

都市鉄道向け無線式列車制御システムの 無線回線設計ガイドライン

令和3年3月

都市鉄道向け無線式列車制御システム(CBTC)

仕様共通化検討会

目次

1. 目的	2
2. 適用範囲	2
3. 関連規格	2
4. 用語と定義	3
5. 無線通信システムの概要	4
5.1 無線通信システムの構成例.....	4
5.2 無線通信システムの伝送品質.....	5
6. 無線通信システムの設計	7
6.1 設計の基本的な考え方.....	7
6.2 無線通信システムの設計手順.....	7
6.3 無線回線設計	8
6.3.1 無線回線設計の概要.....	8
6.3.2 所要品質を得るための CNR・CINR の求め方	10
6.3.3 伝搬損失の求め方.....	11
6.3.4 雑音強度・干渉波強度の想定方法.....	13
6.4 無線回線設計の確認・評価手法	16
7. 無線式列車制御システムにおける無線通信システムの設計.....	17
7.1 列車制御用無線通信システムにおいて考慮すべき事項.....	17
7.2 性能要求事項の決定手順と設計の流れ	18
7.2.1 性能要求条件と前提条件との関係.....	18
7.2.2 前提条件に基づく無線パラメータの設定と無線回線設計までの流れ	20
7.2.3 前提条件の把握・評価手順.....	25
7.2.4 性能要求事項の設定手順.....	28
7.3 制御システムの相互運用性を考慮した無線通信システムの設計の考え方.....	34
7.3.1 既に導入済みの線区と新規に導入する線区で直通運転する場合.....	34
7.3.2 無線方式が異なる 2 つのシステムが既に稼働している場合.....	34
7.3.3 未導入の 2 つの線区に新たに導入する場合	35
8. 設計事例と仕様の例示	35
8.1 免許を受けて運用する無線通信システムを利用する場合	36
8.1.1 実験システム (CARAT)	36
8.1.2 実用システム (仙石線 ATACS プロトタイプシステム)	37
8.2 免許を受けずに運用できる 2.4GHz 帯無線通信システムを利用する場合.....	38
8.2.1 開発中の CBTC プロトタイプシステムその 1	38
8.2.2 開発中の CBTC プロトタイプシステムその 2	39
9. まとめ.....	40

1. 目的

本ガイドラインは、無線式列車制御システムに適用される無線通信システムの適切かつ効率的な設計・構築に資することを目的として、無線通信システムを設計する際の基本的な考え方と、制御情報の伝送に必要な性能要件を設定するための手順を示す。本ガイドラインは、特定の無線通信システムの具体的な仕様や統一方法を示すものではなく、異なる CBTC 方式の区間における相互運用性の確保を容易にすることを目指して作成したものである。

本ガイドラインの構成は次の通りである。第 2 章で本ガイドラインの適用範囲と対象とする無線通信システムを示し、関連する規格の概要と本ガイドラインで使用する用語の定義をそれぞれ第 3 章、第 4 章で説明する。次に、第 5 章と第 6 章では一般的な無線通信システムを対象として、その概要と設計方法をそれぞれ説明する。そして、第 7 章では無線式列車制御システムにおける無線通信システムを設計するための手順を説明する。最後に、第 8 章では設計事例と仕様を例示する。

2. 適用範囲

本ガイドラインは、無線式列車制御システムにおいて制御情報を地上一車上間で伝送するために使用される無線通信システムに適用する。対象とする無線通信システムは以下の 2 種類とする。

- ・ 鉄道事業者が免許を受けて運用する無線局を利用する無線通信システム
- ・ 免許不要で運用できる無線局のうち 2.4GHz 帯と 5GHz 帯を利用する無線通信システム

なお、将来における第五世代移動通信システムなどの活用を想定し、通信事業者が提供する回線サービスを利用する際に考慮することが望まれる事項についても参考情報として示す。

3. 関連規格

無線式列車制御システムで使用する無線通信システムの設計に関係する規格を次に示す。

(1) IEC 62280

- 規格名：鉄道分野－通信、信号、および処理システム－伝送システムにおける安全関連通信
- 発行年：本ガイドライン作成時に参照した版は 2014 年発行の第 1 版である。
- 概要：鉄道の保安システムにおいて、安全に関わる情報の伝送を行う通信システムに対する基本的な要求事項を定義する。

(2) IEC/TS 62773

- 規格名：鉄道分野－無線式列車制御システムで使用する無線システムの性能要求事項決定手順
- 発行年：本ガイドライン作成時に参照した版は 2014 年発行の第 1 版である。
- 概要：無線式列車制御システムに適用する無線システムのための性能要求事項を決定する手順を規定する。

(3) Recommendation ITU-R P.372

- 規格名：無線雑音
- 発行年：本ガイドライン作成時に参照した版は 2019 年発行の第 14 版 (P.372-14) である。
- 概要：無線周波数域における雑音強度の計算方法とパラメータに関する勧告。

(4) ARIB STD-T61

- 規格名：狭帯域デジタル通信方式（SCPC／FDMA）
- 発行年：本ガイドライン作成時に参照した版は 2005 年発行の第 1.2 版である。
- 概要：狭帯域デジタル通信方式（SCPC／FDMA）の無線区間インターフェースについて規定する。

(5) ARIB STD-T66

- 規格名：第二世代小電力データ通信システム／ワイヤレス LAN システム
- 発行年：本ガイドライン作成時に参照した版は 2014 年発行の第 3.7 版である。
- 概要：2.4GHz 帯を利用する第二世代小電力データ通信システム及びワイヤレス LAN システムの無線設備について規定する。

(6) ARIB STD-T71

- 規格名：広帯域移動アクセスシステム（CSMA）
- 発行年：本ガイドライン作成時に参照した版は 2018 年発行の第 6.2 版である。
- 概要：5GHz 帯を利用する無線アクセスシステム及びデータ通信システムの無線設備について規定する。

4. 用語と定義

本ガイドラインの目的のため、IEC/TS 62773 に準じて次の用語および定義を適用する。

(1) 通信容量

無線リンク上で単位時間あたりに送受信されるデータの最大量

(2) データ転送速度

ある定められた時間中に伝送されるデータ量

(3) 暗号化

第三者が解読できないようにデータを伝送する方法

(4) ハンドオーバー

隣接する無線基地局への接続の移行

(5) なりすまし対策

電子メッセージの改ざんやなりすましを防ぐために、電子認証や妥当性チェックの実行、ネットワークファイアウォールの提供、またはシステムの物理的隔離を伴う対策

(6) 変調方式

ベースバンド信号の情報を含むように搬送波信号を変化させる方法

(7) 接続数

1 台の沿線無線機で同時通信できる移動無線機の数

(8) 周期

物理無線インターフェースでの、2 つの連続したパケットの送信時間の時間間隔

(9) サービス品質

スループットの保証、ジッタ、待ち時間、およびパケット損失の点から見た、通信サービスの品質

(10) 伝送の種類

IEC 62280 に準拠する、オープン伝送またはクローズド伝送

5. 無線通信システムの概要

無線通信システムは、無線によって情報を伝送するシステムであり、その多くは電波を利用して構築されている。そこで、本章では電波を使った無線通信システムの基本的な構成について述べた後、一般的に無線利用時に考慮すべき事項と無線通信システムの伝送品質について説明する。

5.1 無線通信システムの構成例

電波を利用する無線通信システムの場合には、図 1 に示すように、送信したい情報を電波に乗せるための送信機と、電波から情報を取り出すための受信機、そして電波を空中に放射、あるいは空中の電波をとらえるためのアンテナから構成されている。無線通信システムは、図 1 中に示した次の 5 つの技術によって支えられている。

(1) 符号化技術

送りたい情報をできるだけ少ない量のデータ列に変換する技術と、誤りを検知・訂正する技術、正当な通信相手であることを検知するための技術など

(2) 変復調技術

できるだけ多くの情報（符号）を効率よく電波に乗せるための技術

(3) アンテナ技術

電波を効率よく空間に送出し、空間から受信するための技術

(4) 電波伝搬による劣化、雑音、干渉の対策技術

伝搬路で発生する誤りの原因となる現象を防ぐための技術

(5) 多元接続技術

限られた伝送路をできるだけ多くのユーザーで共有するための技術と、移動する局を追跡して確実に接続するための技術

上記(1)から(5)の各技術には多くの方式が提案・実用化されており、それらの技術の組み合わせ方によって、様々な用途の無線通信システムが構築されている。

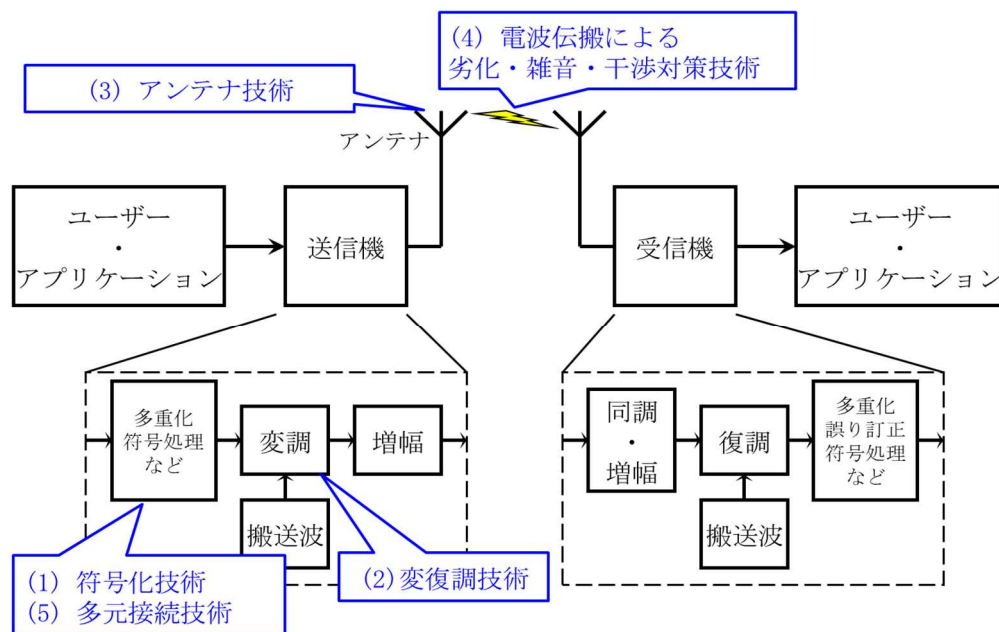


図 1 無線通信システムの基本的な構成例

5.2 無線通信システムの伝送品質

無線通信システムの伝送品質は、受信機において電波から取り出された情報が、送信機に入力された情報に対してどのくらいの誤りや欠損、遅れが含まれているかを表すための指標によって評価される。音声や画像などをデジタル化してデータとして送る場合は、受信したデータに含まれる誤りの数を表す指標として、ビット単位で誤り率を測定する BER（Bit Error Rate：ビット誤り率）、フレーム単位で誤り率を測定する FER（Frame Error Rate：フレーム誤り率）、ブロック単位で誤り率を測定する BLER（Block Error Rate：ブロック誤り率）などが使われる。また、伝送の過程で損失するデータの数を表す指標としては、フレーム単位で損失率を測定する FLR（Frame Loss Rate：フレーム損失率）や、パケット単位で損失率を測定する PLR（Packet Loss Rate：パケット損失率）などが使われる。そして、伝送の遅れ時間を表す指標としては、伝送遅延時間やジッタなどが使われる。

無線の伝送品質は、受信機に入力される所要波の電力 C （Carrier）と、雑音の電力 N （Noise）や干渉波の電力 I （Interference）との比によって変化する。これらの比は、CNR（Carrier to Noise Ratio：搬送波電力対雑音電力比）、CINR（Carrier to Interference and Noise Ratio：搬送波電力対干渉波電力・雑音電力比）といった値で示され、基本的には、値が大きいほど所要波の電力が雑音や干渉よりも強まる。図 1 に示した無線通信システムの基本構成例に、伝送品質を評価するための主な指標を表示したものを図 2 に示す。また、無線の伝送品質を測定する際は、伝送品質を評価する指標の値が正しく得られるように測定構成と測定項目を設定する必要がある。そこで、上述の伝送品質を評価するための主な指標について、その測定構成と測定項目を表示したものを図 3 に示す。

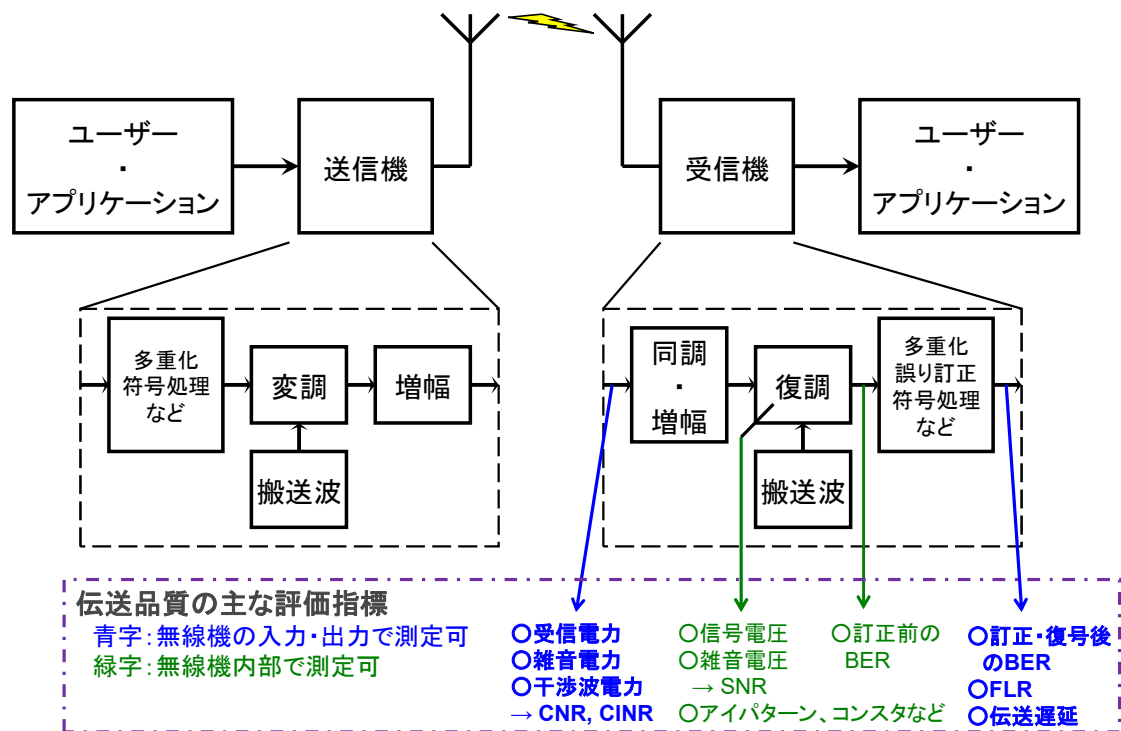


図2 伝送品質の主な評価指標

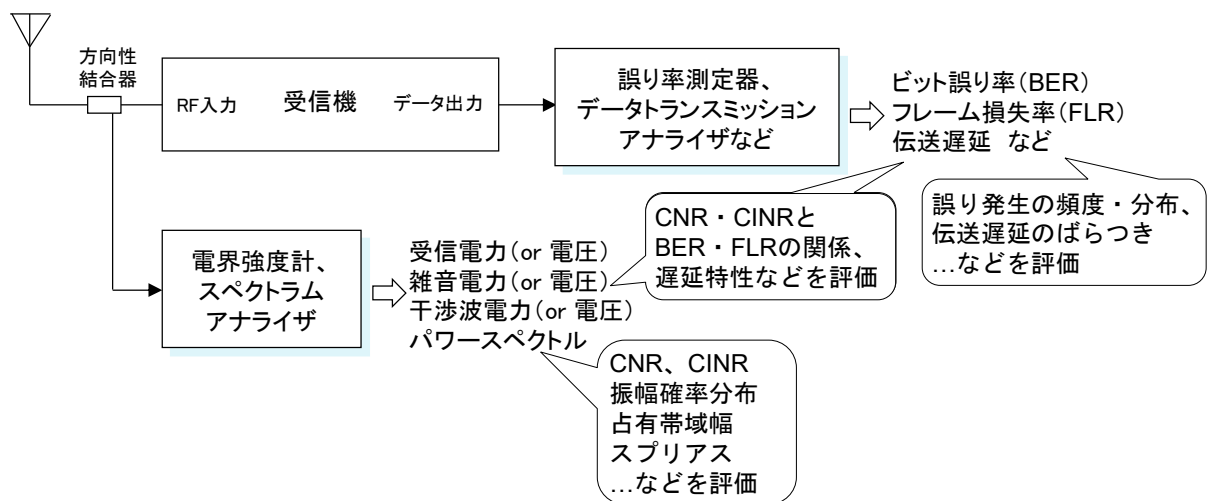


図3 伝送品質の測定構成と測定項目

6. 無線通信システムの設計

本章では、一般的な無線通信システムを設計する際の概略手順を示した上で、無線通信システムの要求品質が得られるように無線装置の仕様を設計する作業である無線回線設計と、伝送品質の評価法について説明する。

