻繁に発生している(表 114 の1つ目のパターンに該当)。

一方、図 34 右側(MCS 上限 8)の上段グラフ(MCS 分布)を見ると、MCS が8付近でほぼ一定に保たれていることが確認できる。同じく右側の下段グラフ(遅延分布)を見ると、遅延が概ね40 ミリ秒以下で安定しており、MCS 上限 28 で見られたような突発的な遅延がほぼ発生していない(表 114 の2つ目のパターンに該当)。

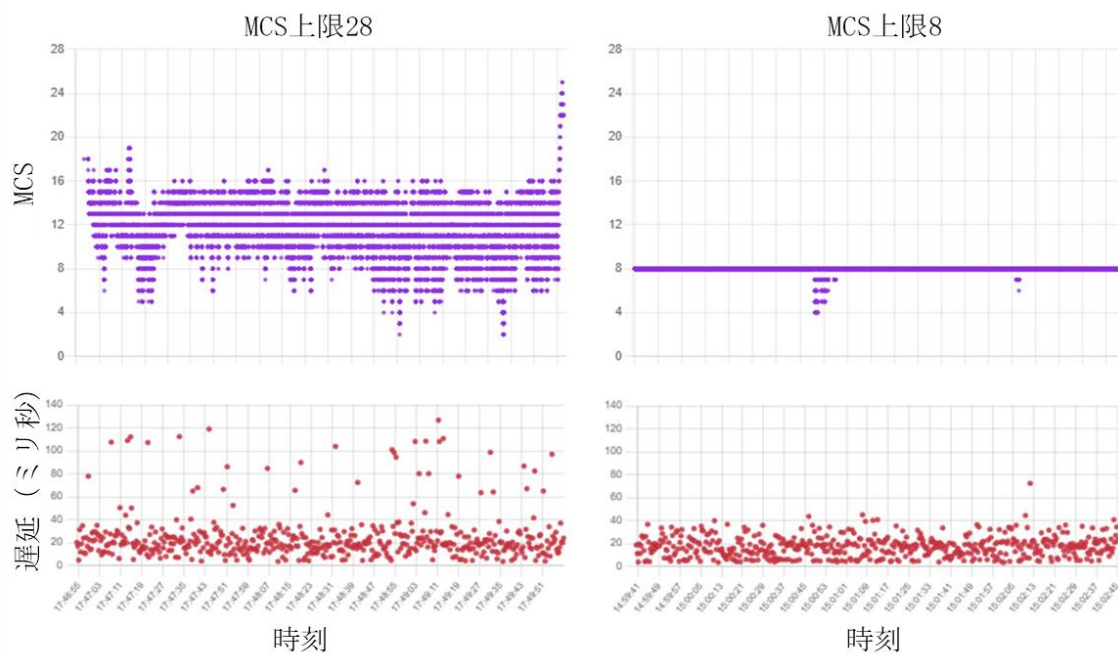


図 34 MCS 上限 28, 8 の MCS 分布と遅延分布結果例

(5) 対応方法



① 対応の考え方

工場などの電波環境の改善にあたっては、アンテナ追加やリピーター設置などの物理的改善が考えられるが、設置場所の制約や予算の制約により実施が困難な場合が多い。

このような状況では、まず MCS 上限を下げることで電波変動に対する耐性を強化し、映像品質の安定化を図る。

対応方法 1：MCS 上限の設定値の調整【標準パラメータの調整】

MCS 上限を制限することで、電波品質が変動しても安定した通信を維持し、映像品質を改善する。

対応方法 2：映像ビットレートの調整【標準パラメータの調整以外の手段】

対応方法 1 だけではセルスループットが不足する場合に、映像ビットレートを低減して必要帯域を削減し、通信の安定性を向上させる。



図 35 対応方法

なお、MCS 上限を下げるとセルスループットも低下するため、帯域状況に応じて以下のとおり対応方法を選択する。

表 115 MCS 上限値制限後の帯域状況に応じた対応方法の選択

状況	対応方法
MCS 上限値の制限後もセルスループットが必要総帯域を上回る場合	・ 対応方法 1 のみで対応する。
MCS 上限値の制限後にセルスループットが必要総帯域を下回る場合	・ 対応方法 1 に加え、対応方法 2 を併用する。

