

ワイヤレス電力伝送システムと鉄道設備との共用に関する検討の経緯と結果

一般社団法人日本鉄道電気技術協会

ワイヤレス電力伝送システムと鉄道設備共存検討会

1. 検討会設置の経緯

近年、スマートフォン等の非接触充電に使用される100kHz帯の近接接合型ワイヤレス電力伝送(WPT)システムの高度化に向けた検討が進められている。この検討にあたっては、WPTシステムから漏洩する電波が鉄道事業者の使用するATS等の信号保安設備や誘導式列車無線設備に影響を及ぼすことがないように相互に調整する必要があることから、総務省から国土交通省を通じて100kHz帯のWPTシステムと鉄道電気設備の共用における条件等を整理したいとの依頼を受け、2022年12月に「ワイヤレス電力伝送システムと鉄道設備共存検討会」(以下、検討会)を設置した。検討会には、100kHz帯のWPTシステムを使用する場合に影響が生じる可能性のある設備を保有する鉄道事業者と関連設備のメーカー、鉄道総合技術研究所、ブロードバンドワイヤレスフォーラム(BWF)が委員として参加した。

2. 検討の対象とした設備の概要

2.1 対象設備

本検討会において検討の対象とした設備を表1に示す。

表1 検討対象設備

干渉側 (WPT)		被干渉側 (鉄道側設備)
スマートフォン・電動工具その他家電等の 非接触充電用 WPT (最大出力 300W)		ATS等の信号保安設備および 誘導式列車無線設備のうち、 100~148.5kHz の周波数帯を 使用している設備
項目	仕様	
販売先	一般カスタマーを含む	
充電対象機器	Laptop PC, 電動工具など(電池搭載機器)	
使用環境	家庭、オフィス、公共スペース、列車内など	
送電電力	~300W	
最大伝送距離	~10mm	
送受電コイルサイズ	~直径80mm程度	
送電形態	1対1	
安全機能	受電装置を検出後、必要十分な電力を送電 受電部不在の状態では充電は開始されない 以下の場合送電を停止 金属等 異物の近接 / 制御通信の途絶 / 送受電装置の離間 / 装置の温度上昇、過電圧/過電流検出	
利用形態	人体が対象機器へ接触することも想定 但し、人体が送受電コイル間に入ることは想定しない	
動作周波数	100k~148.5kHz ・ITU-R SM.2129-0の推奨帯域 ・充電中は結合状態・負荷状態に応じ周波数を変更しうる ・周波数変更時の変化幅は1kHz程度 ・始動時の周波数は各社ごとに異なる	
変調の有無	正弦波の伝送であり(負荷)変調は実施しない ・充電制御用の通信は別帯域の無線を使用	

2.1.1 信号保安設備

信号保安設備は、列車運行の安全を確保するための最も基本的な設備である。信号保安設備には、微小な高周波電流や密な電磁的な結合を用いて、列車の在線検知、信号機や速度制限に対する防護、力行・ブレーキの制御を行っているものがある。主な信号保安設備の例としては、以下の装置が挙げられる。

- ・ATS 装置：自動列車停止装置（信号機、速度制限に対する防護）
- ・ATC 装置：自動列車制御装置（ブレーキ制御）
- ・ATO 装置：自動列車運転装置（力行・ブレーキ制御）
- ・TD 装置：列車の在線を検知する装置
- ・列車選別装置：急緩種別により踏切を制御する装置
- ・踏切装置：踏切鳴動のための列車検知(バックアップ装置含む)、障害物検知を行う装置
- ・その他装置：ホームドア連携装置、車軸による列車検知、速度検知装置など

信号保安装置が許容できる強度以上の電磁的な干渉を受けた場合、列車の誤検知や未検知、速度情報の誤り等といった事象に至り、列車の安全運行を阻害するおそれがある。信号保安設備には、JIS E 3005（点制御式自動列車停止装置—試験方法）に従って1ターンループコイル（図1）に流れる妨害電流値をもって耐妨害特性を規定しているもの（以下「Type A」装置と呼ぶ）と、軌道回路のようにレール自体に流れる妨害電流値として、耐妨害特性を規定しているもの（以下「Type B」装置と呼ぶ）がある。

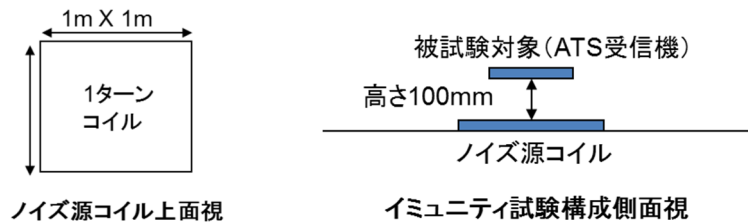


図1 信号保安設備における耐妨害性特性の試験で用いられるコイルの大きさや配置

2.1.2 誘導式列車無線設備

誘導式列車無線は、図2に示すように、線路に沿って設置された誘導線と列車の車上に設置されたアンテナとの間で通信を行う高周波利用設備である。本設備は、地上の指令員と列車の乗務員との間で安全・安定運行のために必要な指示・情報の伝達を行うためのものであり、鉄道に関する技術上の基準を定める省令（平成十三年国土交通省令第百五十一号）上の保安用通信設備として位置付けられている。当初は音声通話用として1950年代から導入が始まった設備であるが、現在は列車を制御するための情報の伝送に利用される場合もある。