6.1 設計の基本的な考え方

無線通信システムの設計においては、無線伝送を利用するアプリケーションが要求する最低限必要な伝送品質を把握した上で、それよりも高い伝送品質を提供することができるよう無線通信システムの仕様を定める必要がある。基本的な考え方を以下に示す（図4）。

無線通信システムを設計する際は、最初に無線伝送を利用するアプリケーションの仕様と性能を踏まえて、アプリケーションが要求する伝送品質を、5.2 節に示した評価指標（FLR、BER、遅延、など）を用いて定める。また、アプリケーションが要求する最低限必要な評価指標の値は、無線通信システムの使用条件によって変わる場合もある。よって、それらの評価指標の値は、設計段階で想定する無線通信システムの使用条件も考慮して決定する。

次に、アプリケーションが要求する最低限必要な伝送品質を提供できるように、無線通信システムの仕様を定める。無線通信システムの仕様として定めるべき項目には、無線機の性能（送信出力、感度、選択度など）、アンテナの性能、基地局の配置、伝送方式など様々なものがある。また、無線通信システムの伝送品質は、時間や場所によって変化するため、確率的な事象として考える必要がある。よって、無線通信システムの仕様の各項目は、アプリケーションが要求する伝送品質の評価指標を用いて、それらの値が最低限必要なレベル以上となるように定める。そして最後に、設計した無線通信システムを評価して、アプリケーションが要求する最低限必要な伝送品質を提供できることを確認する。

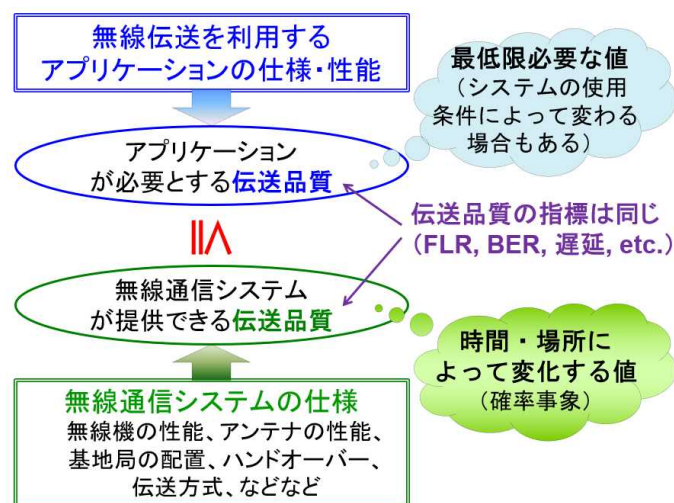


図4 無線通信システムの設計の考え方

6.2 無線通信システムの設計手順

無線通信システムを構築するためには、アプリケーションの機能を満足するために伝送すべき

情報を明確にした上で、その情報を伝送するために最低限必要なサービスエリアや品質などを定める必要がある。以下に、無線通信システムの設計段階で定めるべき項目の一例を示す。

- (1) サービスエリア（場所、距離、伝搬環境の条件など）
- (2) 使用条件（ユーザー数や端末数、使用時間、移動速度、気象条件など）
- (3) 所要品質（伝送速度、BER、FLR など）
- (4) 接続時間、接続率、伝送遅延時間、伝送周期など

上記の事項を踏まえて、無線通信システムを設計し、導入するまでの概略手順を図 5 に示す。

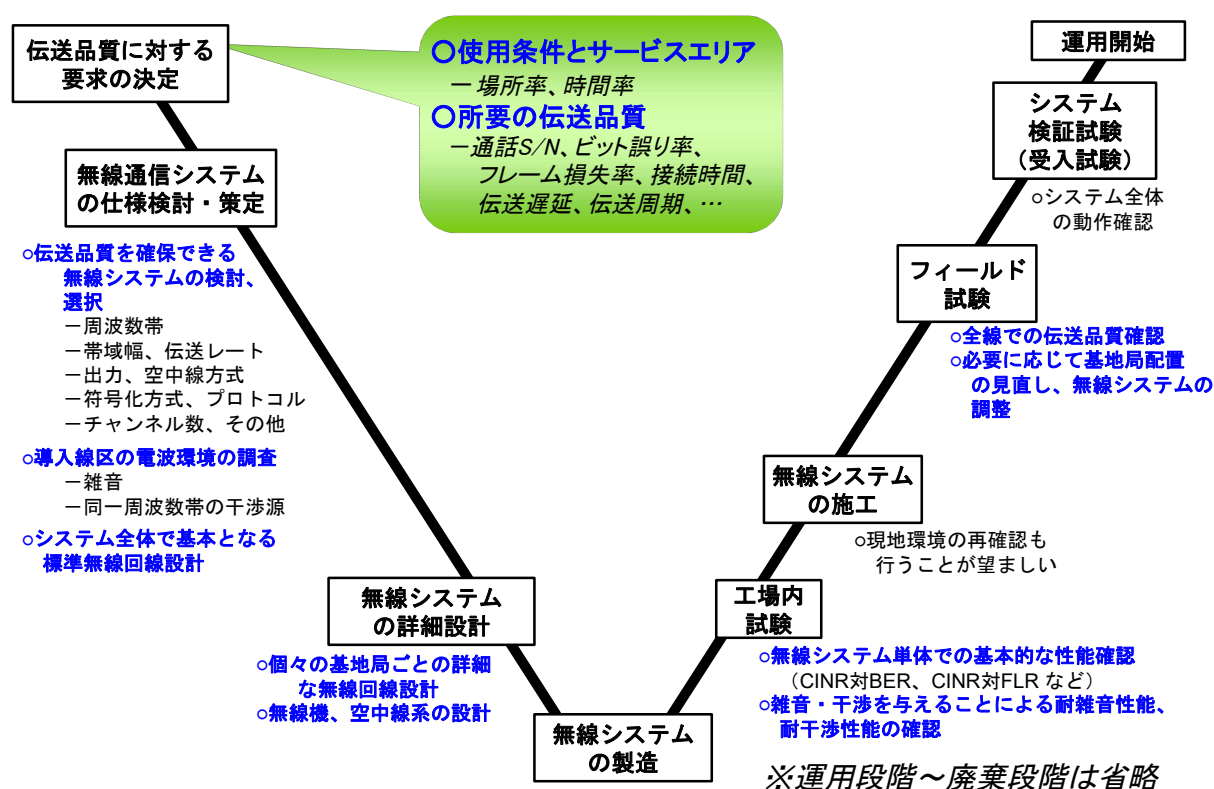


図 5 無線通信システムの設計段階から導入段階までの概略手順

6.3 無線回線設計

6.3.1 無線回線設計の概要

無線通信システムを構築する際には、アプリケーションが必要とする伝送品質がサービスエリアの中で得られるように、無線機の仕様と性能、アンテナの性能や配置を適切に設計する必要がある。このような考え方で設計を行う作業のことを無線回線設計という。

無線回線設計では、サービスエリアから求められる伝送距離において、送信機から到来する電波の強さと雑音・干渉波の強さの比が、所望の伝送品質が得られる CNR や CINR の値となるように、送信機、受信機、アンテナの仕様、置局配置（アンテナを置く位置や間隔）などを設計する。図 6 は、無線回線設計を行う際に用いられるレベルダイヤの例である。レベルダイヤは、送

信機の出力から受信機の入力に至るまでの電波の強さの変化をグラフとして描いたものである。最終的には、図 6 に示した図を、表 1 に示す無線回線設計表として整理し、施工の際の基準値として使用する。

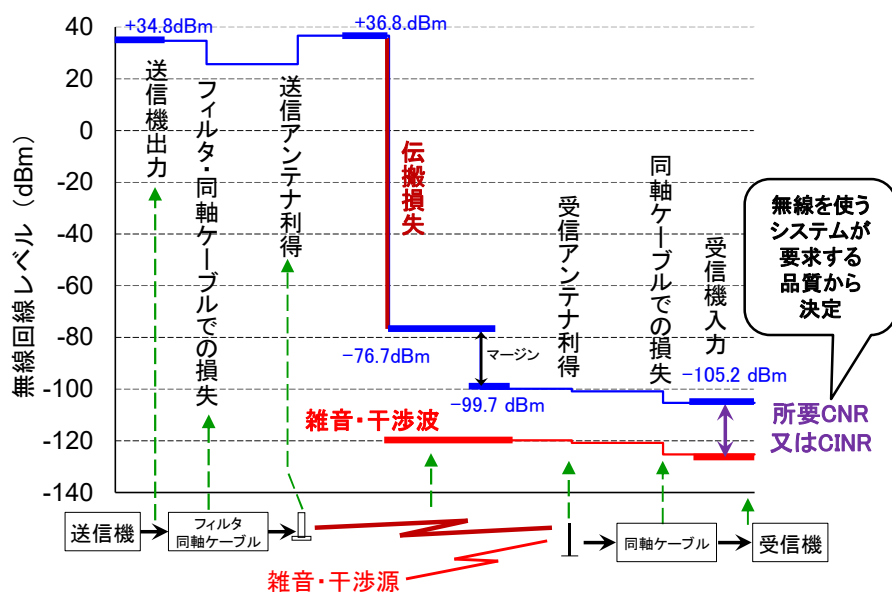


図 6 無線回線設計におけるレベルダイヤの例

表 1 列車無線の無線回線設計表の例

送信出力(3W)	+34.8 dBm
フィルタ・共用器損失	-6.0dB
ケーブル損失	-3.0dB
地上アンテナ利得	+11.0dBd
実効輻射強度	+36.8 dBm
許容伝搬損失	-113.5dB
受信アンテナ入力	-76.7 dBm
雑音マージン	-5.0dB
保守マージン	-5.0dB
フェージングマージン	-8.0dB
車両雑音マージン	-5.0dB
最低所要アンテナ入力	-99.7 dBm
車上アンテナ利得	-1.0dBd
ケーブル損失	-2.5dB
フィルタ等損失	-2.0dB
所要品質を確保するために必要な最低受信機入力	-105.2 dBm

なお、無線回線設計で用いられる主な単位の定義と単位間の関係を図 7 に示す。

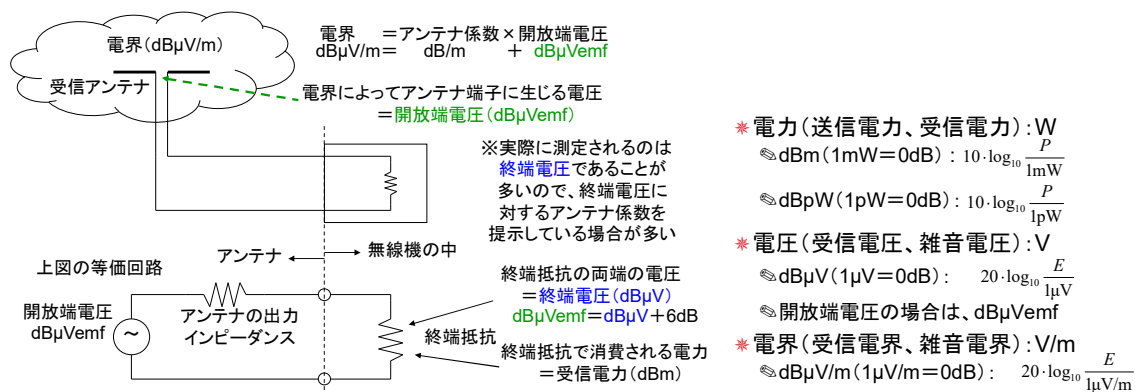


図 7 主な単位と換算式

6.3.2 所要品質を得るための CNR・CINR の求め方

無線の伝送品質は、送信機から届く電波の電力と、雑音や干渉波の電力の比である CNR や CINR といった値で示される。この CNR (あるいは CINR) と、BER などの伝送品質との関係は、使用する無線機の変復調方式や符号化方式 (5.1 節で示した(1)、(2)の技術)、回路を実装する際の特性 (無線機固有の性能) によって決定される。

一部の無線機の仕様書などでは、所要の誤り率が得られる受信機入力電力 (C の値) のみが記載されている場合があるが、上述のように、誤り率は C (所要波電力) だけではなく N (雑音電力) や I (干渉波電力) によっても変わるため、当該の無線機を使う場合には、前提となっている雑音電力もしくは干渉波電力を把握しておく必要がある。無線機を使用する環境における雑音や干渉の電力が、前提となっている所要波電力よりも大きい場合には、記載されている受信電力では所要の伝送品質を確保できない可能性があるため、受信機に入力する所要波の電力を大きくするなどの設計を行う必要が出てくる。ここで、伝送品質の評価指標のひとつである BER を例に、所要品質を得るための CNR の求め方の例として、図 8 に示すような CNR 対 BER の特性を持つ無線機を使用する場合を示す。所要品質が 10^{-4} 以下である場合は、図 8 中に赤色の矢印で示したように、受信機が静止しているときは CNR の値を 11dB 以上、受信機が移動しているときは CNR を 24dB 以上としなければならないことがわかる。

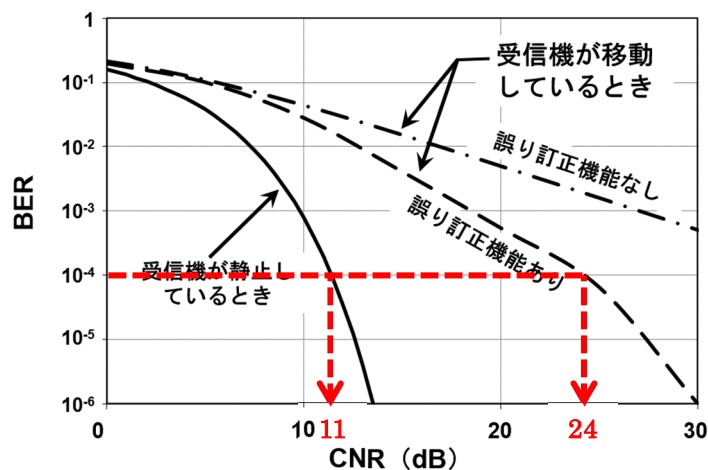
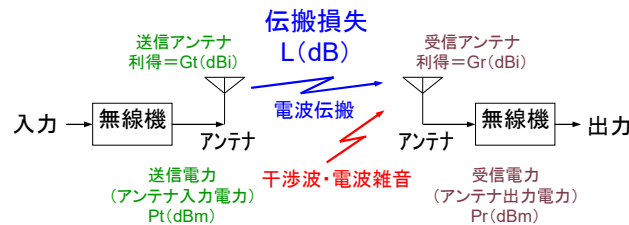


図 8 CNR 対 BER の例

6.3.3 伝搬損失の求め方

無線回線設計を行う上で、最も重要で難しい作業が、送信アンテナ～受信アンテナ間での伝搬損失と、雑音や干渉波の強さの見積もりである。本節では、伝搬損失の一般的な算出方法を概説する。伝搬損失は、図 9 に示すような関係式を満たすように計算を行うが、距離による損失に加え、周囲の地物等による遮蔽や散乱の影響を考慮して見積もる必要がある。



$$L(\text{dB}) = \underbrace{\{\text{送信電力 } P_t(\text{dBm}) + \text{利得 } G_t(\text{dBi})\}}_{\text{伝搬路に入力された電力}} - \underbrace{\{\text{受信電力 } P_r(\text{dBm}) - \text{利得 } G_r(\text{dBi})\}}_{\text{伝搬路から出てきた電力}}$$

$$\text{真値で表すと... } L(\text{倍}) = \frac{\text{送信電力 } P_t(\text{W}) \times \text{利得 } G_t(\text{倍})}{\text{受信電力 } P_r(\text{W}) \div \text{利得 } G_r(\text{倍})}$$

※「dBi」は、等方性アンテナの利得を0dBとした時のアンテナの利得(絶対利得)
ダイポールアンテナの絶対利得(約2.15dBi)を0dBとした時の利得「dBd」を使用する場合もある

図 9 送信電力・アンテナ利得・受信電力と伝搬損失の関係

送信アンテナと受信アンテナ間の伝搬損失については、目的や精度、沿線環境に応じてモデルを選択して計算する。代表的なモデルとして、簡略化されたモデル、経験則に基づいたモデル、サイト・スペシフィックなモデル、受信電力の変動を確率分布で表現したモデルがある。以下、各モデルについて記載する。

最も簡略化された伝搬路の計算としては、表 2 に示す自由空間モデルおよび 2 波モデルが挙げられる。自由空間モデルは送信点から受信点までに障害物等がなく直接波のみ到達する環境を想定して伝搬損失を求める。また、2 波モデルは送信点から直接波に加えて 1 回だけ反射した波が受信点に届くような環境での伝搬損失を求める。送受信点間の距離と周波数およびアンテナ高のみをパラメータとして用いるため、計算が単純で所要時間も短いため広く一般に利用される。

経験則に基づく伝搬モデルとしては、表 2 に示す秦式や Egli 式などがある。数式のパラメータを変更するだけで様々なシチュエーションに対応できること、数式モデルのための実装や計算が比較的容易であるなどの特徴を持つ。一方で、適用される周波数や送受信点間距離、アンテナ高などに制約があることに注意が必要である。