② 対応方法 1：MCS 上限の設定値の調整【標準パラメータの調整】

(ア)目的

MCS 上限を制限することで、電波品質が変動しても安定した通信を維持し、映像品質を改善する。

(イ)設定内容

基地局で MCS 上限の設定値を設定する。

表 116 MCS の上限値の設定例

状況	MCS の上限
変更前	28(デフォルト)
変更後	15, 8 など(電波環境に応じて調整)

(ウ)設定値の決め方

MCS 上限の設定値を下げすぎるとセルスループットが不足する。まず(4)①の測定結果をもとに帯域余裕を確認した上で、段階的に MCS 上限の設定値を調整する。帯域が不足する場合は、対応方法 2(映像ビットレートの調整)を併用する。

表 117 MCS 上限の設定値の決め方

ステップ	実施事項	内容
1	必要総帯域の算出	・ カメラの必要総帯域(所要スループット × 台数 × マージン)を算出し、セルスループットが上回ることを確認する。
2	MCS 上限の初期値の決定	・ (4)①の測定結果(P108)を参照し、必要総帯域を確保できる MCS 上限値を初期値として決定する(例：スループットに余裕がある場合はMCS8、余裕がない場合はMCS15など)。

(エ) 設定が適切かを確認する方法

MCS 上限の設定値の調整後、映像品質が改善し、セルスループットが必要帯域を確保できていることを以下の手順で確認する。

表 118 MCS 上限の設定が適切かを確認する方法

ステップ	実施事項	内容
1	通信品質の確認	・ 端末ログ取得ツールでブロック誤り率(BLER)を測定し、対応前後の BLER を比較する。
2	映像品質の確認	・ ブロックノイズ、コマ落ちの発生頻度を確認し、映像品質が改善されたか確認する。
3	スループットの確認	・ 各カメラのスループットを測定し、必要帯域(所要スループット)を確保できているか確認する。
4	安定性の確認	・ 例えば 24 時間以上などの連続運用で品質を記録し、時間帯による変動がないか確認する。

■ 判定基準(例)

以下の基準(例)を目安として対応の効果を判定する。本ケースでは映像品質の判定が主であり、定量的な閾値は運用要件により異なるため、定性的な基準を示す。

表 119 MCS 上限値の設定が適切かを確認する際の判定基準(例)

項目	基準
映像品質	・ ブロックノイズが発生しないこと ・ フレームレートが設定値を維持すること
スループット	・ 各カメラが所要スループット以上を維持していること。 ・ セル全体で例えば必要総帯域 × 1.2 以上を確保していること。
安定性	・ 24 時間運用で品質が維持されること。 ・ 時間帯による大きな変動がないこと。

③ 対応方法 2: 映像ビットレートの調整【標準パラメータの調整以外の手段】

(ア) 目的

MCS 上限の設定値の調整だけではセルスループットが不足する場合や、電波環境が特に厳しいカメラがある場合に、映像ビットレートを低減して必要帯域を削減し、通信の安定性を向上させる。

(イ) 設定内容

カメラの映像エンコード設定を調整し、送信ビットレートを削減する。

表 120 映像ビットレートの設定例

項目	内容
フレームレート やコーデックの 変更	<ul style="list-style-type: none"> 例えば 30fps→15fps に変更でビットレート約 40～50%削減する。 圧縮率の高いコーデックの採用によりビットレートを削減する。 上記は動きの速い異常検知には影響があるが、静的な監視(設備状態確認など)には十分である。
可変ビットレ ト(VBR)の活用	<ul style="list-style-type: none"> 静的シーンでは帯域を節約、動的シーンでは帯域を増加する。 平均ビットレートを下げつつ重要シーンの品質を維持する。