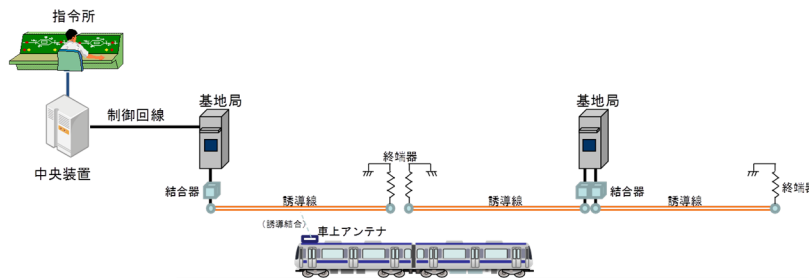


図2 誘導式列車無線システムの概要

2.2 想定されるユースケースと被干渉側設備

今回の検討対象となる WPT が利用される場面としては、家庭内やオフィス内のほか、列車内での利用も想定されるため、以下に示す2つのユースケースを想定することとした。

ユースケース①：線路近傍の住居やオフィスで WPT を使用する場合

- 想定される被干渉側設備： 誘導式列車無線設備における 誘導線および車上アンテナ
 (ATS 等の信号保安設備における 車上装置本体および車上子
 地上子・ループコイル・レール)
 ※信号保安設備は今回の調査対象から除外（干渉を受けないため）。

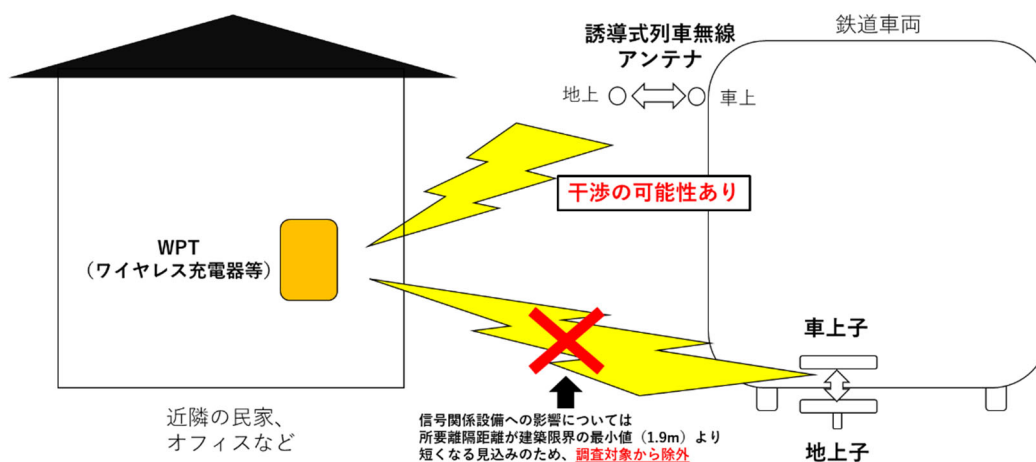


図3 ユースケース①：線路近傍の住居やオフィスで WPT を使用する場合

ユースケース②：列車内で WPT を使用する場合

- 想定される被干渉側設備： 誘導式列車無線設備における 誘導線および車上アンテナ
 ATS 等の信号保安設備における 車上装置本体および車上子
 地上子・ループコイル・レール

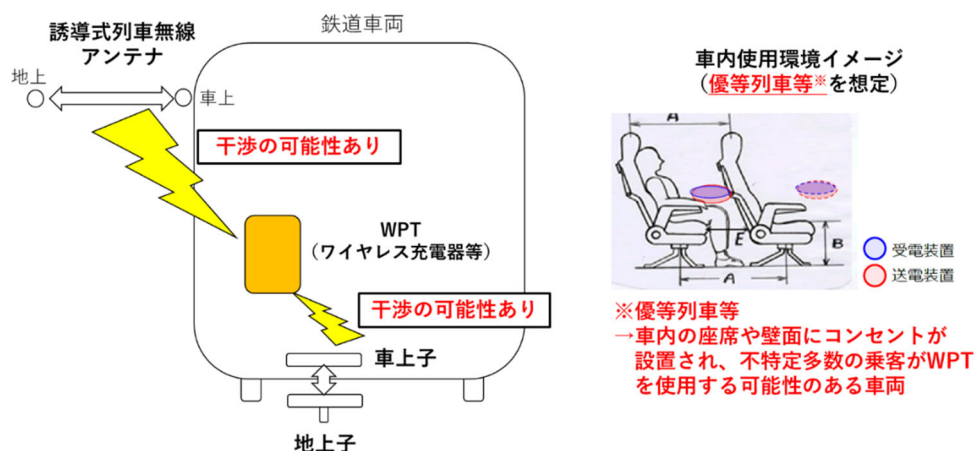


図4 ユースケース②：列車内で WPT を使用する場合

2.3 検討対象とする鉄道設備に関する調査

本検討会で検討対象とする WPT が使用する周波数域（100kHz～148.5kHz）において稼働している鉄道設備に関する調査を行った。この本調査の実施にあたっては、主に以下の項目について情報提供を依頼した。

- ・ 100kHz～148.5kHz を使用する設備の有無
- ・ 当該設備が設置されている線区における、車内にサービスコンセント（旅客が利用可能な AC 100V のコンセント）が設備されている列車の運行の有無
- ・ 誘導式列車無線については空間波方式への切替計画の有無
- ・ 信号保安設備もしくは誘導式列車無線設備の配置や車両の床面の高さなど