表 2 代表的な伝搬損失の計算式

種類	伝搬損失推定式	条件等
自由空間	$L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \text{ (dB)}$	
平面大地 (2 波モデル)	$L_p = \begin{cases} 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) - 20 \log_{10}(1 + \lambda) \text{ (dB)}, & \lambda d < h_t \cdot h_r \\ 20 \log_{10} \left(\frac{d^2}{h_t h_r} \right) \text{ (dB)}, & d \gg h_t \cdot h_r \end{cases}$	
Egli	$L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{d^2}{h_t h_r} \right) + 20 \log_{10} \left(\frac{f}{40} \right) \text{ (dB)}$	$f \geq 40 \text{ MHz}$
秦式 準平滑地形上市街地 (奥村カーブの近似式)	$L_p = 69.55 + 26.16 \log(f) - 13.82 \log(h_t) - a(h_r) + \{44.9 - 6.55 \log(h_t)\} \cdot \log(d) \text{ (dB)}$ $a(h_r) : h_r \text{ に対する補正項}$	$150 \leq f \leq 1500 \text{ MHz}$ $30 \leq h_t \leq 200 \text{ m}$ $1 \leq h_r \leq 10 \text{ m}$ $1 \leq d \leq 20 \text{ km}$
記事	λ : 波長, d : 距離, f : 周波数, h_t : 送信アンテナ高, h_r : 受信アンテナ高	

最終的に受信機に入力される電力を算出するためのシミュレーション手法は、サイトスペシフィックな手法と、経験式や確率分布を用いる手法（サイトジェネラル）とに大別される。

サイトスペシフィックな手法は、電波伝搬に影響を与える地形・建物などをモデル化する手法であり、レイトレーシング法、レイラウンチング法、電磁界解析手法（FDTD、FEM）などが使用される。サイトスペシフィックな手法では、地形や建物などを正確にモデル化できる場合は比較的精度良く伝搬損失を計算できるという利点があるが、計算に要する時間が膨大であること、地形や建物などのモデルの精度が計算結果の精度を大きく左右すること、モデルの作成に時間がかかることなどの課題がある。

列車～地上間のような移動体通信の場合には、フェージングと呼ばれる受信レベルが非常に激しく変動する現象が発生する（図 10）。フェージングが発生すると、受信レベルを上げても伝送品質が良くならない現象（フロア現象）が現れる。これを解消するためには、誤りを訂正する技術やダイバーシチ技術などの対策を導入する必要がある。このような受信レベル変動を確率分布としてモデル化して再現する手法があり、遮へい等による変動に対しては対数正規分布、フェージングによる変動に対してはレイリー分布や仲上ライス分布などが使用される。確率分布を用いる手法では、パラメータを変えることによって様々な電波伝搬の環境を表現できるため、様々な環境に適用でき、細かい地形や建物のモデル設計が不要であるという利点がある。一方、課題としては、対象とする地域固有の伝搬条件を厳密に反映しにくいこと、適用する確率分布やパラメータの妥当性の検証が必要であること、確率的な評価となるため、多数の試行が必要になることなどがある。なお、確率分布を用いる手法は地物の具体的な要素を反映したものではないため、回線設計よりも、伝送方式の検討に用いられることが多い。

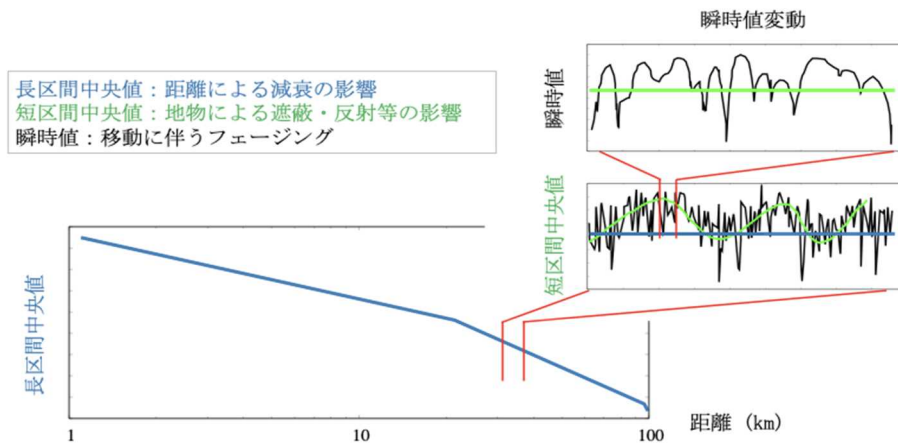


図 10 電波伝搬の特徴とフェーディング

6.3.4 雑音強度・干渉波強度の想定方法

無線回線設計における雑音や干渉波の強さの見積もりは、伝搬損失の推定と同様に無線通信品質を決定づける重要な作業である。この雑音・干渉波の想定方法は、使用する周波数帯域や無線方式によって異なり、全てのケースをカバーできる万能な方法は存在しない。ここでは、免許を受けて運用するもの、免許を受けずに運用できるもののうち 2.4GHz 帯と 5GHz 帯を利用する 2 種類の無線通信システムを対象として、想定することが望まれる雑音・干渉の発生源と、それらの強度の把握・推定の考え方を概説する。

(1) 免許を受けて運用する無線通信システムの場合

a) 雑音源

鉄道環境において考慮すべき雑音として、自然雑音及び人口雑音、また鉄道沿線に特有の架線等に流れる高調波電流から放射される雑音が挙げられる。

無線通信システムを設計するにあたって雑音の強度を想定する方法としては、ITU-R が発行している勧告”Recommendation ITU-R P.372”（最新版は 2019 年発行の P.372-14）に準じて計算により求めるほか、スペクトラムアナライザの雑音電力密度の測定機能を利用して実測する方法もある。

なお、沿線では列車の通過によって、車上では運転状態（力行／だ行／ブレーキ）によって、受信機に入力される雑音電力が変動する場合がある。図 11 に示すように、沿線に配置された基地局が受信する雑音は、列車の通過に伴って雑音電力密度、および発生時間間隔と発生継続時間長が変化することが、また、移動局が受信する雑音は、「停車」「だ行」「力行・ブレーキ」の 3 状態において雑音強度が変動することが実験等で明らかになっている。

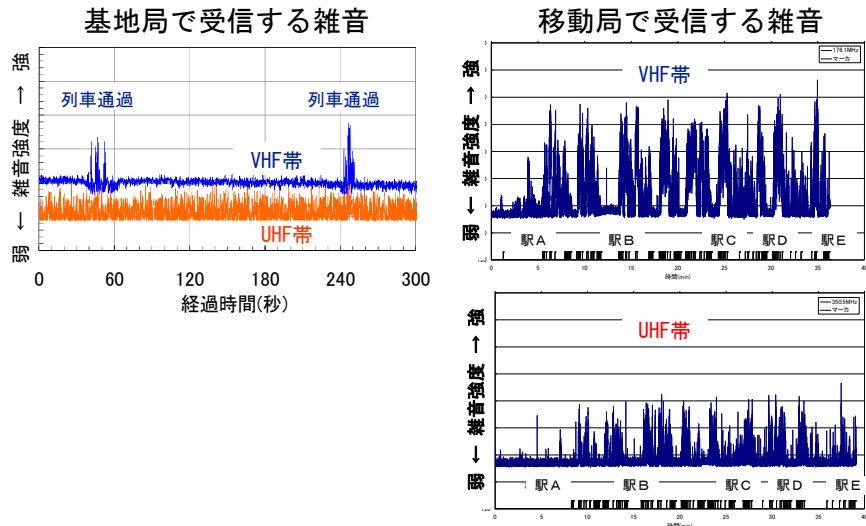


図 11 鉄道環境における雑音強度の測定例

また、雑音や後述する干渉の影響によって通信障害が発生した場合に備え、自チャンネルのみでなく、周辺帯域の電波の状況をロギングする機能を無線装置にもたせておくことにより、通信障害の原因究明や対策検討において有効なデータを得ることができる。

b) 干渉源

免許波を使用する場合は、同一周波数帯に他システムからの干渉波が直接混入することは稀であり、多くは自システムで使用している周波数同士の相互変調や、隣接するバンドで使用されている他システムが使用する周波数による相互変調等による干渉が主である。

2 つ以上の異なる周波数の電波が受信機に入り、ダイオードやトランジスタなどの非線形素子に印加された場合、これらの素子のもつ非直線性により、基本波 (f_1 , f_2) の高調波が発生するうえ、これらの各周波数の信号同士の乗算が行われ、 $m \times f_1 + n \times f_2$ の周波数成分が発生する (m, n は $-\infty \sim +\infty$ の整数)。このような現象を相互変調とよび、特に $m=2, n=-1$ あるいは $m=-1, n=2$ の場合を「3 次相互変調(3 次 IM)」と呼ぶ(図 12)。たとえば、 $f_1=350.00000\text{MHz}$, $f_2=350.00625\text{MHz}$ であった場合、3 次 IM によって 349.99375MHz と 350.01250MHz に干渉波が生じるため、 f_1 と f_2 が受信できるエリアでは 349.99375MHz と 350.01250MHz は使用できない。

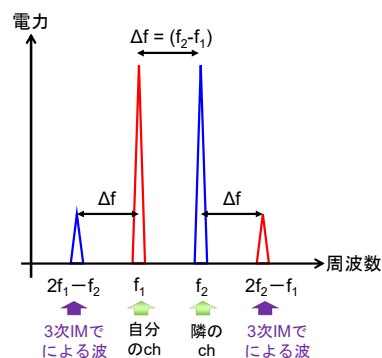


図 12 3 次相互変調のイメージ

3次相互変調によって発生する周波数のうち、 f_1 もしくは f_2 に接近した周波数は受信機での分離が難しく、また強度も基本波の強度に対応して大きくなる場合があるため、干渉障害の原因となりうる。このため、同一エリアに複数のチャンネルを配置する際には、使用するチャンネルの周波数が同一にならないようにすることはもちろんであるが、3次相互変調によって発生する周波数が、自システム内や隣接線区のシステム、あるいは列車無線など他のシステムで使用している周波数と合致しないように留意する必要がある。

なお、免許波においては、意図的な妨害は即電波法違反となるため発生する頻度は低いものと想定されるが、可能性としては完全にはゼロではない。このため、故意の妨害波によって妨害された場合に備え、無線装置には妨害波の監視機能を持たせることが望ましい。このような機能により、中央装置に妨害波による通信妨害が行われていることを伝える警報を出力できるため、長時間の妨害を抑止する効果が期待できる。また、自チャンネルのみでなく、周辺帯域の電波の状況をロギングすることができれば、通信障害が発生した場合の原因究明や対策検討において有効なデータを得ることが期待できる。

(2) 免許を受けずに運用できる無線通信システムのうち 2.4GHz 帯と 5GHz 帯を利用する場合

a) 雑音源

2.4GHz 帯および 5GHz 帯についても、免許波の場合と同様に、ITU-R の勧告 (P.372) に準じて想定することができる。ただし、2.4GHz 帯に特有の雑音元として、電子レンジや高周波治療器などの ISM(Industrial/Science/Medical)機器がある。これらは電波を加熱や加工のためのエネルギーとして利用するため、通信波よりも強大な電力を放射する。これらの機器が周辺環境に設置されている場合は、周辺環境の雑音電力密度と時間的変動を予め測定し、無線回線設計に反映することが望ましい。なお、列車の走行に伴って発生する雑音については、鉄道事業用に割り当てられている 150MHz 帯や 300MHz 帯・400MHz 帯に比べて概して強度が弱い場合が多く、上記の ISM 機器や後述する干渉による影響の方が支配的である。

b) 干渉源

2.4GHz 帯は無線 LAN、Bluetooth、ラジコンなど多数のアプリケーションで利用されており、他システムが同一周波数を使用しているタイミングでは通信ができない場合がある。また、意図的な妨害も他の帯域に比べて難易度が下がるため、2.4GHz 帯を利用するにあたっては慎重な干渉源の有無の調査と、干渉を受けた場合の回避策の導入が必須となる。

5GHz 帯についても、無線 LAN のほかレーダーなどが利用しており、通信できないタイミングが生じる可能性がある。5GHz 帯は 2.4GHz 帯よりも干渉源の種類が少なく、また伝搬過程での減衰が大きいため、2.4GHz 帯よりは想定すべき事象は少ないものの、事前の干渉源の有無の調査と調査結果に基づく回避策の導入の可否の検討を行うことが望ましい。

以下では、2.4GHz 帯を対象として、主な干渉源について概説する。

○無線 LAN

日本の電波法の下では、無線 LAN の送信出力は 10mW/MHz の電力密度が最大とされている。干渉波強度を計算する際には、所要波が使用する帯域幅に応じて電力密度から電力値に換算

するとともに、干渉源から自システムのアンテナまでの距離による減衰を考慮して無線回線設計に反映する。

無線 LAN が使用する周波数に関しては、規格上は 1ch～15ch までであるものの、隣接する ch 同士の帯域が重なって定義されている。このため、無線 LAN の端末では相互に帯域が重ならないように 1ch、6ch、11ch あるいは 3ch、9ch、13ch の 3 チャンネル分を使用している場合が多い。周波数帯の占有状況については、無線 LAN アナライザやリアルタイムスペクトラムアナライザ（周波数掃引型でないスペクトラムアナライザ）などによって全線の状況を把握することが望ましい。

無線 LAN では CSMA/CA によって送信しないタイミングが存在する。無線 LAN 端末の台数と帯域が占有されている時間割合の関係を調査した論文等によれば、IEEE 802.11g では 60% 程度との報告がある。ただし、環境によっては帯域を占有する時間率が 100% 近い場合もあり得るので、リアルタイムスペクトラムアナライザやシグナルアナライザなど周波数掃引型でないスペクトラムアナライザなどを用いて使用する帯域の占有状況を把握することが望ましい。

○Bluetooth

Bluetooth 端末は近距離通信を基本としているため、電波法の規程に基づいて製造・販売されている端末の多くは Class 2 (2.5mW/MHz) もしくは Class 3 (1mW/MHz) の送信電力となっているが、一部に Class 1 (規格上は最大 100mW/MHz だが、国内では 10mW/MHz 程度) の製品も存在する。Class2 及び Class3 の Bluetooth 端末が発射する干渉波については、多くの場合は伝送品質に重大な影響を及ぼすレベルとはならないと考えられる。また、Bluetooth ではある瞬間に創出されている電波の占有帯域幅は 1MHz であるが、625 μ 秒ごとに 80MHz の帯域に渡って周波数ホッピングを行う。そのため、所要波が使用する帯域幅と送信間隔を適切に設定することにより、干渉波の影響を回避することが可能である。

無線回線設計にあたって電波環境の把握を行う際には、リアルタイムスペクトラムアナライザやシグナルアナライザなど周波数掃引型でないスペクトラムアナライザを用いて、Bluetooth 端末が発射する電波の存在や時間変化も確認しておくことが望ましい。

○意図的な妨害

意図的に放射される妨害波は、放射電力が大きく、また周波数帯域も自システムで利用する全周波数帯域に渡ると考えられるため、伝送品質に多大な影響を与える。出力については正確な想定が困難ではあるが、最低でも 10mW/MHz の電力密度が使用する帯域幅全域に放射されていることを想定して干渉波電力を見積もることが望ましい。

なお、全帯域が故意の妨害波によって妨害された場合に備え、無線装置には妨害波の監視機能を持たせることが望ましい。このような機能により、中央装置に妨害波による通信妨害が行われていることを伝える警報を出力できるため、長時間の妨害を抑止する効果が期待できる。また、自チャンネルのみでなく、周辺帯域の電波の状況をロギングすることができれば、通信障害が発生した場合の原因究明や対策検討において有効なデータを得ることが期待できる。

6.4 無線回線設計の確認・評価手法

無線回線設計を確認・評価する項目としては、以下のような指標が挙げられる

- ・受信電力（受信電界強度）

- ・ 伝送品質（電文の損失率、遅延等）

上記を確認する方法としては、シミュレーションと試験による実証がある。シミュレーションは、所要品質や干渉妨害の想定などについて様々な条件で試行が可能である。そのため、シミュレーションでは無線回線設計に必要な各項目の詳細な評価や検討を行うことができる。しかし、シミュレーションは計算上でしか評価することができないため、現地試験による実証が必要となる。つまり、無線回線設計で示した各項目の設計値と、現地試験による実測値を比較評価して、無線回線設計の妥当性を実証する必要がある。

シミュレーションでは、伝搬環境や基地局の位置、無線機の仕様の変更などが伝送品質（電文の損失率、遅延等）に与える影響を予測するために、電文の符号化、変復調、誤り訂正、伝搬路上での干渉・雑音混入などの伝送過程をできるだけ忠実にトレースする必要がある。

7. 無線式列車制御システムにおける無線通信システムの設計

無線式列車制御システムで使用する無線通信システムにおいては、列車制御に必要な機能から要求されるサービス品質で情報を伝送できるように設計することが求められる。そこで、本章では第 6 章で説明した内容を踏まえて、無線式列車制御システムで使用する無線通信システムを設計するための手順を示す。

7.1 列車制御用無線通信システムにおいて考慮すべき事項

本ガイドラインでは、図 13 に示す IEC 62280 に規定されている参照アーキテクチャにおいて、制御システムと伝送システムのインターフェースが図中の赤線におかれていることを想定し、青枠で囲まれた非安全関連伝送システムの設計手順を示す。