(ウ) 設定値の決め方

映像ビットレートを下げすぎると監視目的に必要な視認性が損なわれる。以下の手順で、帯域削減と映像品質のバランスを確認しながら設定を進める。

表 121 映像ビットレートの設定値の決め方

ステップ	実施事項	内容
1	必要帯域の確認	<ul style="list-style-type: none"> カメラ台数 × 現在のビットレート × マージン = 必要帯域を算出する。
2	帯域不足分の特定	<ul style="list-style-type: none"> MCS 上制限後のセルスループットと必要帯域を比較し、不足分を特定する。
3	調整方法の選択	<ul style="list-style-type: none"> 帯域削減が小さい場合：フレームレートを調整する(例えば 30fps → 15fps)。 帯域削減が大きい場合：コーデック変更 + フレームレート調整を併用する。
4	AI 検知への影響確認(必要に応じて)	<ul style="list-style-type: none"> AI 検知を行う場合は調整によって検知精度への影響がないかを事前にテストする。

(エ) 設定が適切かを確認する方法

映像ビットレート調整後、映像品質が運用上の許容可能な範囲にあり、通信が安定していることを以下の手順で確認する。

表 122 映像ビットレートの設定が適切かを確認する方法

ステップ	実施事項	内容
1	映像品質の確認	・ ビットレート調整後の映像を目視確認し、監視目的として必要な視認性が維持されているか確認する。
2	スループットの確認	・ 各カメラのスループットを測定し、セルスループットに収まっていることを確認する。
3	安定性の確認	・ 例えば 24 時間以上などの連続運用で品質を記録し、安定性を確認する。

■ 判定基準(例)

以下の基準(例)を目安として対応の効果を判定する。本ケースでは映像品質の判定が主であり、定量的な閾値は運用要件により異なるため、定性的な基準を示す。

表 123 映像ビットレートの設定が適切かを確認する際の判定基準(例)

項目	基準(例)
映像品質	・ 監視目的に必要な視認性が維持されていること(フレームレート低減の場合、動きの速いシーンで検知漏れがないこと)。
スループット	・ 各カメラが調整後の所要スループット以上を維持していること。
安定性	・ 24 時間運用で品質が維持されること。

(6) 同様の対応が有効なユースケース



本節で示した対応方法(MCS 上限値の制限、映像ビットレートの調整)は、本ケースと同様の通信特性を持つユースケースに対しても有効である。以下に、適用できる条件とユースケース例、適用時の留意点を示す。

① 本節の内容が適用できる条件

本節の対応が有効なのは、以下の条件を満たすケースである。いずれも本ケースと共通する特徴であり、同じ仕組みで映像品質の劣化が発生しやすい環境といえる。

表 124 本節の内容が適用できる条件

条件	内容	本ケースでの該当例
通信パターン	高帯域の常時送信(5~15Mbps/台)	HD・30fps(約 3Mbps/台)を常時伝送
電波環境	金属機器が多く変動しやすい	製造ラインに金属製設備が多く存在

② ユースケース例

上記の条件を満たすユースケースの例を以下に示す。なお、定期的な静止画取得のように帯域消費が小さいケースでは、MCS が低下しても映像伝送に必要な帯域を十分に確保できるため、MCS 変動による品質劣化が問題になりにくい。また、少数カメラ(1~3台)で電波環境が良好なケースでは、帯域に十分な余裕があり MCS も安定して高い値が維持されるため、本節の対応は不要である。

表 125 本節の対応方法が有効なユースケース例

ユースケース例	概要
動画像による異常検知	<ul style="list-style-type: none"> 映像解析技術により生産ラインや設備の映像から異常を自動検出するケース。 MCS 変動時の映像品質劣化が検知精度の低下に直結するため、本節の対応が有効である。
カメラを用いた不法侵入者の検知(進入禁止エリア検知含む)	<ul style="list-style-type: none"> 監視カメラと画像解析により立入禁止エリアへの侵入者を自動検出するケース。 映像品質の劣化は検知漏れに直結するため、本節の対応が有効である。

③ 適用時の留意点

本節の内容を適用する際は、以下の点に留意いただきたい。

表 126 本節の内容を適用する際の留意点

留意点	内容	対策の例
電波環境ごとの最適値の違い	<ul style="list-style-type: none">・ MCS 上限値の制限や映像ビットレートの調整は、適用先の電波環境によって最適な設定値が異なる。・ ある環境で有効だった設定値が、別の環境ではスループット不足や品質改善不足となる場合がある。	<ul style="list-style-type: none">・ 適用先ごとに(4)の測定を実施し、電波環境に応じた設定値を決定する。
カメラ台数の増設への対応	<ul style="list-style-type: none">・ MCS 上限値の制限により帯域の余裕が減少するため、カメラの増設時に必要総帯域がセルスループットを上回り、映像品質が再び劣化する可能性がある。	<ul style="list-style-type: none">・ カメラ増設時には必要総帯域を再算出し、MCS 上限値や映像ビットレートの再調整を行う。