情報提供を依頼した鉄道事業者は 102 社局、メーカーは 7 社である。また、索道事業者における使用状況についても日本索道工業会を通じて調査を行った。

調査の結果、誘導式列車無線については 18 社局で上記周波数域を利用しており、側面式、屋根上水平式、床下式、床下側面式、間接結合式、の 5 つの結合方式が利用されていた。また、18 社局のうち、7 社については空間波方式への切替が予定されているが、11 社局については現時点では切替の計画はされていなかった。ATS 等の信号保安設備については 63 社局が上記周波数域で稼働する信号保安設備を運用しており、このうち 21 社局では車内にサービスコンセント（旅客が利用可能な AC 100V のコンセント）が設備されている車両を運行していた。具体的な設備としては、ATS（自動列車停止装置）、ホームドア連携装置、踏切バックアップ装置などが該当することがわかった。なお、鋼索鉄道については、10 社が 100kHz 帯の誘導式列車無線を利用しており、空間波方式への切替計画は確認できなかった。

以上の調査結果を踏まえ、本検討会では、信号保安設備としては ATS、踏切バックアップ装置、ホームドア連携装置を、誘導式列車無線設備としては上で列挙した 5 つの結合方式を対象として、具体的な共用検討を行うこととした。

3. 共用検討の基本方針と手順

共用条件の考え方、具体的な検討の手順、所要離隔の計算方法等については、2013 年度（平成 25 年度）～2015 年度（平成 27 年度）に実施された自動車用 WPT・家電機器用 WPT との共用検討と同じ手順・方法を踏襲することとした。共用条件の基本的な考え方と、技術的な検討手順を以下に示す。

3.1 共用条件の基本的な考え方

鉄道業界として共用が可能と判断できる条件は以下のとおりと考える。

- i) WPT で使用する周波数と、鉄道設備が使用する周波数が重ならない。

または

- ii) 鉄道設備に干渉が生じる距離より近い位置には、WPT を置きえない。

（沿線での使用時は建築限界内に入っている、車上での使用時は客室外に出る、など）

または

- iii) 所要離隔距離以内の場所に WPT が置かれないような運用を行いかつ WPT が置かれないことを担保する制度が設けられる。

3.2 技術的な検討の手順

①WPT が放射する磁界強度の距離特性の計算

ワイヤレス電力伝送システム～鉄道側設備間の距離と磁界強度との関係を計算により把握する（計算時のパラメータ：出力、離隔距離）。

- ・ATS の場合は、磁界強度を、現行の耐妨害試験における妨害電流に換算する。
- ・モデルの基本的な考え方は、図 5 のように干渉側と被干渉側の双方のコイル面が並行となる最悪ケースであり、図 6 に示す微小ループモデルを用いる。

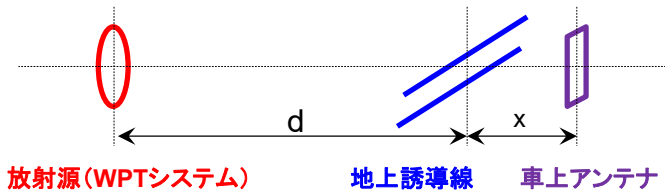


図 5 干渉検討における基本モデル（誘導無線の場合の例）

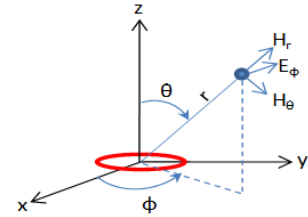


図 6 微小ループモデル

②鉄道側設備の耐性の把握

鉄道側設備が許容できる妨害電流もしくは磁界強度を把握する。

- ・ATS の場合は、耐妨害試験において誤検知・検出不能に至らない試験電流値
- ・誘導無線の場合は、所定の通話 SNR が確保できる干渉波の受信機入力電圧値

③共用条件の検討

①と②の結果より、共存可能な周波数範囲、離隔距離、最大出力を求める。

3.3 所要離隔距離の具体的な計算の考え方

干渉が発生しないための所要離隔距離を d_{int} 、鉄道事業者が関与しなければ WPT を設置することができない信号保安設備からの離隔距離を d_{acc} としたとき、法的な規制等の制約条件を設けることなく共用が可能であるためには、以下の式を満足する必要がある。

$$d_{int} < d_{acc}$$

上記の条件が満足できない場合は、WPT が信号保安設備から d_{int} 以内の距離の位置に設置されないようにするための法的な規制を設定する必要がある。

d_{int} の算出にあたっては、自動車用 WPT との共用検討時に行われた実験によって検証済のシミュレーションモデルを使用する。

d_{acc} の算出は、沿線で使用される場合と車上で使用される場合の双方を想定して行う必要がある。沿線で使用される場合については、自動車用 WPT との共用検討時に用いた以下の考え方に準じる。

- 被干渉側信号保安設備が外側レールに相当する箇所には置かれることを想定し、実際に使用されている鉄道の建築限界および軌間の値を基に典型的な値を定義して算出
- 計算の目安となる建築限界および軌間の典型値については、自動車用 WPT との共用検討時に行われた調査によって整理された以下の値を用いることを基本とする。
 - ✓ 建築限界の線路横断方向の典型的な最小値：全幅 3,000mm（軌間の中心からの距離で 1,500mm）

- ✓ 建築限界の上部方向の典型的な最小値：レールレベルから 3,500mm
- ✓ 軌間の典型的な最大値：1,435mm（軌間の中心からの距離で $717.5\text{mm} \div 2 = 720\text{mm}$ ）