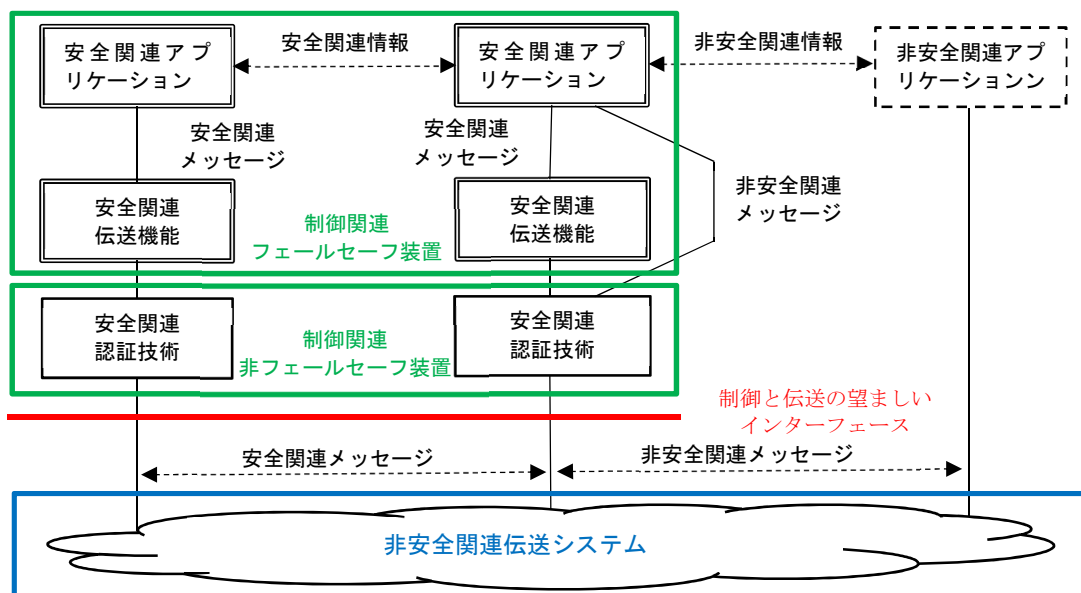


図 13 本ガイドラインにおいて想定する参照アーキテクチャ

無線式列車制御システム用の無線通信システムを設計するにあたっては、性能要求の手順を定めている IEC/TS 62773 で示されている前提条件を考慮することが望ましい。IEC/TS 62773 で示されている、考慮すべき前提条件の概要と性能要求事項との関係を図 14 に示す。

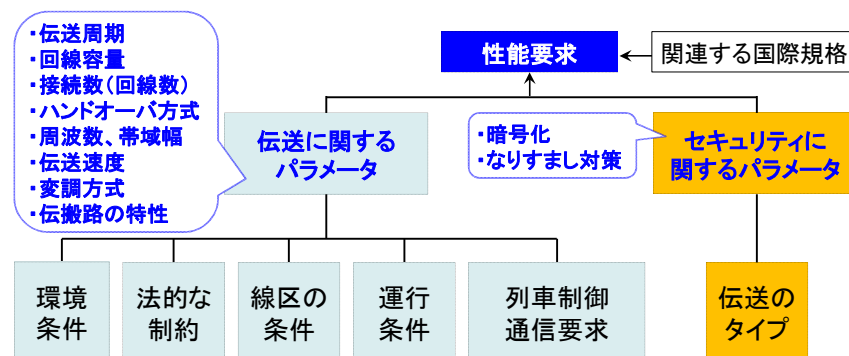


図 14 性能要求事項に影響を与える要因 (IEC/TS 62773)

7.2 性能要求事項の決定手順と設計の流れ

国際規格 IEC/TS 62773 では、無線式列車制御システムにおける無線通信システムの性能要求事項を決定するための手順として、①サービス品質に影響を与える条件の特定、②個々の状況の評価、③性能要求事項に反映させるかどうかの判断、が必要であるとしている。そこで、本章では IEC/TS 62773 に示された手順を踏まえて、無線式列車制御システムで使用する無線通信システムの性能要求事項を具体的に決定するための手順を説明する。

7.2.1 性能要求条件と前提条件との関係

IEC/TS 62773 の Table 2 で示されている性能要求条件と前提条件との関係を表 3 に示す。図 14 にも示したとおり、性能要求条件は伝送方式に関するパラメータとセキュリティに関するパラメータから構成される（双方のパラメータを合わせて「無線パラメータ」と呼ぶ）。表 3 では、無線パラメータと、無線パラメータに影響を与える前提条件との関係が○と△で示されている。

なお、表 3 中の無線パラメータのうち、ハンドオーバーの項目については、無線通信システム側に移動局の位置を把握して追跡・接続する機能が装備されていない場合に必要となる項目である。都市鉄道向け無線式列車制御システムのインターフェース仕様共通化ガイドラインにおいては、将来の無線式列車制御システムのあるべき姿として、制御システムと伝送システムを分離する構成を提唱している。そこで、本ガイドラインにおいても、図 13 に示したインターフェース点において制御と伝送が分離されたシステムを想定し、伝送システムが移動局の位置を把握して適切な基地局と接続する機能を有していることを前提としている。このため、以降の解説においては、ハンドオーバーの機能については割愛する。

表 3 中の数字（前提条件は 1～17、無線パラメータは 1～11）は、IEC/TS 62773 に記載されている Table 2 に記載の項目番号をそのまま転記したものである。以降の説明では、入力となる前提条件の項目には”I-”、出力となる無線パラメータの項目は”O-”の記号を項目の番号の前に付して、前提条件もしくは無線パラメータを識別するための記号として使用することとする。

表3 システムの前提条件と性能要求事項として決定する無線パラメータとの関係

			無線パラメータ OUTPUT												
			セキュリティ		伝送方式										
					(無線方式と伝搬媒体)										
					暗号 化	なりす まし	通信 周期	通信 容量	チャネ ル数	ハンド オーバー	周波数	帯域幅	伝送 速度	変調 方式	伝送路 の種類
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
前提条件 INPUT	環境条件	(伝搬上の)障害物	1			△			△	△		△	△	○	
		気候条件	2			△			△	△		△	△	△	
		電磁障害	3			△			△	△		△	△	○	
	法令的 制約条件	電波法(設備規則など)	4			※		※	△	○	○		○	○	
	線区条件	線区最高速度	5						○	△			△		
		線路条件	6			△	△	△	△	△			△	△	○
		線区構成	7				○	○							
		駅の構成	8			△	○	○							○
	運転条件	最小運転時隔	9				○	○	○	○		△			
		1制御エリア当たりの最大列車数	10				○	○	○			△			
制御システム からの伝送 に対する要求	最大許容通信損失	11					○	○	○	○			○	○	
	ネットワーク遅延時間	12				○	○	○	○	△	○		○	○	○
	制御周期	13				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	スループット	14				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	制御エリア	15						○							
	保守条件	16				△	△	△							
伝送方式 のタイプ	オープン	17	○	○											

○: IEC/TS 62773で前提条件と性能要求事項が強固な関係があるとされているもの
△: IEC/TS 62773で前提条件と性能要求事項が間接的に関係があるとされているもの
※: IEC/TS 62773では無関係とされているが、日本では場合によって考慮が必要となるもの

表3において○と△で示されている前提条件と無線パラメータとの関係を図15に示す。図15では、表中の○を実線、△を点線で表している。

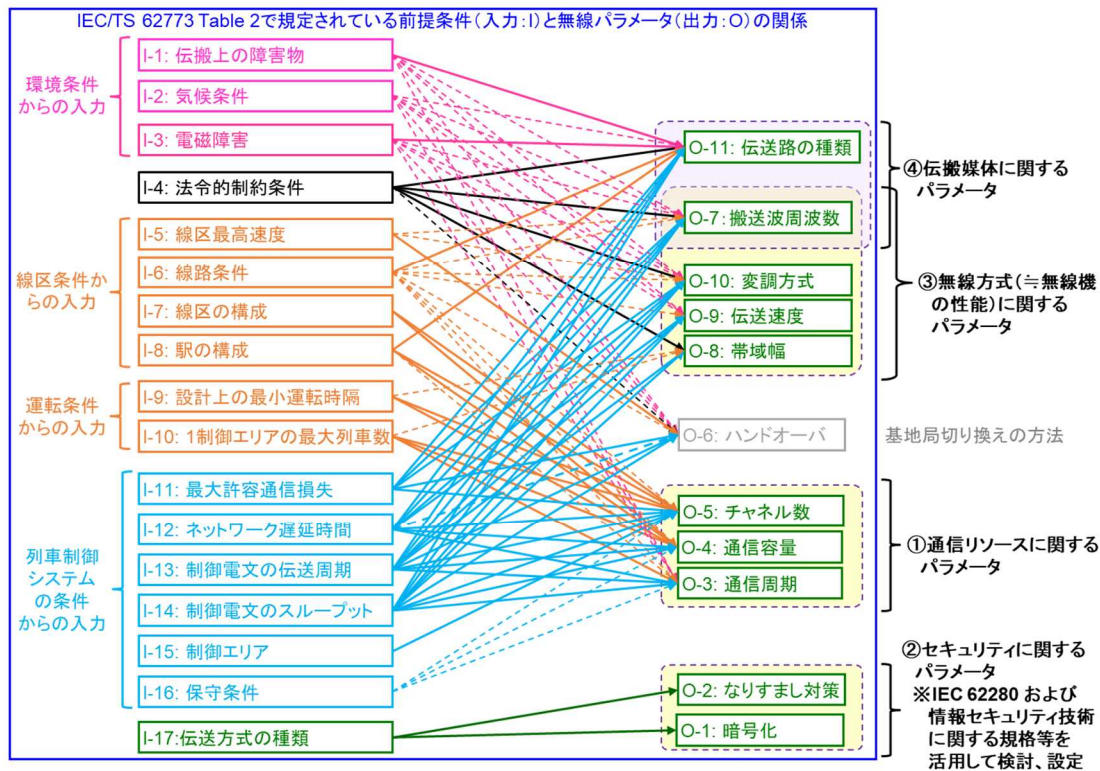


図15 IEC/TS 62773 Table 2で規定されている前提条件と無線パラメータの関係図

図 15 の右側部分に記載したとおり、出力となる各無線パラメータは、大きく以下の 4 種類に分類できる。

- ①通信リソースに関するパラメータ群：列車制御に必要な通信資源の量を表すパラメータ
- ②セキュリティに関するパラメータ群：セキュリティ対策のためのパラメータ
- ③無線方式に関するパラメータ群：無線機の仕様、性能を決定づけるパラメータ
- ④伝搬媒体に関するパラメータ群：アンテナ形式や伝搬形態などを表すパラメータ

表 3 および図 15 に示した個々のパラメータは、それぞれに独立した並列の関係ではなく、相互に関係しあうものである。上記の 4 つのパラメータ群の分類は、無線通信システムを設計していく流れに沿って、グルーピングと設定する順番を示すために整理したものである。すなわち、前提条件に基づいて、まず①通信リソースに関するパラメータ群と、②セキュリティに関するパラメータ群を設定し、その通信リソースとセキュリティ要件を確保できるように③の無線方式のパラメータを設定・選定する。③の無線方式のパラメータが設定されれば、無線機の性能が決まることになるので、④の伝搬媒体に関するパラメータと合わせて、第 6 章で述べた無線回線設計を行うことにより、基地局／アンテナの配置を決定することができる。なお、雑音や干渉妨害の想定に関しては、6.3.4 項で述べた一般的な事項を踏まえ、制御情報の伝送への影響を慎重に考慮して設計に反映することが望ましい。

7.2.2 前提条件に基づく無線パラメータの設定と無線回線設計までの流れ

本項では、図 15 に示した前提条件（入力：I-1～17）と無線パラメータ（出力：O-11）との関係図を使って、6.2 節で述べた無線パラメータを設定もしくは選定していくプロセスと、6.3 節で述べた無線回線設計との関係を示す。

なお、利用する無線システムが、免許を受けて運用するもの、免許を受けずに運用できるもののうち 2.4GHz 帯と 5GHz 帯を利用するもの、将来の 5G など公衆網を利用するもの、によって考慮可能なパラメータや設定できる範囲が異なるため、それぞれのケースごとに流れを示す。

(1) 鉄道事業者が免許を受けて運用する無線局を利用する場合

免許を受けて運用する無線局を利用する場合は、制御システムからの無線通信システムに対する要求事項を踏まえ、まず通信リソースに関するパラメータ（①：チャンネル数、通信容量、通信周期）と、セキュリティに関する要件（②：暗号化、なりすまし対策）を設定する（図 16）。

次に、通信リソースとセキュリティ対策の要件を基に、多重化方式や符号化方式、認証方式等を検討、設定し、無線方式のパラメータ（③：搬送波周波数、帯域幅、伝送速度、変調方式）に反映する（図 17）。なお、符号化方式を検討する際には、伝搬上の障害物や電磁障害による影響と最大許容通信損失なども考慮して設定する必要がある場合がある。また、セキュリティ対策の要件を基に符号化方式や認証方式を設定する際には、情報セキュリティに関する ISO/IEC 規格等も参考にしながら、IEC 62280 が示す考え方に準じて具体的な方式を検討することが望ましい。

そして、無線方式のパラメータと、線路条件や線区・駅の構成、電波伝搬環境と電磁環境を考慮して伝搬媒体に関するパラメータ（④：伝搬路の種類＝主には空中線方式）を設定する（図 18）。