5 おわりに

5-1 メッセージ、謝辞

(1) メッセージ

本ガイドラインでは、製造現場で5G/L5G通信のパフォーマンスを向上させるために知っておきたい標準パラメータおよびケース別の調整方法等について、解説を行った。

製造現場の実際の環境等を踏まえたうえで、本ガイドラインも参照いただき、5G/L5G通信のパフォーマンスの向上にお役立ていただきたい。

(2) 著作権体制

著作：国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 半導体・情報インフラ部

受託：PwC コンサルティング合同会社

技術指導：国立研究開発法人 情報通信研究機構 (NICT) 板谷聡子氏、中島健智氏、大堀文子氏

5-2 参考文献

参考文献
3GPP, “Specifications by Series”, https://www.3gpp.org/specifications-technologies/specifications-by-series , (参照 2026-03-02)
服部 武/藤岡 雅宣, “インプレス標準教科書シリーズ 5G 教科書 LTE/IoT から 5G まで”, 株式会社インプレス, 2018
服部 武/藤岡 雅宣, “インプレス標準教科書シリーズ 続・5G 教科書 NSA/SA から 6G まで”, 株式会社インプレス, 2023
サイレックス・テクノロジー株式会社, “5G 携帯のはなし(1)”, https://www.silex.jp/library/blog/20210419-1 , (参照 2026-03-02)
株式会社 NTT ドコモ, “テクニカル・ジャーナル” https://www.docomo.ne.jp/corporate/technology/rd/technical_journal/ , (参照 2026-03-02)
総務省, “ローカル 5G”, 総務省 電波利用ポータル, https://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/system/ml/mobile/local5g/index.htm , (参照 2026-03-13)
Jaeku ryu, “QuickReference - 5G/NR”, Sharetechnote, https://www.sharetechnote.com/html/5G/Handbook_5G_Index.html , (参照 2026-03-01)
“5G NR TOPICS”, Techplayon, https://www.techplayon.com/5gnr/ , (参照 2026-03-01)
Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Skold, “5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology”, Academic Press, 2018
伊藤忠テクノソリューションズ株式会社, “事例・コラム一覧”, CTC-伊藤忠テクノソリューションズ, https://www.ctc-g.co.jp/report/?tag%5B%5D=3 , (参照 2026-03-13)
“5G NR Throughput calculator”, 5G Tools for RF Wireless, https://5g-tools.com/5g-nr-throughput-calculator/ , (参照 2026-03-13)
5GMF White Paper “5G Mobile Communications Systems for 2020 and beyond” 第 1.1 版 - 第 5 世代モバイル推進フォーラム
国立研究開発法人情報通信研究機構, “無線通信を用いた製造システムの導入”, 2020

巻末資料 1 本ガイドラインで使用した用語

用語	解説
3GPP (3rd Generation Partnership Project)	移動通信システムの標準仕様を策定する国際的な標準化団体。本ガイドラインで扱う標準パラメータの技術的根拠となる Technical Specification を公開している。
5GC (5G Core)	5G のコアネットワーク。端末の認証、セッション管理、QoS ポリシーの適用等を担う。
ACK (Acknowledgement)	データが正しく受信できたことを送信側に通知する信号。
AGV/AMR	AGV (Automatic Guided Vehicle) はあらかじめ設定された経路に沿って自動走行する無人搬送車、AMR (Autonomous Mobile Robot) は自律的に周囲の環境を認識し経路を判断して走行する自律走行ロボットの総称。本ガイドラインでは両者をまとめて AGV/AMR と表記する。
AM (Acknowledged Mode)	RLC レイヤの動作モードの一つ。受信確認と再送制御を行い、データの信頼性を確保する。
AMC (Adaptive Modulation and Coding)	電波品質に応じて変調方式と符号化率の組合せ (MCS) を自動的に切り替える仕組み。
BLER (Block Error Rate)	受信したデータブロックのうち、誤りが検出されたブロックの割合。
CBR (Constant Bit Rate)	一定のビットレートでデータを送出する方式。映像エンコード等で使用される。
Configured Grants	UL において、あらかじめ決められた周期で無線リソースを固定的に割り当てる制御機能。送信要求の手順を省略し、遅延を低減する。
CQI (Channel Quality Indicator)	端末が基地局に報告する電波品質の指標。基地局はこの報告をもとに MCS を選択する。
CSI-RS (Channel State Information - Reference Signal)	基地局が端末に送信する参照信号。端末はこの信号を用いて電波品質を測定する。
CU (Central Unit)	5G 基地局の構成要素の一つ。上位レイヤの処理 (RRC 制御、PDCP レイヤ処理等) を担う。
DL (Downlink)	基地局から端末への通信方向。
DU (Distributed Unit)	5G 基地局の構成要素の一つ。下位レイヤの処理 (RLC レイヤ、MAC レイヤ処理等) を担う。