車上で使用される場合については、今回の検討対象となる WPT が実際に使用される条件にあわせて想定する位置関係を整理、設定した。

4. 共用検討結果

4.1 WPT と鉄道設備との位置関係

まず、2 章で述べた調査結果に基づいて、WPT と鉄道設備の位置関係を整理し、所要離隔距離を計算する必要のあるモデルケースを抽出した。信号保安設備（ATS、踏切バックアップ装置、ホームドア連携装置）の整理結果を図 7、誘導式列車無線（側面式、屋根上水平式、床下式、床下側面式、間接結合式）の整理結果を図 8 に示す。

図 7、8 に示した組み合わせのうち、交差するセルに「要計算」と記入されているモデルが、実際に起こりうる位置関係であり、かつ最悪ケースが想定されるため計算を行う必要のある組み合わせとして抽出されたものである。抽出されたモデルケースを表 2 に示す。

表 2 計算対象として抽出されたモデルケースの一覧

鉄道設備		WPT の使用位置	モデルケース名
信号保安設備	ATS の車上子	車内の床面	ATS-車内①
	踏切バックアップ装置の地上子	車内の床面	踏切 Bu-車内①
	ホームドア連携装置の車上アンテナ	車内のドア際	ホームドア連携装置-車内②
誘導式列車無線設備	側面式の車上アンテナおよび誘導線	車内の窓際	誘導無線 A-車内②
		沿線（車両の横）	誘導無線 A-沿線①
	屋根上水平式の車上アンテナおよび誘導線	沿線（車両の上）	誘導無線 B-沿線①
		沿線（車両の下）	誘導無線 B-沿線②
床下式の車上アンテナおよび誘導線	車内の床面	誘導無線 C-車内①	

WPT側 信号設備側		WPT装置配置					
		車内 ※旅客が利用できるコンセントがある車両が走行する線区のみ対象 ①信号設備の上	②信号設備の横	③その他：2階建車両の1階床面	①横（線路近傍）	沿線 ②上（線路上空）	③下（線路下）
ATS	車上アンテナ	要計算 【ATS-車内①】	最悪ケースとなる使用形態が想定されない	ATS-車内①の計算結果を準用して判断	ATS-車内①の計算結果を準用して判断	最悪ケースとなる使用形態が想定されない	ATS-車内①の計算結果を準用して判断
踏切Bu	地上アンテナ	要計算 【踏切Bu-車内①】	最悪ケースとなる使用形態が想定されない	ATS-車内①の計算結果を準用して判断	踏切Bu-車内①の計算結果を準用して判断	最悪ケースとなる使用形態が想定されない	踏切Bu-車内①の計算結果を準用して判断
ホームドア連携装置	車上アンテナ	最悪ケースとなる使用形態が想定されない	要計算 【ホームドア-車内②】	最悪ケースとなる使用形態が想定されない	ホームドア-車内②の計算結果を準用して判断	準入線区において状況としてあり得る必要確認	準入線区において状況としてあり得る必要確認

図7 信号保安設備とWPTとの位置関係と、所要離隔距離を計算するモデルケースの抽出結果

WPT側 誘導無線側		WPT装置配置					
		車内 ※旅客が利用できるコンセントがある車両が走行する線区のみ対象 ①誘導無線の上（床面・産座など）	②誘導無線の横	③その他：新橋の上など天井付近	①横（線路近傍）	沿線 ②上（線路上空）	③下（線路下）
A：側面式	車上アンテナ	誘導無線A-車内②の計算結果を準用して判断	要計算 【誘導無線A-車内②】	WPTの使い方として想定されない	要計算 【誘導無線A-横①】	誘導無線A-沿線①の計算結果を準用して判断	最悪ケースとなる使用形態が想定されない
	地上誘導線	誘導無線A-車内②の計算結果を準用して判断		WPTの使い方として想定されない		誘導無線A-沿線①の計算結果を準用して判断	最悪ケースとなる使用形態が想定されない
B：屋根上水平式	車上アンテナ	最悪ケースとなる使用形態が想定されない	最悪ケースとなる使用形態が想定されない	WPTの使い方として想定されない	要計算 【誘導無線B-横①】	要計算 【誘導無線B-沿線②】	最悪ケースとなる使用形態が想定されない
	地上誘導線	最悪ケースとなる使用形態が想定されない	最悪ケースとなる使用形態が想定されない	WPTの使い方として想定されない			最悪ケースとなる使用形態が想定されない
C：床下式	車上アンテナ	要計算 【誘導無線C-車内①】	最悪ケースとなる使用形態が想定されない	WPTの使い方として想定されない	誘導無線B-沿線①の計算結果を準用して判断	対象なし	対象なし
	地上誘導線		最悪ケースとなる使用形態が想定されない	WPTの使い方として想定されない	誘導無線B-沿線①の計算結果を準用して判断	対象なし	対象なし