最後に、無線方式と伝搬媒体のパラメータに基づいて、6 章で述べた無線回線設計手順に沿って空中線の仕様や出力、アンテナ間隔等を設計する（図 18）。

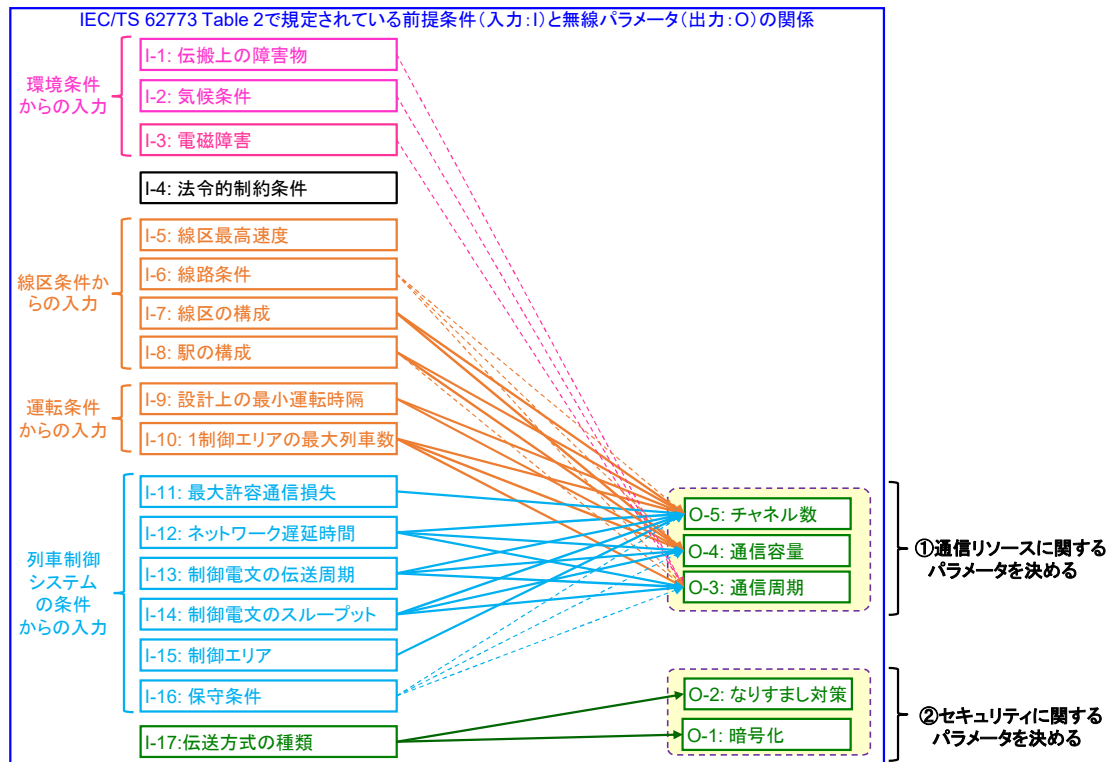


図 16 鉄道事業者が免許を受けて運用する無線局を利用する場合の設計手順のイメージその 1

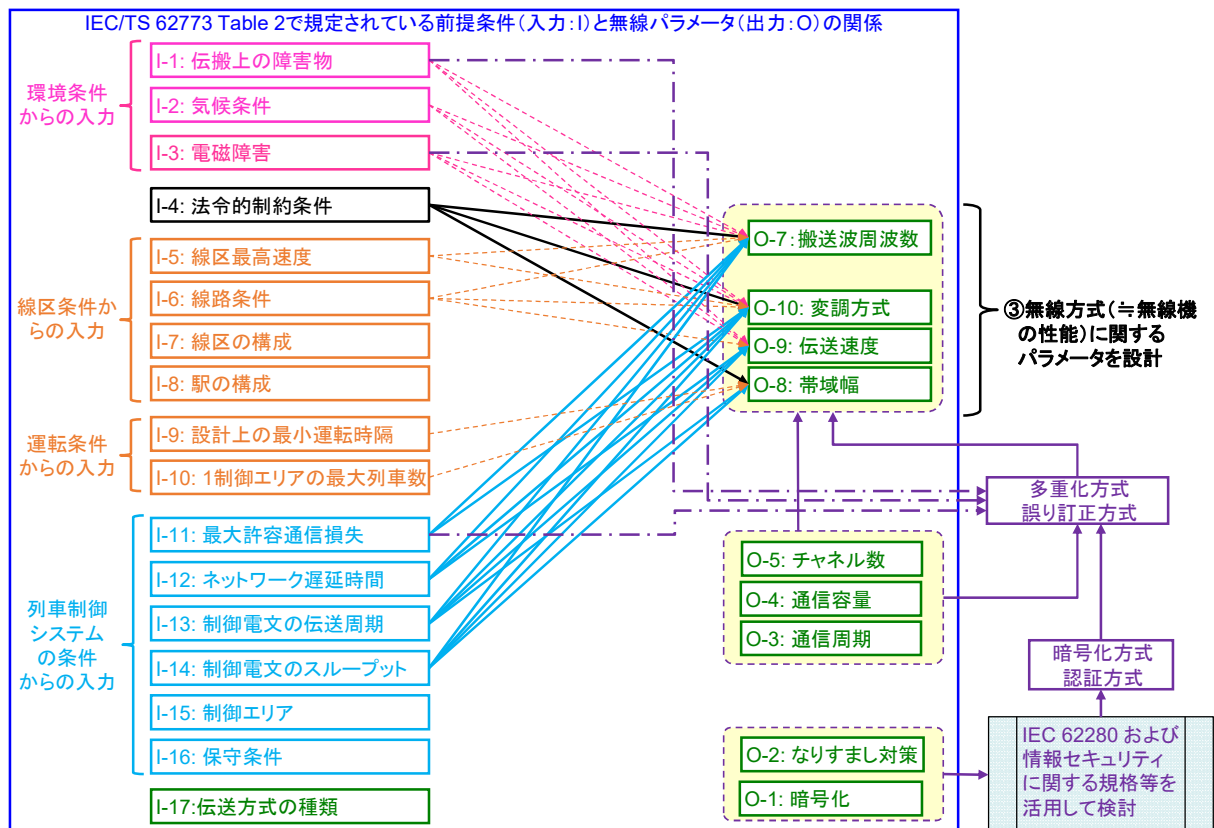


図 17 鉄道事業者が免許を受けて運用する無線局を利用する場合の設計手順のイメージその 2

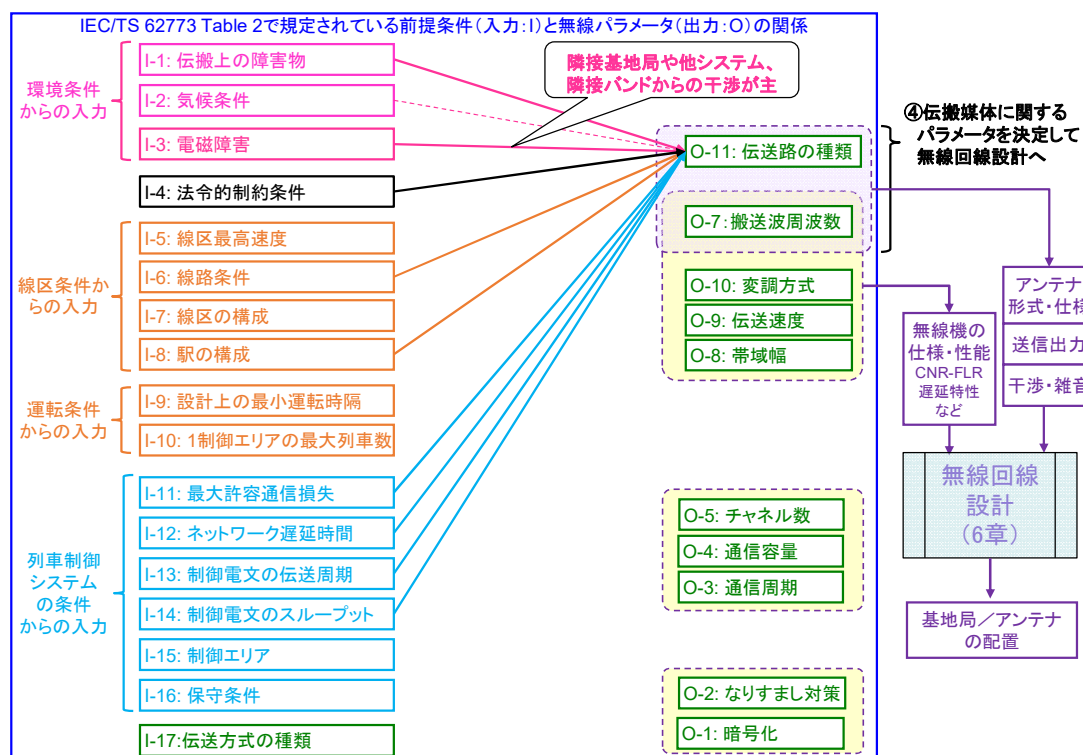


図 18 鉄道事業者が免許を受けて運用する無線局を利用する場合の設計手順のイメージその 3

(2) 免許不要で運用できる無線局のうち 2.4GHz 帯と 5GHz 帯を利用する場合

免許を受けずに運用できる無線局の設計においても、(1)で述べた免許を受けて運用する無線局を利用する場合と同様に、通信リソースに関するパラメータ（①：チャンネル数、通信容量、通信周期）と、セキュリティに関する要件（②：暗号化、なりすまし対策）を設定する（図 19）。

免許を受けて運用する無線局の場合と大きく異なるのは、無線方式のパラメータ（③：搬送波周波数、帯域幅、伝送速度、変調方式）の設定手順である。免許を受けずに運用できる無線局の場合は、免許を受けて運用する無線局よりも設計できるパラメータが限定されるため、無線機の詳細なスペックを細かくカスタマイズできない場合があることに留意する必要がある。なお、セキュリティ対策に関しては、免許を受けて運用する無線機と同様に、情報セキュリティに関する ISO/IEC 規格等も参考にしながら、IEC 62280 が示す考え方に準じて適切な符号化方式、認証方式を選定することが望ましい（図 20）。

無線方式のパラメータを設定したのち、線路条件や線区・駅の構成、電波伝搬環境と電磁環境を考慮して伝搬媒体に関するパラメータを設定する。無線回線設計を行う手順については、(1)で述べた免許を受けて運用する無線局と概ね同じであるが、免許を受けずに運用できる無線局を利用する際には、6.3.4 (2)で述べたように、雑音や干渉による影響を慎重に考慮する必要がある（図 21）。なお、電波法及び関連する規格等によって、空中線の形式や利得、同軸ケーブル長など無線回線設計時に設定・選択できるパラメータの範囲に制約があるので、地上・車上ともアンテナ配置の設計には留意が必要である。また、2.4GHz 帯や 5GHz 帯は波長が短いため回折損が大きく（＝直進性が強く）、見通し内通信が基本となる。伝搬損を求める際には、壁面などの反射物の位置等に基づいて 2 波干渉モデルや多波干渉モデルで計算することで、比較的に実用的な精度で伝搬損を求めることができる。

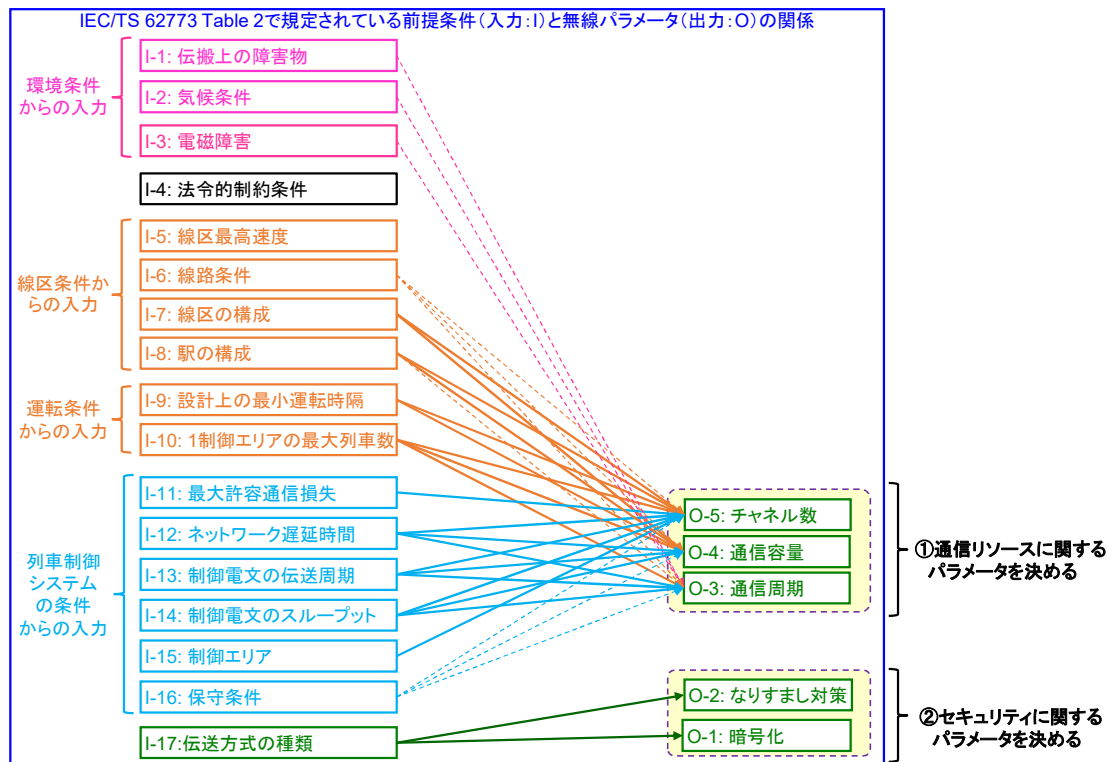


図 19 免許不要で運用できる無線局のうち 2.4GHz 帯と 5GHz 帯を利用する場合の設計手順のイメージその 1

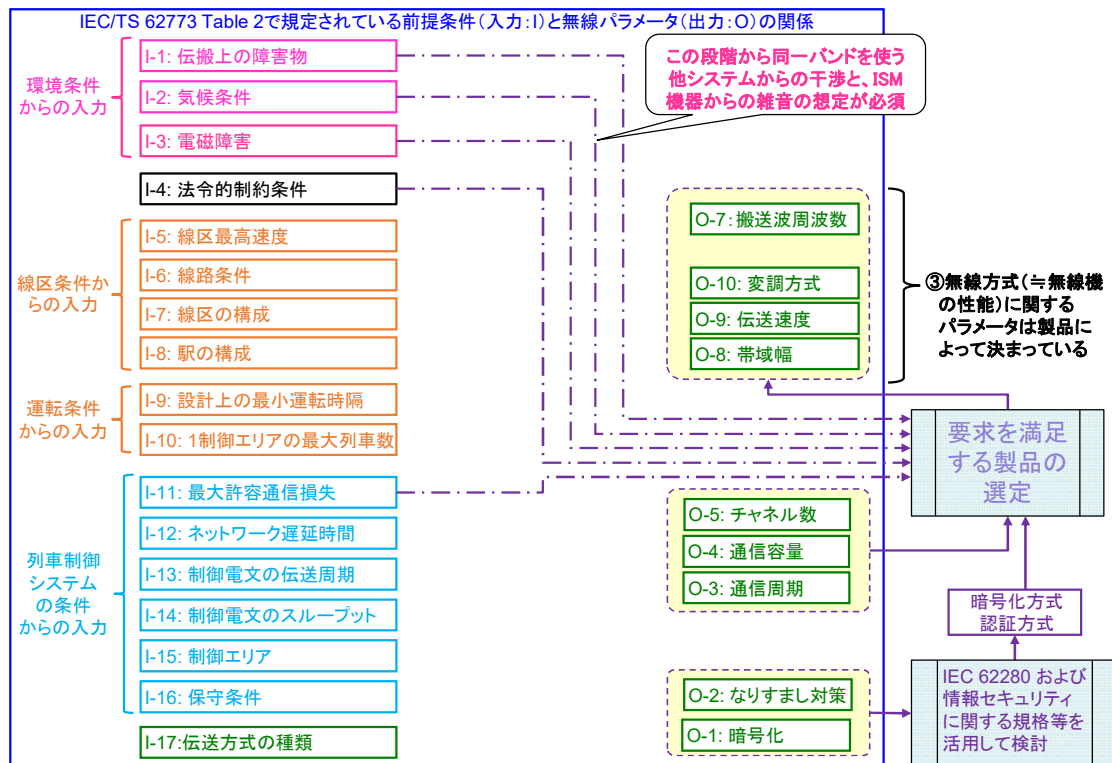


図 20 免許不要で運用できる無線局のうち 2.4GHz 帯と 5GHz 帯を利用する場合の設計手順のイメージその 2

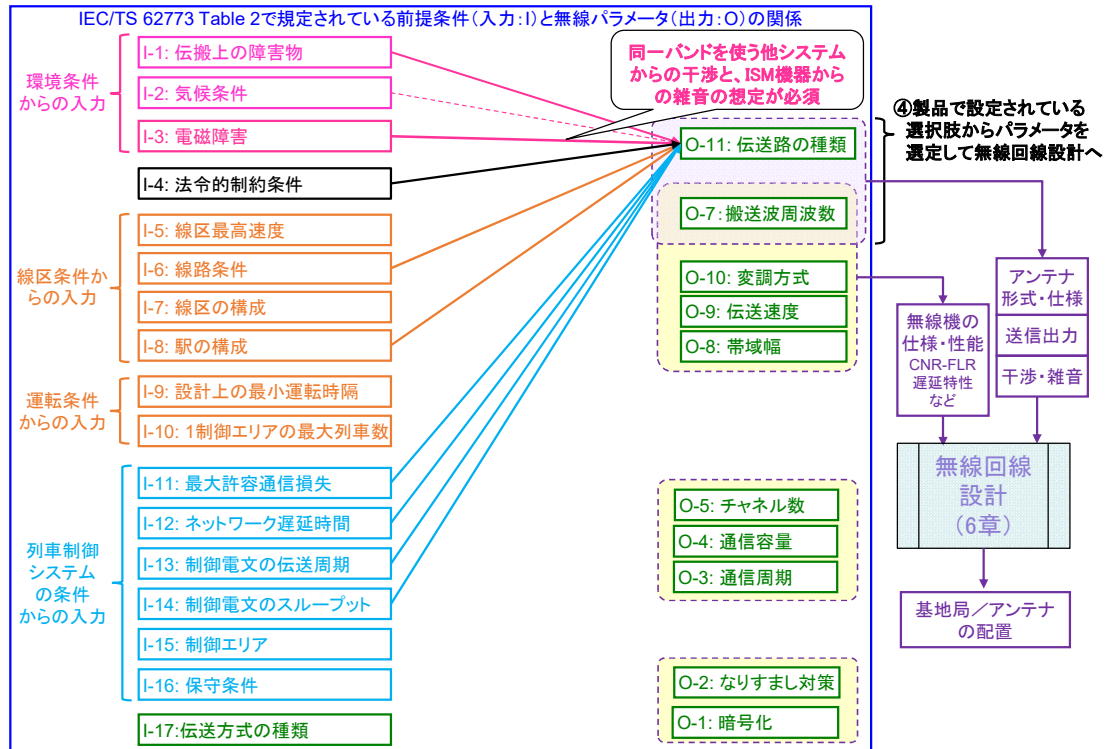


図 21 免許不要で運用できる無線局のうち 2.4GHz 帯と 5GHz 帯を利用する場合の設計手順のイメージその 3

(3) 将来の 5G など公衆網を利用する場合

ここでは、参考のため、将来の無線式列車制御システムに公衆網を利用する場合を想定したときの設計手順のイメージを図 22、図 23 に示す。なお、ここでの例示は、あくまでも無線方式によって設計上考慮できる事項が異なることを示すことが目的であり、無線式列車制御システムへの公衆網の適用可否に対して言及するものではない。

公衆網を利用する場合、通信に対するリソースやセキュリティ要件を設定するところまでは (1)(2) で述べた無線通信システムの場合と同じステップを踏めるが (図 22)、無線方式や伝搬媒体などは全て通信事業者が運用しているシステムによって決定されている。このため、通信リソースやセキュリティに関するパラメータについては、利用の方法や形態に関する通信事業者との調整・検討に向けた要件・条件として整理、設定することが望ましい (図 23)。このような公衆網を利用する場合の環境条件としては、電磁的な障害の考慮よりも、通信事業者が設定しているサービスエリアや、地物による遮蔽等の影響を考慮する必要性が高まるものと考えられる。

なお、5G に関しては、「ローカル 5G」と呼ばれる自営のネットワークの構築も可能である。ローカル 5G は、利用する事業者が無線局免許を受けて運用するため、基地局の配置や空中線系の設計は当該の事業者が行うことになる。従って、免許の取得は必要ではあるが、技術的な無線パラメータの設計手順は (2) で述べた免許不要で運用する無線局の場合に近い手順となる。ただし、令和 2 年度現在では、ローカル 5G を運用する事業者の敷地外に電波が漏えいせず、周囲で通信事業を営む通信事業者への干渉を生じさせないことが免許の条件となっている。将来、これらの条件が緩和されれば、ローカル 5G の活用範囲が広がることも期待できる。