用語	解説
EMC シート	電波を吸収する特性を持つシート状の素材。測定時に端末に装着し、意図的に RSRP を低下させる用途等で使用される。
GBR (Guaranteed Bit Rate)	ネットワークが最低限の通信速度を保証する通信の種類。
IMU (Inertial Measurement Unit)	加速度センサとジャイロセンサを組み合わせた慣性計測装置。ロボットや AGV/AMR の姿勢・動き検出に使用される。
iperf	ネットワークのスループットや遅延等を測定するためのオープンソースの性能測定ツール。
L2 スイッチ	OSI 参照モデルの第 2 層(データリンク層)で動作するネットワークスイッチ。MAC アドレスに基づいてデータを転送する。QoS 機能を持つ製品もある。
LiDAR (Light Detection and Ranging)	レーザー光を用いて周囲の物体との距離や形状を計測するセンサ技術。AGV/AMR の自律走行等に使用される。
MAC レイヤ	無線区間のデータ転送を制御するレイヤの一つ。HARQ による高速再送制御等を担う。
MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)	送信側と受信側の双方で複数のアンテナを用いてデータの送受信を行う技術。空間多重による速度向上やダイバーシティによる信頼性向上を実現する。
NACK (Negative Acknowledgement)	データが正しく受信できなかったことを送信側に通知する信号。
Non-GBR (Non-Guaranteed Bit Rate)	帯域保証を行わない通信の種類。Web 閲覧やファイル転送等の一般的なデータ通信が該当する。
NTP (Network Time Protocol)	ネットワーク上の機器間で時刻を同期するためのプロトコル。
PF スケジューラ	Proportional Fair スケジューラの略。各端末の電波品質と公平性を考慮して無線リソースを配分するスケジューリング方式。
PLC (Programmable Logic Controller)	製造ラインの機器を制御するための産業用制御装置。
QoS (Quality of Service)	通信の優先度や品質を制御する仕組みの総称。
RB (Resource Block)	5G における周波数方向の無線リソースの最小割当単位。
RFID (Radio Frequency Identification)	電波を用いてタグの情報を非接触で読み書きする自動認識技術。