図8 誘導式列車無線設備とWPTとの位置関係と、所要離隔距離を計算するモデルケースの抽出結果

WPT側		WPT装置配置					
		車内 ※旅客が利用できるコンセントがある車両が走行する線区のみ対象 ①誘導無線の上(床面・座席など) ②誘導無線の横 ③その他：前棚の上など天井付近			沿線 ①横(線路近傍) ②上(線路上空) ③下(線路下)		
誘導無線側							
D: 床下側面式	車上アンテナ 	誘導無線A-車内②の計算結果を準用して判断	最悪ケースとなる使用形態が想定されない	WPTの使い方として想定されない	誘導無線A-沿線①の計算結果を準用して判断	最悪ケースとなる使用形態が想定されない	導入線区において状況としてあり得るか要確認
	地上誘導線 	誘導無線A-車内②の計算結果を準用して判断	最悪ケースとなる使用形態が想定されない	WPTの使い方として想定されない	誘導無線A-沿線①の計算結果を準用して判断	最悪ケースとなる使用形態が想定されない	導入線区において状況としてあり得るか要確認
E: 間接結合式	車上アンテナ 	対象なし	対象なし	WPTの使い方として想定されない	誘導無線B-沿線①の計算結果を準用して判断	対象なし	対象なし
	地上誘導線 (誘導線) (トコリ線) 	対象なし	対象なし	WPTの使い方として想定されない	誘導無線B-沿線①の計算結果を準用して判断	対象なし	対象なし

図8 誘導式列車無線設備とWPTとの位置関係と、所要離隔距離を計算するモデルケースの抽出結果(つづき)

4.2 WPTからの離隔距離と磁界強度の関係

共存可能距離の計算を行う際には、WPT～鉄道設備間の距離と磁界強度との関係を計算により求める必要がある。本節では、共存可能距離の算出にあたって基準となる磁界強度値を示すとともに、距離特性の計算方法と計算結果について述べる。

4.2.1 距離特性の計算において基準とする磁界強度値

本検討では、ブロードバンドワイヤレスフォーラムから提示された磁界強度の実測値(34.5dBμA/m)を計算の基準として用いた。この実測値は、基本波周波数138kHz、伝送電力100Wで動作している際に、充電可能な範囲で送電コイルと受電コイルに位置ずれが生じた条件において離隔距離3mの位置で測定された最大値とされている。

100kHz帯磁界結合型WPTの製品の多くは100Wクラスとのことではあるが、基本技術条件で示されている伝送電力の最大値が300Wであることから、今回の計算にあたっては、3m離隔における測定値34.5dBμA/mに4.8dB(電力比3倍)を加えた39.3dBμA/mを基準として用いることとした。また、周波数による強度変動はなく、100kHz～148.5kHzの範囲において同一強度が放射されるものと仮定して計算を行うこととした。なお、参考として、伝送電力が100Wの場合についても計算を行うこととした。

4.2.2 距離特性の計算結果

WPTから放射される磁界強度の計算は、3.2節でも述べたとおり、微小ループアンテナモデルを用いて行った。モデル図と計算式を図9に示す。このモデルは、電気自動車用WPTとの共用検討時にも使用したもので、ループ面と計算点との位置関係を考慮して磁界強度を計算することができる。

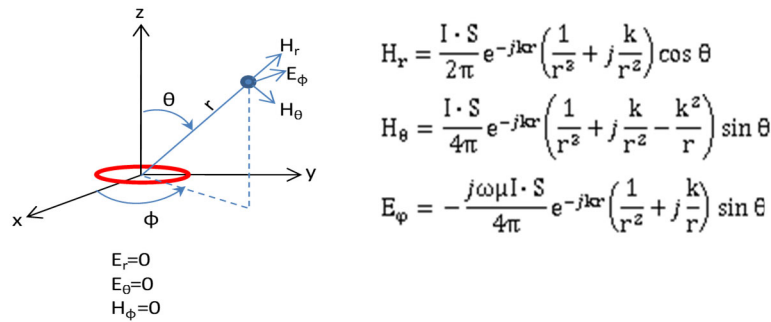


図9 微小ループモデルと計算式

図9中の式のうち H_r と H_θ が磁界成分であり、計算に必要なパラメータは以下のとおりである。

I : 微小ループに流す電流 [A] ← n ターンのコイルに I' [A] 流す場合は $n \times I'$ を設定

S : 微小ループの面積 [m^2]

k : 波数 [m^{-1}] = $2\pi/\lambda$ (λ は波長 = 周波数 f [Hz] / 光速 c [m/s])

r : 微小ループからの距離 [m]

θ : z 軸方向 (ループ面に対して垂直方向) からの角度 [rad]

まず、図9に示したモデルを用いて、 $r=3m$ 、 $\theta=0^\circ$ のときに磁界強度の絶対値 $|H|$ が $39.3dB\mu A/m$ となる I を求めると、 $I=0.912A$ となる。なお、周波数は $145kHz$ とし、ループの面積 S とターン数については、4.2.1 節で述べた実測値が測定された際に用いられたコイルの外径寸法 ($39.5mm$) とターン数 (14 ターン) を用いて設定した。

ループコイルの電流値 I が求められれば、放射源から距離 r 、方向 θ にある点における磁界強度を計算することができる。 $I=0.912A$ として、 $r=0.1m \sim 10m$ の範囲で θ を 0° 、 45° 、 90° に変えたときの磁界強度の絶対値 $|H|$ を求めた結果を図10に示す。なお、参考のため、図10中には、電気自動車用 WPT との共用検討時の計算結果 (周波数 $145kHz$ 、 $43.9dB\mu A/m@30m$ 、 $S=1m^2$ 、 $I=26.47A$) も記載した。