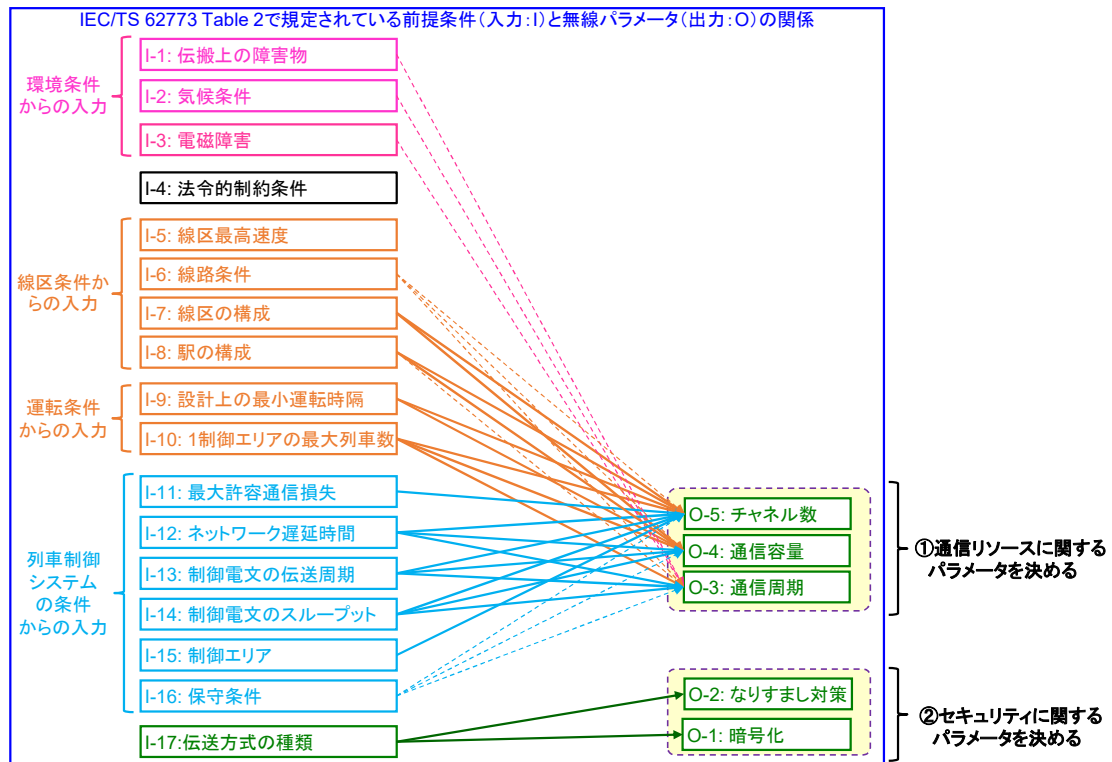


図 22 将来の 5G など公衆網を利用する場合の設計手順のイメージその 1

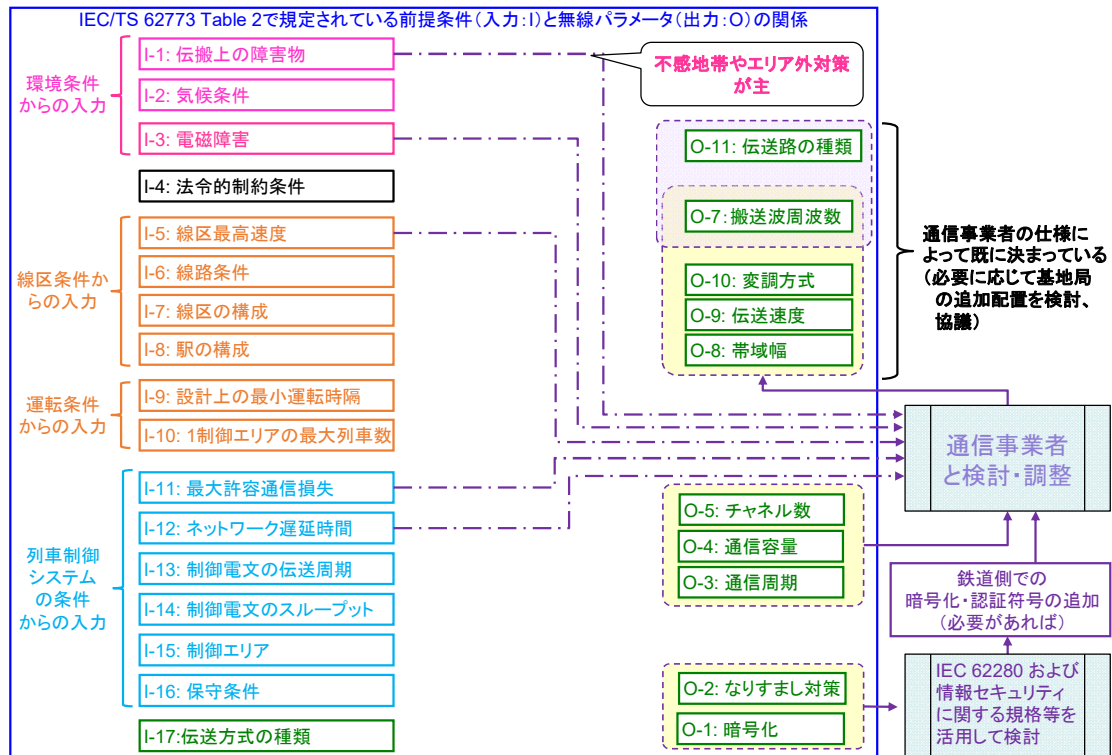


図 23 将来の 5G など公衆網を利用する場合の設計手順のイメージその 2

7.2.3 前提条件の把握・評価手順

本項では、表 3 に示した前提条件として入力される項目（図 15 中の I-1～I-17）について、把握・評価の考え方を示す。

(1) I-1：伝搬上の障害物

伝搬上の障害物とは、列車制御に利用される無線通信システムの性能に影響を与える可能性がある設置物（ビル、橋梁、擁壁、地形等）を言う。

伝送と電波の到達確保のため、電波やアンテナ特性、配置を決定するにあたっては、障害物の形状や配置を考慮する必要がある。また、障害物からのマルチパス伝搬によるフェージングやシャドーイングといった影響を及ぼし、弱電界エリアが発生する可能性がある。

なお、沿線の建造物の条件は、以後の周辺地域開発により変化する可能性があることに留意が必要である。

また、山や河川が存在や起伏といった地形的な特徴は、電波のレンジ特性や吸収特性に影響を与える可能性がある。このような地形的条件は、経年による自然環境の変化（樹木の成長、自然災害等）といった意図しない変化をする可能性がある。

(2) I-2：気候条件

気候条件とは、列車制御に利用される無線通信システムの性能に影響を与える可能性のある気象現象を指す。特に周波数によっては降雨（降水量、スコールの有無）、降雪、雷、霧が電波伝搬に影響し、受信した無線の信号の品質に影響する可能性がある。

(3) I-3：電磁障害

電磁障害とは、周囲の設備（高電圧設備、電力線、高周波設備、電子スイッチングデバイス等）内のノイズ源が、データの伝送品質に影響を与えることを言う。設定にあたっては、6.3.4 節で述べた方法に沿って、列車制御に利用する以外の無線設備、又は、業務用無線等の移動無線からの妨害も含めて影響を考慮することが望ましい。

(4) I-4：法令的制約条件

法令的制約条件とは、無線式列車制御システムを利用する上で、鉄道事業者が考慮すべき無線通信システムに関する法令等に規定される条件を言う。例えば、地上に設置するアンテナの高さ、周波数、放射電力、アンテナの種類（ゲイン及び／又は指向性）、偏波の種類等を含む法令等に規定される条件である。また、無線通信システムの適用（例えば、設計と運用）にあたっては、無線通信システムを設置する国、地域の法が定める無線に関する規定に従わなければならない。障害物や地形に関する法又は規制も考慮してもよい。

(5) I-5：線区最高速度

線区最高速度とは、鉄道事業者が定めた線路網上の一定の区間（以下、「線区」という）における最高速度を言う。線区最高速度を規定する要因としては、線路の構造や車両の性能などの物理的制約のほか、サービスのタイプや周辺環境への配慮などのサービス上の制約などが挙げられる。

(6) I-6：線路条件

線路条件とは、無線通信に影響を与える構造物（トンネルなど）の線路条件と言う。トンネルを例にとると、トンネルの線路上の位置及び長さ、トンネルの構造（トンネル断面の形状及び曲線・勾配・縦曲線などの3次元的な形状など）、トンネル壁面の材質、並びにトンネル内の設置物の有無等が線路条件として挙げられる。トンネル以外の構造物としては、曲線

区間における切取斜面や障害物がある。

(7) I-7：線区の構成

線区の構成とは、単線、複線や複々線等の駅間の線路形状のことを言う。制御エリアや伝送方式等の決定時に考慮する必要がある。

(8) I-8：駅の構成

駅の構成とは、駅の規模及び構造のことを言う。駅の規模とは、無線の到達範囲に影響を与える駅の物理的な広さの他、システムの容量に影響を与える可能性がある配線、プラットフォーム数、駅の広さ（同時在線列車数に関係）等の条件のことを指す。駅の構造とは、無線の電界強度に影響を与える可能性がある高架構造、地下構造、多層構造等の条件のことを指す。

(9) I-9：設計上の最小運転時隔

設計上の最小運転時隔とは、ブレーキ性能、列車長、列車制御システムの性能に関して達成される、続行する 2 本の列車の最小時間間隔を言う。

(10) I-10：1 制御エリアの最大列車数

1 制御エリアの最大列車数とは、無線式列車制御システムの制御対象となるエリア内に同時に在線する可能性がある制御対象列車の本数を言う。制御対象となるエリアをいくつかに分けて制御する場合、最大列車数は、その分割されたエリアごとに定める。

(11) I-11：最大許容通信損失

最大許容通信損失とは、列車制御システムの性能を悪化させない通信がなされない最大の期間（秒）を言う。

(12) I-12：ネットワーク遅延時間

ネットワーク遅延時間とは、ネットワーク・データ・パケットがソース・ノードからネットワークに転送された瞬間から、意図した目的ノードに到達するまでの経過時間を言う。

(13) I-13：制御電文の伝送周期

制御電文の伝送周期とは、1 つの列車制御装置により処理される、2 つの連続した制御電文伝送の間の最低限の時間を言う。

(14) I-14：制御電文のスループット

制御電文のスループットとは、1 列車あたりで評価される、列車制御システムの車上と地上の構成要素間で交換されるデータの速度を言う。

(15) I-15：制御エリア

制御エリアとは、地上と車上間で無線による列車制御情報の伝送が行われるエリアを言う。制御エリアは、全線、区間、駅に分類される。ここで、全線は、沿線の全ての場所において無線による地上と車上間の情報伝送が可能となる場合を指し、区間は、沿線のある区間において無線による地上と車上間の情報伝送が可能となる場合を指す。また、駅は、駅において

のみ、無線による地上と車上間の情報伝送が可能となる場合を指す。このエリアには駅近傍、例えば、場内信号機及び出発信号機から駅中間に向けて一定距離の通信が可能な状態を含む。

(16) I-16：保守条件

保守条件とは、線路や沿線設備の保守のための車両及び作業員に対する条件を言う。安全性を確保するための列車速度制御を行う場合、例えば、沿線の保守作業員と無線伝送を使って通信し、ゾーン内の情報を通信する機能のような特定の機能を考慮しなければならない。

(17) I-17：伝送方式の種類

伝送方式の種類とは、オープン伝送及びクローズド伝送を言う。オープン伝送システムは、未知数の参加者がおり、未知、可変で信頼性の低い特性を有しており、未知のテレコミュニケーション・サービスとして使用されるため、権限のないアクセスの可能性があることを考慮する。また、クローズド伝送システムは、既知かつ固定の特性を持つ伝送システムにより結ばれている、固定数又は最大値固定の参加者がおり、権限のないアクセスのリスクがわずかであることを考慮する。

7.2.4 性能要求事項の設定手順

本項では、表 3 に示した性能要求条件として出力される各パラメータ（図 15 中の O-1～O-11）について、前項で述べた各前提条件に基づいて設定するための手順・考え方を示す。

(1) 「①通信リソースに関するパラメータ群」

これらは列車制御に必要な通信資源の量を表すパラメータ（図 15 中の O-3、O-4、O-5）である。無線システムの性能を決定づける諸量のうち、通信リソースに関するパラメータとしては、通信周期（O-3）、通信容量（O-4）、チャンネル数（O-5）が挙げられている。

i) 通信周期（O-3）

a) 強固な関係にある前提条件

通信周期を設定するにあたって強固な関係にある前提条件としては、1 制御エリア当たりの最大列車数（I-10）、ネットワーク遅延時間（I-12）、制御電文の伝送周期（I-13）とスループット（I-14）がある。

制御エリアで必要な最大列車数と通信できるよう、ネットワーク遅延時間を考慮しながら、規定された制御電文の伝送周期及び最大接続数と共に、要求されるスループットが満たされるように、周期を規定しなければならない。周期が減少すると、パケット管理のためのオーバーヘッドが増えるため、スループットが減少する。

b) 間接的に関係のある前提条件

通信周期を設定する際に、間接的に影響を受ける前提条件としては、伝搬上の障害物（I-1）、気象条件（I-2）、電波障害（I-3）、線路条件（I-6）、駅の構成（I-8）、保守条件（I-16）がある。

伝搬上の障害物（I-1）と気象条件（I-2）については、遮蔽及びマルチパスに起因したフェージングやシャドローイング等の影響によって弱電界となることが考えられるエリアでは、電文が破損する確率（例えばパケットロスや改変）が増大する可能性がある。より小パケットにすることで

短周期での伝送が可能となれば、伝搬上の障害による影響を軽減することができる。

また、電磁障害 (I-3) による妨害を受ける可能性のあるエリアにおいても、電文が破損する確率 (例えばパケットロスや改変) を低減するための対策として、通信周期を短縮することによって伝搬環境の変動を回避することが考えられる。

線路条件 (I-6) と駅の構成 (I-8) も、トンネルや曲線部、あるいは駅舎などの建造物によって電波伝搬損に影響を与える可能性がある。これは伝搬上の障害物 (I-1) と同様の考え方で影響を軽減することが可能である。

なお、沿線の保守員や保守用車の情報の授受に要求される最大応答時間を満足するために、通信周期を考慮することが望ましい。

ii) 通信容量 (O-4)

a) 強固な関係にある前提条件

通信容量を設定するにあたって強固な関係にある前提条件としては、i)で述べた通信周期 (O-3) でも挙げた 1 制御エリア当たりの最大列車数 (I-10)、ネットワーク遅延時間 (I-12)、制御電文の伝送周期 (I-13) とスループット (I-14) に加え、線区構成 (I-7)、駅の構成 (I-8)、最小運転時隔 (I-9) がある。

線区の構成 (I-7) については、複数の軌道が平行して配置されているような線区では同時に多数の列車との通信が必要になる場合が多いことから、同時最大制御列車数を考慮して通信容量を規定する必要がある。

また、駅の構成 (I-8) に関しては、駅舎や屋根等による通信品質の低下が懸念されるため、無線容量を設定する際には駅での伝送特性も考慮する必要がある。

設計上の最小運転時隔 (I-9) に関しては、最小運転時隔によって求められる編成数と通信できるように通信容量を設定する必要がある。

1 制御エリアの最大列車数 (I-10)、ネットワーク遅延時間 (I-12)、制御電文の伝送周期 (I-13) についても、制御エリアで必要な最大列車数と通信できるよう、ネットワーク遅延時間要求と制御電文の伝送周期を満たせる通信容量を設定する必要がある。

b) 間接的に関係のある前提条件

通信容量を設定する際に、間接的に影響を受ける前提条件としては、i)で述べた通信周期 (O-3) でも挙げた条件のうち、線路条件 (I-6)、保守条件 (I-16) がある。

線路条件 (I-6) については、例えばトンネル内や曲線部など弱電界となる区間では通信容量が減少することが考えられるため、線路条件を考慮して容量の増強を検討することが望ましい (例えば、帯域幅の拡大や伝送速度の増加など)。

保守条件 (I-16) に関しては、複数の作業員が同一エリアで一度に作業する場合、データ量の増加に対応する必要性が生じる可能性があることから、通信容量の設定時に保守作業も考慮することが望ましい。

iii) チャンネル数 (O-5)

a) 強固な関係にある前提条件

チャンネル数を設定するにあたって強固な関係にある前提条件としては、ii)で述べた通信容量 (O-

4) で挙げた線区構成 (I-7)、駅の構成 (I-8)、最小運転時隔 (I-9)、1 制御エリア当たりの最大列車数 (I-10)、ネットワーク遅延時間 (I-12)、制御電文の伝送周期 (I-13) とスループット (I-14) に加え、最大許容通信損失 (I-11) と制御エリア (I-15) がある。

線区の構成 (I-7) と駅の構成 (I-8) については、複数の軌道が平行して配置されている場合や、複数の列車が同時に存在する場合を想定して、最大列車数の制御に必要な周期で地上・車上間通信できるように、チャンネル数を設定する必要がある。

また、設計上の最小運転時隔 (I-9) と 1 制御エリアの最大列車数 (I-10)、ネットワーク遅延時間 (I-12)、制御電文の伝送周期 (I-13)、制御電文のスループット (I-14) についても、最小運転時隔に依存する必要な編成数あるいは 1 制御エリア内で扱う最大列車数と通信できるように、チャンネル数を設定する際に考慮する必要がある。