用語	解説
RLC(Radio Link Control)	無線区間のデータ転送を制御するレイヤ。再送制御(AM/UM)やデータの分割・再構成を行う。
RRC(Radio Resource Control)	端末と基地局間の無線接続状態を管理するプロトコル。接続の確立・維持・解放を制御する。
RSRP(Reference Signal Received Power)	端末が受信する基地局からの参照信号の電力。電波品質の指標として使用される。値が大きいほど電波状態が良い。
RU(Radio Unit)	5G 基地局の構成要素の一つ。アンテナに近い部分で無線信号の送受信処理を担う。
SCS(SubCarrier Spacing)	5G における搬送波の周波数間隔。SCS の値によりスロット長や TTI が決まる。
SINR(Signal to Interference plus Noise Ratio)	受信信号の電力と、干渉およびノイズの電力の比。値が大きいほど通信品質が良い。
SPS(Semi-Persistent Scheduling)	DL において、あらかじめ決められた周期で無線リソースを固定的に割り当てる制御機能。
SR(Scheduling Request)	端末が UL データの送信を希望する際に、基地局に対して無線リソース割当を要求する制御信号。
Sub-6GHz 帯	5G で使用される 6GHz 以下の周波数帯の総称。日本のローカル 5G では 4.6~4.9GHz 帯および 28GHz 帯(ミリ波帯)が割り当てられており、Sub-6GHz 帯は前者を指す。
TCP(Transmission Control Protocol)	データの到達保証と順序制御を行う通信プロトコル。パケットロス検知時に送信速度を低下させる性質を持つ。
UDP(User Datagram Protocol)	到達保証を行わない軽量な通信プロトコル。リアルタイム映像や音声通信等に使用される。
UE(User Equipment)	5G ネットワークに接続する端末の総称。
UL Grant	基地局が端末に対して UL 送信を許可する制御信号。
UL(Uplink)	端末から基地局への通信方向。
UM(Unacknowledged Mode)	RLC レイヤの動作モードの一つ。再送制御を行わず、遅延の抑制を優先する。
VBR(Variable Bit Rate)	シーンの内容に応じてビットレートを動的に変化させる方式。
VMS(Video Management System)	複数のカメラ映像を一元管理するための映像管理システム。

用語	解説
WMS (Warehouse Management System)	倉庫内の入出庫・在庫・ピッキング等を管理するシステム。
アッテネータ	信号の強度を意図的に減衰させる機器。測定時に RSRP を強制的に変化させる用途等で使用される。
オーバーヘッド	データ本体以外の制御情報が通信全体に占める割合。
コーデック	映像・音声データの圧縮・伸長を行うソフトウェアまたはハードウェア。H. 264、H. 265 等がある。
ジッタ	データの到着時間のばらつき。リアルタイム通信では映像や音声の途切れの原因となる。
シンボル	5G における時間方向の最小単位。1 スロットは 14 シンボルで構成される。
スケジューラ	基地局内で、各端末への無線リソースの割当を管理・制御する機能。
スループット	単位時間あたりに伝送できるデータ量。通信速度の実効値を表す指標。
スロット	5G における時間方向の無線リソースの基本単位。SCS に応じてスロット長が変わる。
セッション	端末と 5G ネットワーク間に確立される論理的な通信路。
セルスループット	1 つの基地局(セル)が提供できる総通信容量。
ダイナミック・ケイパビリティ	環境や状況が激しく変化する中で、企業が、その変化に対応して自己を変革する能力のことを指す。(出典：経済産業省ものづくり白書(2020 年))
ダイナミックスケジューリング	データが発生するたびに端末が基地局に無線リソースの割当を要求し、動的にリソースを割り当てる方式。
ダイバーシティ	複数のアンテナで同じ信号を受信し、品質の良い信号を選択または合成することで受信品質を向上させる技術。
チャンネル推定	基地局・端末間の電波伝搬路の特性を推定する処理。MIMO の空間多重ではチャンネル推定の精度が通信品質に影響する。
テレメトリデータ	機器やセンサから遠隔で収集される計測データの総称。温度、振動、位置情報等が含まれる。
パケットロス	送信されたデータパケットが受信側に到達しないこと。
ハンドオーバー	端末の移動に伴い、接続先の基地局を切り替える動作。切替え中は通信が一時的に中断する。

用語	解説
ビームフォーミング	アンテナから放射する電波の指向性を制御し、特定の方向に電波を集中させる技術。
フェージング	電波が建物や障害物で反射・回折することにより、受信電力が時間的・空間的に変動する現象。
フォールバック	主要な通信手段(5G/L5G等)が利用できなくなった際に、代替手段(有線接続等)に自動的に切り替えること。
フレームレート(fps)	1秒間に表示される映像のフレーム数。値が大きいほど滑らかな映像となる。
ブロックノイズ	映像データの一部にパケットロスが発生した際に、映像がモザイク状に乱れる現象。
ミニスロット	通常のスロット(14シンボル)より短い単位(2・4・7シンボル等)でデータを送信する仕組み。低遅延通信に使用される。
ミリ波帯	5Gで使用される高周波数帯(日本では28GHz帯)の総称。Sub-6GHz帯に比べて広帯域だが、電波の直進性が強く遮蔽物の影響を受けやすい。
空間多重	MIMOにおいて、異なるデータを複数のアンテナから同時に送信し、受信側で分離する技術。通信速度の向上に寄与する。
再送	データが正しく届かなかった場合に、同じデータを再度送信すること。HARQによる再送とRLCレイヤによる再送の2段階がある。
標準パラメータ	本ガイドラインでは、「5G/L5G通信機器の動作・性能に影響を与える機器内部の主要な設定項目」と定義し、16のパラメータを標準パラメータとして抽出した。
符号化率	送信データ全体のうち、誤り検出・訂正のために付加される冗長データの割合。値が低いほどエラー耐性が高い。
変調方式	電波にデジタル情報を載せる方法。QPSK、16QAM、64QAM、256QAM等があり、高次の変調方式ほど多くの情報を送れるが、エラーに弱くなる。
無線リソース	端末にデータを送受信するために割り当てられる周波数や時間などの資源の総称。