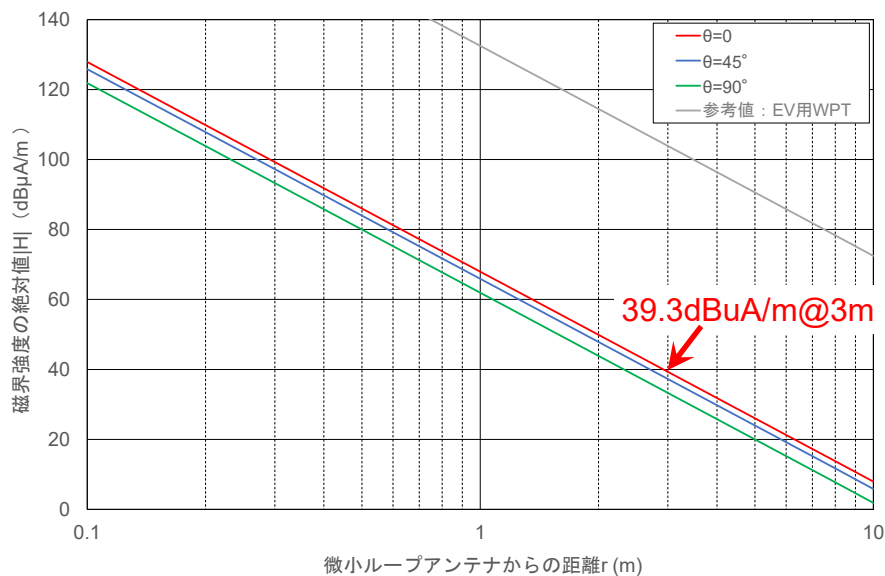


図10 磁界強度の計算結果

図9中の数式および図10の計算結果からわかるように、放射される電磁波の波長（約2km）と比べて波源に極めて近い位置においては、波源からの距離の3乗に反比例して減衰する成分が支配的となる。今回の共存可能距離の検討では、WPTと鉄道側設備との距離が数m以内に接近するケースが想定されることから、波源からの距離の3乗に反比例するものとして計算を行うことが妥当と考えられる。

また、 θ が 0° の場合と 90° の場合の差が約6dBとなっており、WPTと鉄道側設備との位置関係によってはWPTのループコイル面と鉄道側設備側のループコイル面がなす角度を考慮して計算する必要があることがわかる。図9における H_r および H_θ と θ の関係を計算した結果を図11に示す。次節以降の計算では、図12に示すように、WPTのループコイル面と鉄道側設備のループコイル面がなす角度に応じて、磁界成分として H_r と H_θ のいずれかを選択（ $0^\circ < \theta < 90^\circ$ の場合は H_r と H_θ をベクトル合成）して離隔距離の計算を行った。

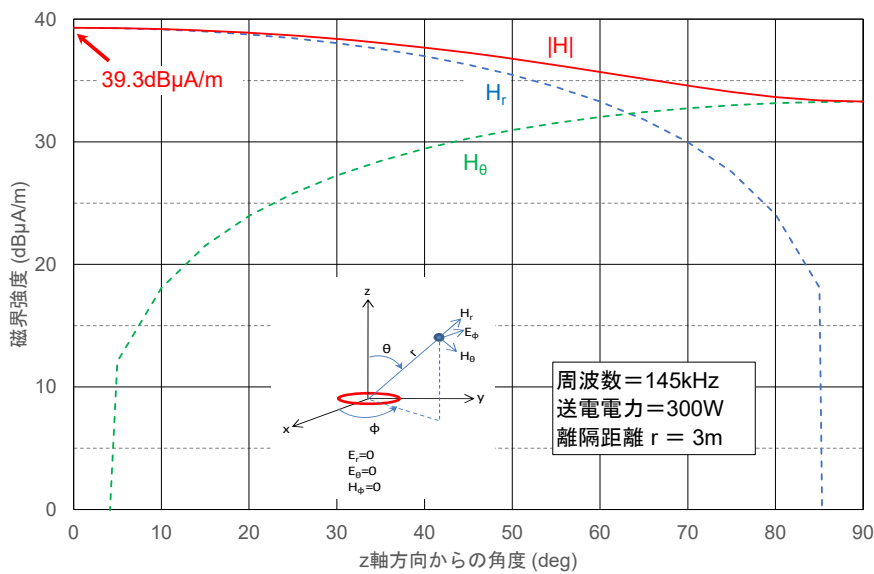


図11 WPTのループコイル面と鉄道側設備のループコイル面がなす角度と磁界成分の関係

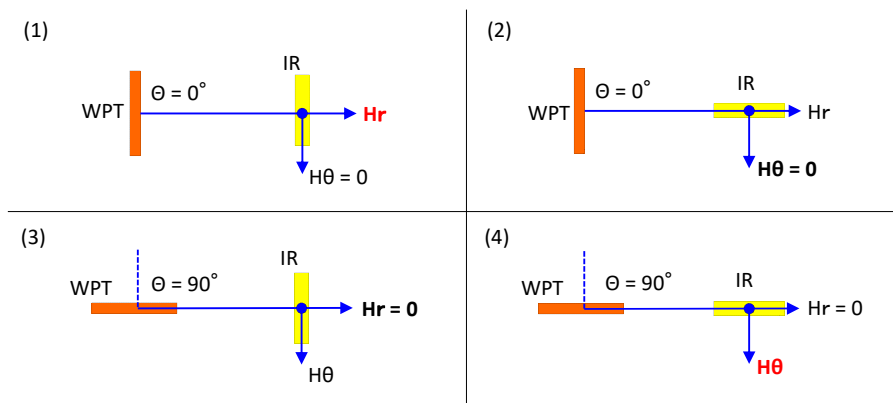


図12 所要離隔距離の計算において用いる磁界成分の例

4.3 WPTによって鉄道設備が影響を受ける離隔距離の計算結果

4.3.1 信号保安設備

(1) 鉄道信号設備の耐妨害特性

100kHz 帯磁界結合型 WPT の動作周波数 100kHz～148.5kHz における鉄道信号設備は、ATS 車上受信器のように 1m×1m の 1 ターンループコイルに流れる妨害電流値として、耐妨害特性を規定できるもの¹のみとなる。本検討会において実施した耐妨害性に関する調査の結果、100kHz～148.5kHz における鉄道信号設備の妨害許容値の最小値は表 3 に示す値であった。