さらに、チャンネル数については、最大許容通信損失 (I-11) を満たせるよう、通信回線の容量を超えないように設定する必要がある。

また、制御エリア (I-15) の設定方法に応じて、以下のような考慮が必要である。

- ・制御エリアを全線とするシステムの場合
全線に亘り、システム上要求される最大列車数を考慮して設定
- ・制御エリアをある一部の区間とするシステムの場合
そのエリアにおいてシステム上要求される最大列車数を考慮して設定
- ・制御エリアを駅構内及び駅近傍とするシステムの場合
そのエリアにおいてシステム上要求される最大列車数を考慮して設定

b) 間接的に関係のある前提条件

チャンネル数を設定する際に、間接的に影響を受ける前提条件としては、ii) で述べた通信容量 (O-4) と同様に、線路条件 (I-6)、保守条件 (I-16) がある。

線路条件 (I-6) については、例えばトンネル内や曲線部など弱電界となる区間では 1 アンテナ毎の伝送エリアが狭くなり、接続数が減少することが考えられることから、必要な列車と通信できるように接続数を設定することが望ましい。

また保守条件 (I-16) に関しては、複数の作業員が同一エリアで一度に作業する場合、データ量の増加に対応する必要が生じる可能性があることから、通信容量 (O-4) と同様に、チャンネル数についても保守作業時の接続数を考慮することが望ましい。

(2) 「②セキュリティに関するパラメータ群」

これらはセキュリティ対策のためのパラメータ (図 15 中の O-1、O-2) である。セキュリティ対策のためのパラメータは、システムへの侵入に対する対応方法を取り扱うものであり、暗号化 (O-1)、なりすまし対策 (O-2) が挙げられる。

無線式列車制御で利用する無線通信システムは、伝搬路上へのアクセスを完全にはコントロールできないため、IEC 62280 で定められている「オープンな伝送路」である。このため、秘匿性を高めるために適切な妨害対策 (暗号化) を施す必要があり、また、悪意ある攻撃によって列車制御伝送への侵入を防ぐため、認証技術等を利用して適切ななりすまし対策を施す必要がある。

(3) 「③無線方式に関するパラメータ群」

これらは無線機の仕様、性能を決定づけるパラメータ（図 15 中の O-7、O-8、O-9、O-10）である。無線機の性能を決定づける諸量のうち、無線方式に関するパラメータとしては、搬送波周波数（O-7）、帯域幅（O-8）、伝送速度（O-9）、変調方式（O-10）が挙げられる。

i) 搬送波周波数（O-7）

a) 強固な関係にある前提条件

搬送波周波数を設定する際に、強固な関係にある前提条件としては、法令的制約条件（I-4）、最大許容通信損失（I-11）、ネットワーク遅延時間（I-12）、制御電文の伝送周期（I-13）、制御電文のスループット（I-14）がある。

法令的制約条件（I-4）については、必要な QoS を確保するために使用できる周波数の選定において、電波法が定める周波数利用に関する諸規則を考慮する必要がある。

また、最大許容通信損失（I-11）とネットワーク遅延時間（I-12）に関しては、電文の損失に与える影響の最小化や、使用する周波数域の特性（伝搬距離、利用可能な伝送速度等）を踏まえてネットワーク遅延時間を確保できるよう、周波数を選択する必要がある。

さらに、制御電文の伝送周期（I-13）に対して要求される伝送速度を達成できるように、また、要求される制御電文のスループット（I-14）を達成できるように、変調方式と共に周波数を設定する必要がある。

b) 間接的に関係のある前提条件

搬送波周波数を設定する際に、間接的に関係のある前提条件としては、伝搬上の障害物（I-1）、気候条件（I-2）、電磁障害（I-3）、線区最高速度（I-5）、線路条件（I-6）がある。

伝搬上の障害物（I-1）による遮蔽及びマルチパスに起因するフェージングとシャドーイングや、気候条件（I-2）によるフェージングにより、弱電界となることが考えられるエリアでは、必要とされるサービスエリアを満たすように搬送波周波数を選定することが望ましい。また、電磁障害（I-3）については、人工的な妨害源や他の通信システムによる干渉を回避するよう、使用する搬送波周波数を考慮することが望ましい。

さらに、線区最高速度（I-5）については、高速化によるフェージングや、ドップラーシフトの影響を考慮すること、線路条件（I-6）については、iii）と同様にトンネル内や曲線部などによる搬送波周波数と通信距離との関係（使用帯域等への、周辺環境の影響）を考慮することが望ましい。

ii) 帯域幅（O-8）

a) 強固な関係にある前提条件

帯域幅を設定する際に、強固な関係にある前提条件としては、法令的制約条件（I-4）、制御電文の伝送周期（I-13）、制御電文のスループット（I-14）がある。

法令的制約条件（I-4）については、電波法の下で使用できる周波数の電波伝搬性と利用できる帯域幅、必要とされる通信容量を考慮する必要がある。また、放射電力に対する法的基準によって伝送範囲が制限されることを考慮し、必要な QoS を確保するように帯域幅を設定する必要がある。

る。また、帯域幅を設定するにあたっては、制御エリアにおける最大列車数を考慮し、制御電文の伝送周期 (I-13) に対して多数の接続を確保できること、制御電文のスループット (I-14) に対して十分な伝送速度を確保できることを考慮する必要がある。

b) 間接的に関係のある前提条件

帯域幅を設定する際に、間接的に関係のある前提条件としては、設計上の最小運転時隔 (I-9)、1 制御エリアの最大列車数 (I-10) がある。

最小運転時隔 (I-9) に依存する必要な編成数を制御できる多数の接続を確保できるように、また、1 制御エリアの最大列車数 (I-10) を制御できる多数の接続を確保できるように帯域幅を設定することが望ましい。

iii) 伝送速度 (O-9)

a) 強固な関係にある前提条件

伝送速度を設定する際に、強固な関係にある前提条件としては、ネットワーク遅延時間 (I-12)、制御電文の伝送周期 (I-13)、制御電文のスループット (I-14) がある。

ネットワーク遅延時間 (I-12) に関しては、要求時間を満たすことができる伝送速度を設定する必要がある。なお、伝送速度を向上させることにより、ネットワーク遅延時間を低下させることができる。また、制御電文の伝送周期 (I-13) やスループット (I-14) を達成するように、伝送速度を設定する必要もある。

b) 間接的に関係のある前提条件

伝送速度を設定する際に、間接的に関係のある前提条件としては、伝搬上の障害物 (I-1)、気候条件 (I-2)、電磁障害 (I-3)、線路条件 (I-6) がある。

伝搬上の障害物 (I-1) の遮蔽及びマルチパスに起因したフェージング及び／又はシャドーイングのため、弱電界となることが考えられるエリアでは、通信容量を満たすよう伝送速度を考慮することが望ましい。

また、気候条件 (I-2) により、弱電界となることが考えられるエリアでは、伝送速度は要求される通信容量を満たすように考慮することが望ましい。

さらに、電磁障害 (I-3) については、人工的電磁障害等により干渉を受けることが考えられる区間では、干渉により引き起こされる電文の損失により、実効の伝送速度が減少する可能性がある。そのため、要求される通信容量を確保できるよう伝送速度を設定することが望ましい。変調方式によっては、伝送速度を減少させることで電文の損失を低減することができる。

線路条件 (I-6) については、弱電界となる可能性のある区間（トンネルや曲線部でアンテナ毎の伝送エリアが狭くなる可能性がある区間等）では伝送速度が低下する可能性があり、必要な伝送速度で通信を行えるよう考慮することが望ましい。

iv) 変調方式 (O-10)

a) 強固な関係にある前提条件

搬送波周波数の場合と同様に、変調方式を設定する際に、強固な関係にある前提条件としては、法令的制約条件 (I-4)、最大許容通信損失 (I-11)、ネットワーク遅延時間 (I-12)、制御電文の伝送周期 (I-13)、制御電文のスループット (I-14) がある。

法令的制約条件 (I-4) については、必要な通信品質を実現するため、電波法の下で利用できる周波数帯の伝搬特性を考慮して変調方式を設定する必要がある。放射電力に対する法的な基準により電波が到達する範囲が制限されることも考慮したうえで、必要な QoS を確保するように変調方式を規定する必要がある。

また、最大許容通信損失 (I-11) を考慮して十分な伝送速度等が確保できるようにすると共に、決められたネットワーク遅延時間 (I-12) に対して要求される伝送速度を満たすように変調方式を選定する必要がある。

さらに、制御電文の伝送周期 (I-13) に対して要求される伝送速度を達成し、かつ制御電文のスループット (I-14) に対しても十分な伝送速度等が確保できるように変調方式を選定する必要がある。

b) 間接的に関係のある前提条件

搬送波周波数の場合と同様に、変調方式を設定する際に、間接的に関係のある前提条件としては、伝搬上の障害物 (I-1)、気候条件 (I-2)、電磁障害 (I-3)、線区最高速度 (I-5)、線路条件 (I-6) がある。

伝搬上の障害物 (I-1) によって遮蔽及びマルチパスに起因するフェージングとシャドーイング、また気候条件 (I-2) による影響を受けて弱電界となることが考えられるエリアでは、これらの影響を考慮したうえで適切な変調方式を選択することが望ましい。

また、電磁障害 (I-3) については、人工的な雑音や他システムによる干渉の影響が考えられる場合には、想定される雑音・干渉に耐えうる変調方式を選定することが望ましい。

さらに、線区最高速度 (I-5) の高速化によるフェージングやドップラーシフトの影響、線路条件 (I-6) に基づく地形によるフェージングの影響を配慮して変調方式を考慮することが望ましい。

(4) 「④伝送媒体に関するパラメータ群」

これらはアンテナ形式や伝搬形態などを表すパラメータ (図 15 中の O-7、O-11) である。無線システムの性能を決定づける諸量のうち、伝送媒体に関するパラメータとしては、搬送波周波数 (O-7)、伝送路 (O-11) が挙げられる。搬送波周波数 (O-7) については(3)「③無線方式に関するパラメータ群」の(1)で既に述べているので、ここでは伝送路 (O-11) のみ考え方を示す。

i) 伝送路 (O-11)

a) 強固な関係にある前提条件

伝送路を設定する際に、強固な関係にある前提条件としては、伝搬上の障害物 (I-1)、電磁障害 (I-3)、法令的制約条件 (I-4)、線路条件 (I-6)、駅の構成 (I-8)、最大許容損失 (I-11)、ネットワーク遅延時間 (I-12)、制御電文の伝送周期 (I-13)、制御電文のスループット (I-14) がある。

伝搬上の障害物 (I-1) による遮蔽及びマルチパスに起因したフェージング及び／又はシャドーイングのため、弱電界となることが考えられるエリアや、電磁障害 (I-3) に関して人工的な雑音や他システムによる干渉を受けることが考えられる区間では、伝送路の選定やその機器の設置条件 (アンテナの指向性、配置等) を決定する (= 無線回線設計を行う) 際に、これらの影響を考慮する必要がある。

また、法令的制約条件 (I-4) については、電波法上の基準に沿いつつ必要な QoS を確保するよ

うに伝搬の種類（＝アンテナ方式）を設定する必要がある。加えて、放射電力に対する電波法上の基準により電波が到達するエリアが制限される場合も考慮したうえで、必要な通信品質を確保するように適切な伝搬媒体を規定する必要がある。

線路条件（I-6）については、弱電界となる可能性のある区間（トンネルや曲線部等）においても必要な QoS を確保できるように、伝送路の種類やアンテナの指向性等を設定する必要がある。駅の構成（I-8）に関しても、駅舎や屋根などの障害物による影響を考慮して伝搬媒体を選択する必要がある。

さらに、最大許容通信損失（I-11）、ネットワーク遅延時間（I-12）、制御電文の伝送周期（I-13）制御電文のスループット（I-14）を考慮したうえで、必要な QoS が確保できるように伝送路を選定する必要がある。

b) 間接的に関係のある前提条件

伝送路を設定する際に、間接的に関係のある前提条件としては、気象条件（I-2）がある。

気象条件（I-2）によって弱電界となることが考えられるエリアでは、必要な QoS を確保するように、伝搬の種類やアンテナの指向性、配置等を考慮することが望ましい。

7.3 制御システムの相互運用性を考慮した無線通信システムの設計の考え方

現在、同一列車が複数の線区に相互に乗り入れる運用が多数の線区で行われている。このような線区では、制御システムの相互運用性を考慮して無線通信システムを設計、構築する必要がある。本節では、相互乗り入れに際して必要となる無線通信システムの設計の考え方、すなわち表 3・図 15 に示した無線パラメータ（O-1～11）を設定するにあたっての基本的な考え方を示す。

7.3.1 既に導入済みの線区と新規に導入する線区で直通運転する場合

双方の線区で無線通信を成立させるためには、表 3・図 15 のうち無線パラメータ（O-1～11）を一致させる必要がある。導入済線区で使用されている無線通信システムを新規に導入する線区に適用することが基本とはなるが、新規に導入する線区の線区条件（明かり区間か、地下か、など）によって無線周波数を切り替える方法の導入を検討する必要がある場合がある。例えば、既導入線区で 2.4GHz 帯を利用していた場合、新規に導入する区間での電波環境の調査によって干渉波の電力密度（もしくは送出頻度）が大きい場合は、2.4GHz 帯以外の周波数域の適用を検討する必要がある。

また、制御情報の伝送フォーマットも、既存線区のシステムで使用されているものを新規に導入する線区のシステムにも適用することが望ましい。ただし、制御システムからの要求条件が一致しない場合は、オプションの情報フィールドを活用するか、既導入線区への影響が生じることが容認できるならば両者の条件を包含できるようにフォーマットを再設定することも検討の対象となりうる。

7.3.2 無線方式が異なる 2 つのシステムが既に稼働している場合

表 3・図 15 のうち無線パラメータ（O-1～11）を一致させる必要があるが、周波数が同一帯域であれば、無線機を SDR（Software Defined Radio：ソフトウェア無線）として実装することにより複数無線方式に対応させる方法もある。周波数帯が異なる場合は、無線機本体のハードにつ

いては共通化する方法がとれるが、アンテナと高周波部については、両システム分搭載し、線区によって切り替える機構を導入するなどの対応が必要である。

いずれか一方の無線通信システムの更新が可能であるならば、更新可能な線区の無線通信システムを、更新しない側の線区の仕様に合わせる方法も可能である。ただし、更新しない側の線区で使用している周波数帯が、更新可能な線区の電波環境に適用可能か否かの調査、確認が必要である。

また、制御情報の伝送フォーマットについては、双方の線区で共通している部分と一致しない部分とを整理し、フォーマット変換などのソフトウェア処理を行う方法が考えられる。

7.3.3 未導入の2つの線区に新たに導入する場合

検討・設計の段階から、双方の線区における伝搬環境や制御システムからの要求を踏まえて表3・図15のうち無線パラメータ（O-1～11）を双方の線区で共通化することが基本となる。ただし、伝搬環境あるいは制御システムからの要求が異なり、パラメータの一部もしくは全てが共通にできない場合は、一致させることができないパラメータについては線区ごとに分けて2重の設定（搬送波周波数やアンテナを変えるなど）とする、要求条件が厳しい方の条件で設定する、などの方法が考えられる。

また、制御情報の伝送フォーマットについても、双方の線区で共通化させることが基本となる。

8. 設計事例と仕様の例示

本章では、図15で示した各パラメータや無線回線設計の結果得られる基地局間隔等の具体例として、免許を受けて運用する無線システムと、免許を受けずに運用できる2.4GHz帯の無線通信システムを利用した場合について、鉄道事業者が導入又は導入を検討しているシステムの設定例を示す。

以下の各節で示す図24～27は、図15で示した前提条件と無線パラメータの関係を事例に沿って示すものであり、具体的な標準として示すものではない。このため、図中に示すパラメータの値等は、文献等で公表されている範囲、もしくは一般的に知られている範囲内で記載した。なお、図24～27中の入力条件やパラメータを表すボックス間を結ぶ矢印は、図15と同一の関係を示すものであり、図ごとに違いはない。

8.1 免許を受けて運用する無線通信システムを利用する場合

8.1.1 実験システム（CARAT）

CARAT は日本で初めてコンピュータと無線によって列車を制御するシステムとして(公財)鉄道総合技術研究所で開発された。ここでは、1990 年代に行われた山陽新幹線と上越新幹線での実証実験に適用された無線通信システムを例として、図 15 で示した入力条件（I-1～17）と無線パラメータ（O-1～11）の内容と対応関係を図 24 に示す。なお、CARAT の実験システムで使用された無線機は実験用に試作されたものだが、空中線系は新幹線列車無線として実運用されている LCX 回線を利用していたため、無線回線設計の内容についてはここでは割愛する。