巻末資料 2 5G/L5G を活用した製造現場におけるユースケース(例)

表 127 5G/L5G 通信を活用したユースケース(例)¹³

分類 ¹⁴	ユースケース	具体的内容
制御	機械に関する 動作制御・遠隔操作	各種機械を遠隔操作により制御し、生産効率を最適化するとともに人為的ミスを削減する。
	大型クレーンの 遠隔操作	大型クレーンを遠隔地から操作することで、操縦者の安全を確保しつつ、高所作業や危険区域での搬送業務を効率的に実施可能にする。
	産業車両の 自動走行	構内運搬車やフォークリフトなどの産業車両をセンサ等で自律走行させ、搬送作業の省人化・効率化を図る。
	パトロールの自動化 (移動ロボット、遠 隔ロボット)	移動型ロボットや遠隔操作ロボットを活用して、工場や倉庫内のパトロールや点検業務を自動化し、安全性と運用効率を高める。
	AGV/AMR の 操作・映像取得	AGV/AMR により製品や資材の自動搬送を行い、同時に搭載されたカメラで走行映像をリアルタイム取得・監視して障害物や異常を検知する。
	ロボット等による プラント内点検	遠隔または自律型ロボットを用いて、プラント内部の狭小部や高所等の人手での点検が困難な箇所を安全かつ効率的に点検・診断する。
管理	工場内環境 に関する管理	工場の温湿度、照度、騒音、振動などの作業環境データを常時取得し、快適性・安全性・機器保全の向上に活用する。
	工場内の設備や備品 及び資産管理 (部品管理・在庫管 理・資産管理)	設備や工具、原材料、中間製品、返品品などの所在・数量・使用履歴などを一元的に管理し、在庫ロスや無駄なコストを削減する。

¹³ 出典：国立研究開発法人情報通信研究機構「無線通信を用いた製造システムの導入(2020)」をもとに整理。

¹⁴ 制御、管理、安全管理・品質の3分類は、国立研究開発法人情報通信研究機構「無線通信を用いた製造システムの導入(2020)」における考え方に基づく。

分類 ¹⁴	ユースケース	具体的内容
	製品数カウント等	製造ラインでのワーク数や工程中の製品数、完成品数などをカウントして記録し、生産進捗や品質管理に活用する。
安全管理・品質	温湿度に関する情報収集による予防保全 (故障検知)	機器周囲の温度・湿度をリアルタイム監視し、異常値を検知した際にアラートを発し、設備の故障を早期に発見・検知し、早期対策を行う。
	空気環境(ガス、CO2、有害物質等)による異常検知	工場内の空気中に含まれる有害ガスや二酸化炭素濃度などをセンサで常時監視し、閾値超過時に警報・換気制御を行う。
	ドローン+温度センサによる工場環境計測 (移動ロボット等)	ドローンや移動ロボットに温度センサなどを搭載し、工場全体の温度分布や異常箇所を可視化・分析する。
	カメラ映像を用いた現場モニタリング (稼働監視)	作業エリアや生産ラインに設置したカメラからの映像を常時監視し、作業者の動作や機械稼働の状態をリアルタイムに把握・記録する。
	動画像による異常検知	映像解析技術を使って、生産ラインや設備の映像から異常な動き・変化を自動で検出し、即座にアラートを出す。
	非常停止スイッチ操作	緊急時にはシステムが即時に非常停止スイッチを作動できる仕組みを設け、災害や事故の拡大を防止する。
	カメラを用いた不法侵入者の検知 (進入禁止エリア検知含む)	監視カメラと画像解析技術により、立入禁止エリアへの侵入者を自動検出し、警報や記録によりセキュリティを強化する。
	検査データの取得・書き込み (映像含む)	検査装置から取得される数値データや画像・映像データを自動で記録し、品質管理やトレーサビリティに活用する。
センシング・リモートによる技術継承	熟練作業員の動きや判断をセンサや映像で記録し、AI や遠隔教育により若手への技術継承を効率化する。また、熟練工と現場を接続し、リアルタイムに指導する。	