表 3 鉄道信号設備の妨害許容値

WPT の使用周波数 帯域区分	鉄道信号設備の耐妨害特性	
	1m×1m の 1 ターンループコイルに流れる妨害電流値	備考
100～148.5kHz	3.15mA	ATS 装置
	5.8mA	踏切バックアップ装置
	60mA	ホームドア連携装置

(2) 所要離隔距離の計算方法

WPT と鉄道信号設備が共存可能な距離は、表 3 に示した耐妨害特性を確保するために必要な放射源との離隔距離から求めることができる。100kHz 帯磁界結合型 WPT の放射磁界強度については、4.2 節で示したとおり、3m 地点での測定値である 34.5dB μ A/m (300W 換算：39.3dB μ A/m) を用いて、放射源からの距離が 3m 以下の範囲では z 軸方向の磁界成分が放射源からの距離の 3 乗に比例して減衰するものとして計算を行った。

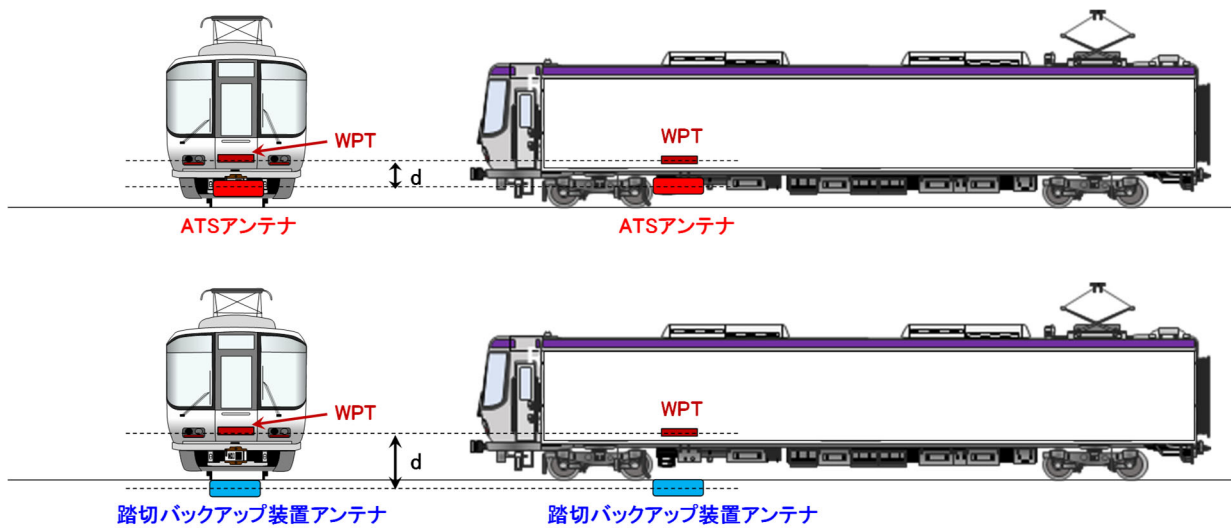
一方、1 ターンループコイルに実効値 1mA の電流を流したときにコイル上部 100mm 地点に生じる磁界強度は、電気自動車用 WPT との共同検討時に行われたシミュレーションにより、最大 1.6mA/m と求められている²。100kHz 帯磁界結合型 WPT から放射される磁界の強度から 1 ターンループコイルの電流値への換算にあたっては、上記の関係をを用いることとした。例えば、WPT から放射される z 軸磁界の強度が 39.3dB μ A/m のとき、1 ターンループコイル電流への換算値は 35.2dB μ A となる。

(3) 計算結果

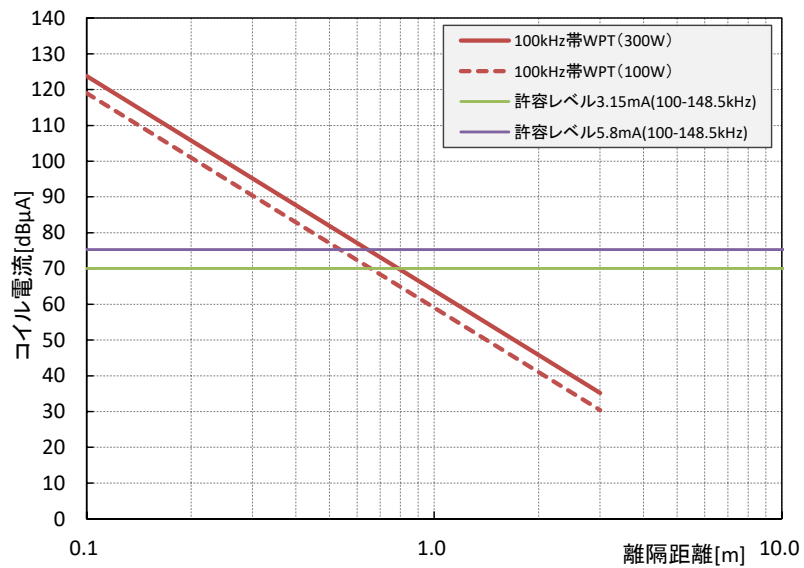
WPT からの距離と信号設備の妨害電流値との関係を求めた結果を図 13 および図 14 に示す。図 13 は ATS 装置および踏切バックアップ装置、図 14 はホームドア連携装置である。各図のタイトルには、4.1 節の表 2 で示したモデルケースの名称を付記した。いずれの図とも、(a)が計算モデルのイメージ図、(b)が離隔距離の計算結果である。