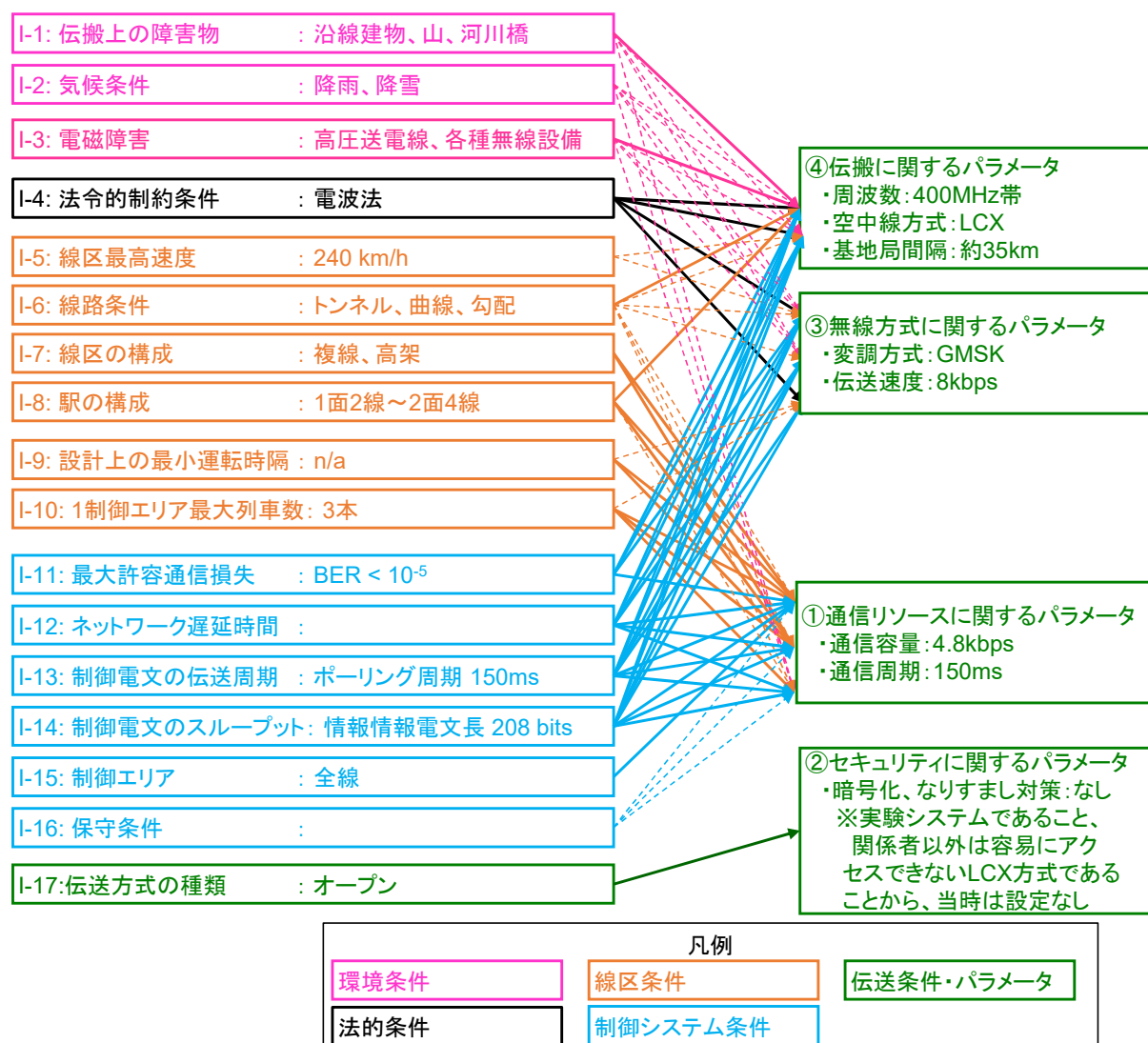


図 24 実験システムに適用された無線通信システムの例

8.1.2 実用システム（仙石線 ATACS プロトタイプシステム）

ATACSは東日本旅客鉄道(株)が1990年代からCARATの技術をベースに在来線向けに開発した無線式列車制御システムであり、2011年に仙石線で運用が開始された。ここでは、仙石線での実験に用いられていたプロトタイプシステムに適用されていた無線通信システムを例として、図15で示した入力条件（I-1～17）と無線パラメータ（O-1～11）の内容と対応関係、ならびに無線回線設計の一部を図25に示す。

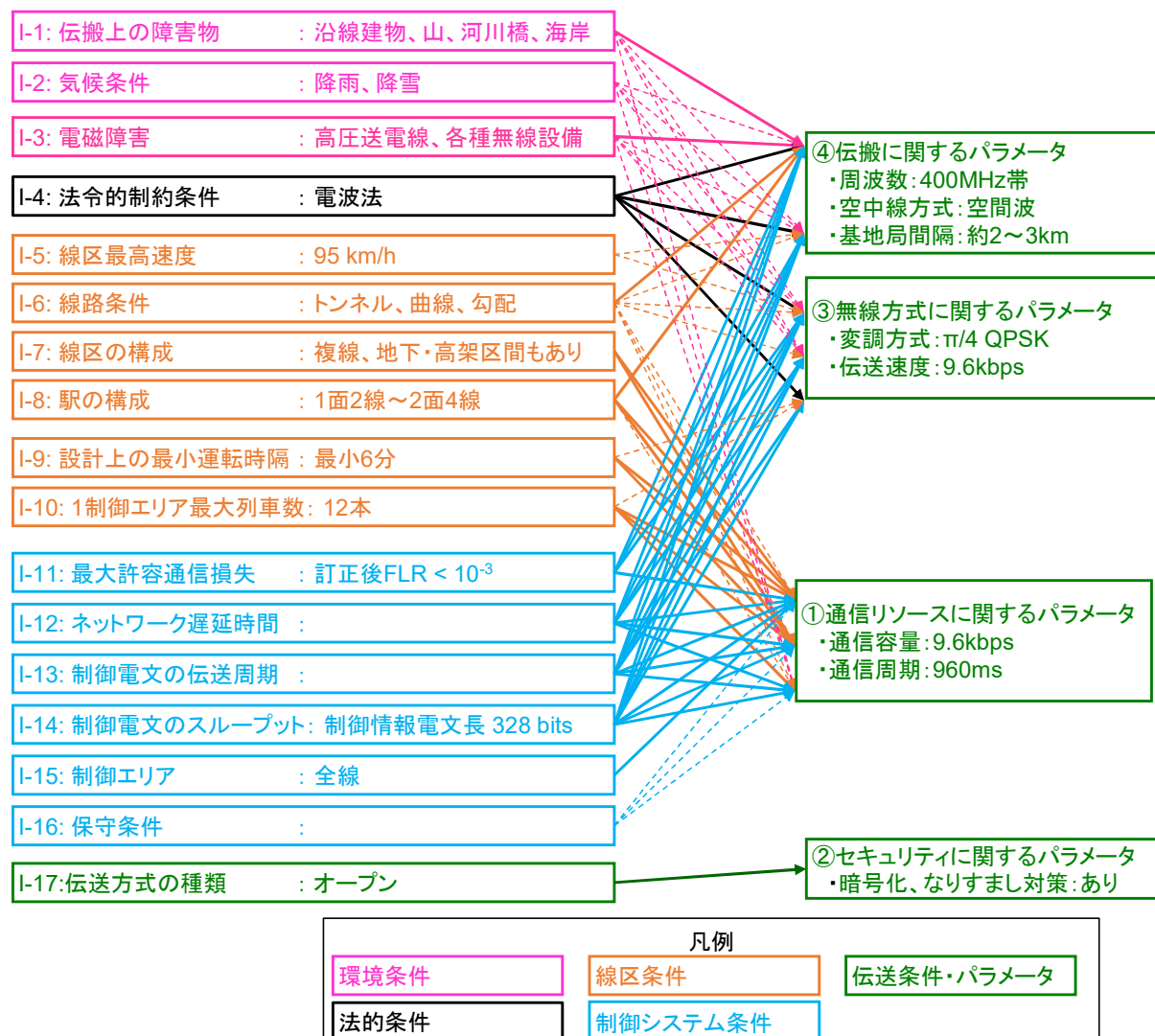


図 25 実用システムに適用された免許を受けて運用する無線通信システムの例

8.2 免許を受けずに運用できる 2.4GHz 帯無線通信システムを利用する場合

8.2.1 開発中の CBTC プロトタイプシステムその 1

ここでは、各種 CBTC のうち、2.4GHz 帯を利用した地下鉄向けに開発されたプロトタイプシステムに適用されている無線通信システムを例として、図 15 で示した入力条件（I-1～17）と無線パラメータ（O-1～11）の内容と対応関係、ならびに無線回線設計の一部を図 26 に示す。

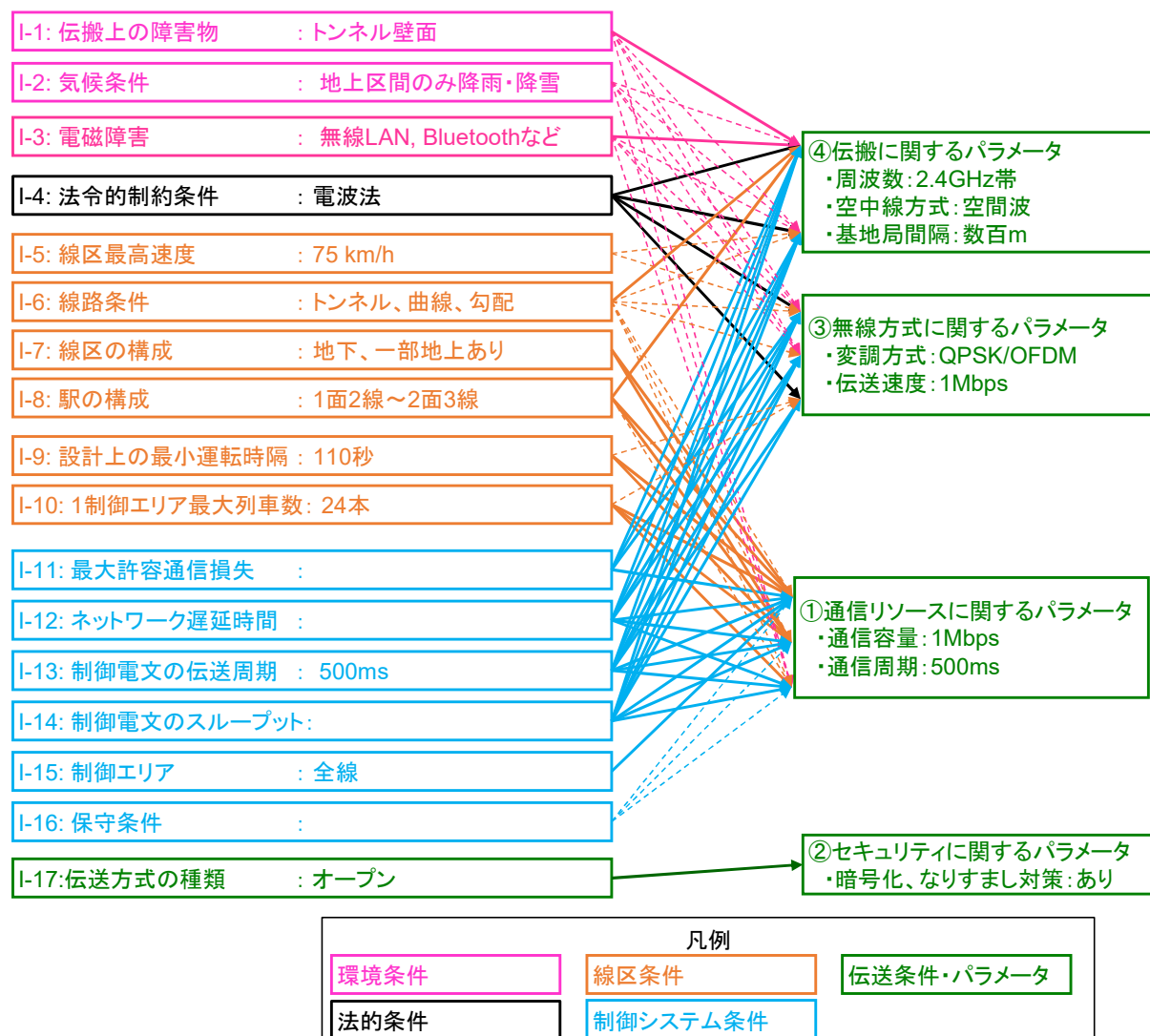


図 26 2.4GHz 帯を用いる地下鉄向け CBTC の無線通信システムの例（その 1）

8.2.2 開発中の CBTC プロトタイプシステムその 2

ここでは、8.2.1 節で示した事例とは別の線区向けに開発されたシステムを例として、図 15 で示した入力条件（I-1～17）と無線パラメータ（O-1～11）の内容と対応関係、ならびに無線回線設計の一部を図 27 に示す。

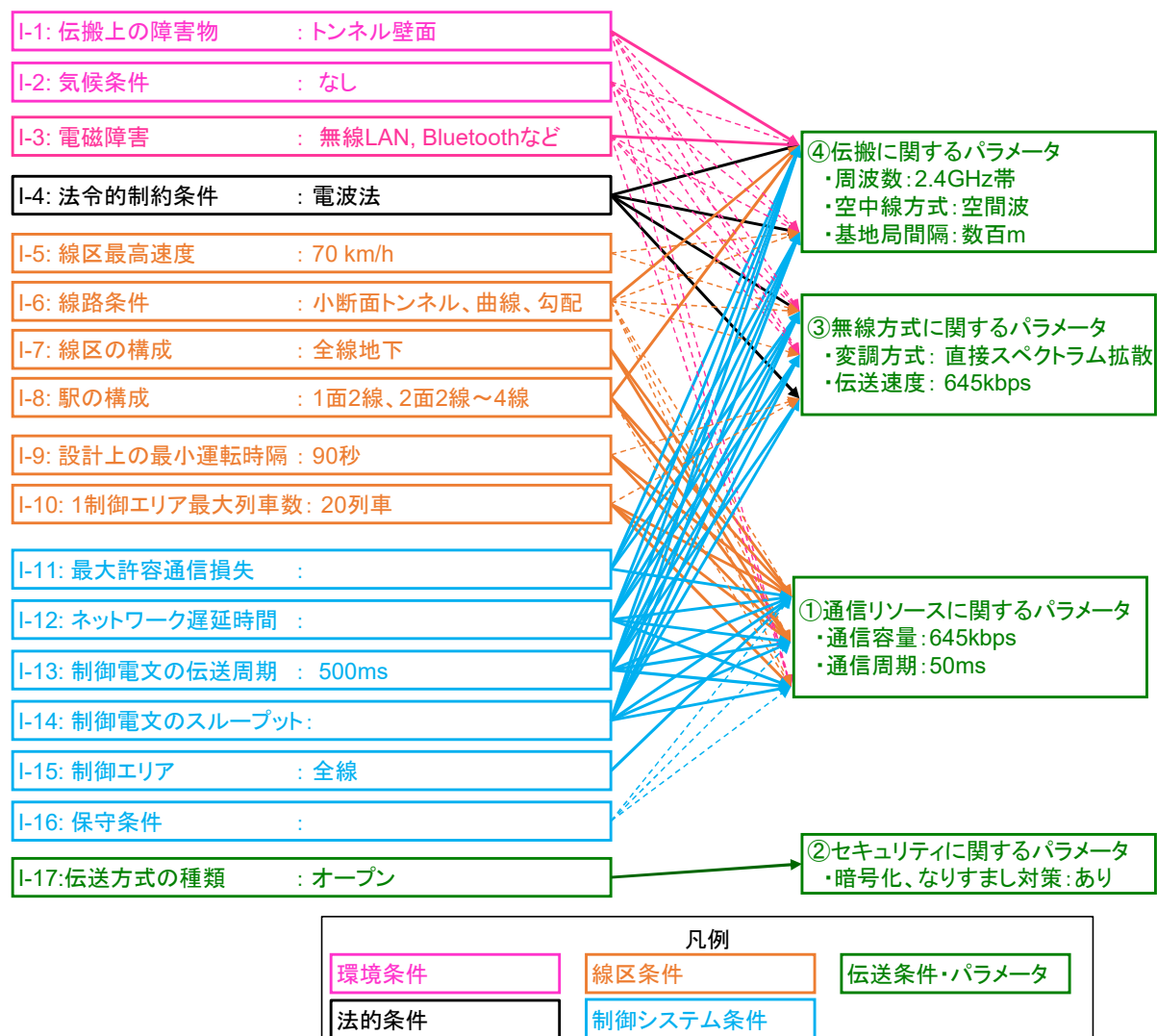


図 27 2.4GHz 帯を用いる地下鉄向け CBTC の無線通信システムの例（その 2）

9. まとめ

本ガイドラインでは、無線式列車制御システムにおいて制御情報を地上一車上間で伝送するために使用される無線通信システムの適切かつ効率的な設計・構築に資することを目的として、無線通信システムを設計する際の基本的な考え方と、制御情報の伝送に必要な性能要件を設定するための手順、設計事例および仕様の例示を行った。本ガイドラインは、特定の無線通信システムの具体的な仕様や統一方法を示すものではなく、異なる CBTC 方式の区間における相互運用性の確保を容易にすることを目指して作成したものである。

なお、鉄道事業者が自ら構築して運用する無線通信システムを主たる対象としたが、将来における第五世代移動通信システムなど公衆網の活用を想定し、通信事業者が提供する回線サービスを利用する際に考慮することが望まれる事項についても参考情報として示した。

今後、国内における CBTC の導入において、相互運用性を考慮した無線回線設計を行う際に、本ガイドラインが活用されることを期待する。