巻末資料 3 ユースケースごとの要求性能

表 128 ユースケースごとの要求性能¹⁵

分類	ユースケース	遅延	データサイズ	頻度	接続数	5G/L5G の特徴		
						高速大容量	低遅延	多数同時接続
制御	機械に関する動作制御・遠隔操作	500 マイクロ秒～100 ミリ秒	20～250byte	50 マイクロ秒～1 分ごと	10～100 台		✓	✓
	大型クレーンの遠隔操作	12 ミリ秒以内	40～250byte	12 ミリ秒ごと	10 台以下		✓	
	産業車両の自動走行	1～100 ミリ秒	5～32Mbyte	連続的	30 台以下	✓	✓	
	パトロールの自動化（移動ロボット、遠隔ロボット）	10～100 ミリ秒	15byte～10Mbyte	連続的	10～100 台	✓	✓	✓
	AGV/AMR の操作・映像取得	1～500 ミリ秒	40kbyte～10Mbyte	1～50 ミリ秒ごと	10～100 台	✓	✓	✓
	ロボット等によるプラント内点検	10～100 ミリ秒	15byte～10Mbyte	連続的	10 台以下	✓	✓	
管理	工場内環境に関する管理	1 分以内	100byte～	1 分ごと	10～1000 台			✓

¹⁵ 出典：国立研究開発法人情報通信研究機構「無線通信を用いた製造システムの導入(2020)」をもとに整理。各ユースケースの詳細な要件については、同文献を参照のこと。

分類	ユースケース	遅延	データサイズ	頻度	接続数	5G/L5G の特徴		
						高速大容量	低遅延	多数同時接続
	工場内の設備や備品及び資産管理 (部品管理・在庫管理・資産管理)	100 ミリ秒～1 秒	200byte～1kbyte	30 分ごと	10～1000 台	✓	✓	✓
	製品数カウント等	1～3 秒以内	100byte～100kbyte	10 秒～1 分ごと	100～1000 台			✓
安全管理・品質	温湿度に関する情報収集による予防保全(故障検知)	1 分以内	100byte～	1 分ごと	10～1000 台			✓
	空気環境(ガス、CO2、有害物質等)による異常検知	100 ミリ秒～1 分	4～12byte	100 ミリ秒～1 分ごと	10～1000 台			✓
	ドローン+温度センサによる工場環境計測(移動ロボット等)	10～100 ミリ秒	15～250byte	連続的	10 台以下	✓	✓	
	カメラ映像を用いた現場モニタリング(稼働監視)	20～500 ミリ秒	1500byte～10Mbyte	連続的	10～100 台	✓	✓	✓

分類	ユースケース	遅延	データサイズ	頻度	接続数	5G/L5G の特徴		
						高速大容量	低遅延	多数同時接続
	動画像による異常検知	20～500 ミリ秒	1500byte～ 10Mbyte	連続的	10～ 100 台	✓	✓	✓
	非常停止スイッチ操作	500 ミリ秒 以内	4～12byte	連続的	10～ 100 台		✓	✓
	カメラを用いた不法侵入者の検知 (進入禁止エリア検知含む)	1 秒以内	6kbyte～10Mbyte	10 回/秒	10～ 100 台	✓		✓
	検査データの取得・書き込み(映像含む)	5 秒以内	1500byte～	20 回/秒	10 台 以上	✓		✓
	センシング・リモートによる技術継承	10～500 ミリ秒	15byte～40Mbyte	連続的	10 台 以下	✓	✓	