¹電気自動車用 WPT との共同検討時に「Type A」とした装置に該当する。

²電気自動車用 WPT との共同検討時にブロードバンドワイヤレスフォーラムが作成した資料による。

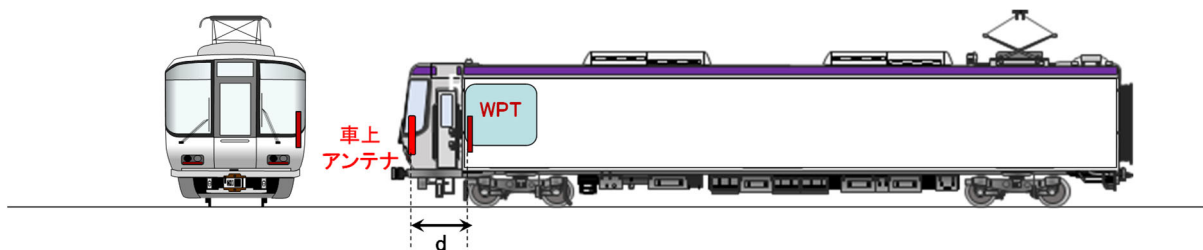


(a) モデルのイメージ図

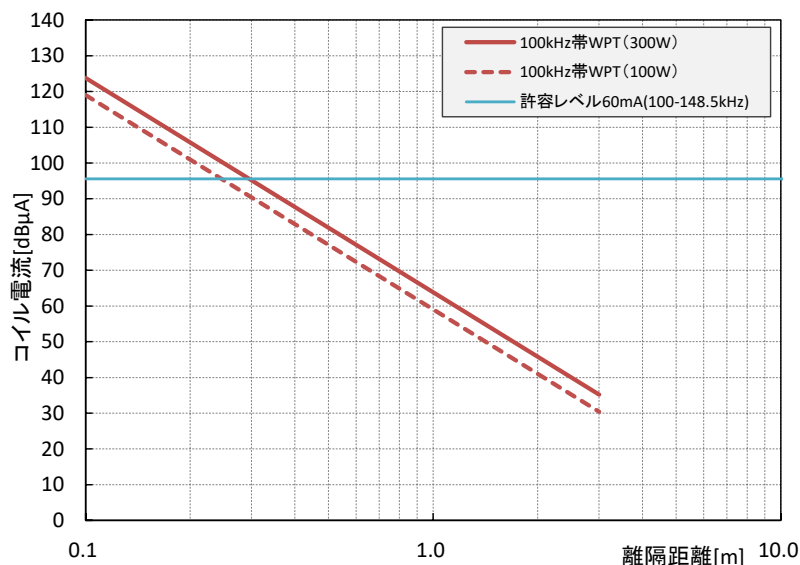


(b) 計算結果

図 13 ATS 装置および踏切 Bu 装置 : WPT が車内 (上) の場合
【モデル : ATS-車内①、踏切 Bu-車内①】



(a) モデルのイメージ図



(b) 計算結果

図 14 ホームドア連携装置：WPT が車内（横）の場合
【モデル：ホームドア連携装置-車内②】

図 13 の結果から、300W 出力の 100kHz 帯磁界結合型 WPT から放射される磁界によって ATS 装置に影響が生じる離隔距離は 0.8m、踏切 Bu 装置に影響が生じる離隔距離は 0.7m となった。また、図 14 の結果から、ホームドア連携装置に影響が生じる離隔距離は 0.3m となった。なお、100W 出力の場合は、ATS 装置で 0.7m、踏切 Bu 装置で 0.6m、ホームドア連携装置で 0.3m であった。

図 13 および図 14 に示した計算結果は、WPT と各装置アンテナ間には遮蔽物が存在しないものとして求めたものである。このうち、図 13 および図 14 に示した車内で使用される WPT の場合については、実際には車体による遮蔽があるため、WPT によって影響が生じる離隔距離は短くなる可能性はあるが、100kHz～148.5kHz の周波数域における鉄道車両の遮蔽効果については未知³であり、最低限の遮蔽効果を見極めて計算を行うためにはシミュレーションおよび実験による遮蔽効果の把握が必要と考える。

³ 1996 年発行の「電磁波対策ハンドブック」（工業資料センター刊）にシールド材の遮蔽効果に関するグラフが掲載されており、0.1mm 厚のアルミ板と 0.3mm 厚の鋼板メッシュの 100kHz における遮蔽効果として、それぞれ約 20dB、約 6dB とするデータが記載されている。しかし、当該の周波数域における電磁波の遮蔽効果は素材と構造によってその効果は大きく異なると考えられ、現時点では今回の共用検討に適用しうる最低限の遮蔽効果を見積もるために必要なデータを把握できていない。

4.3.2 誘導式列車無線設備

(1) 誘導式列車無線の空中線系と許容受信機入力電圧の想定

2023年3月17日までに収集できたデータおよび情報を基に設定した空中線系と許容受信機入力電圧の条件を表4に示す。

空中線系の条件については、EV用WPTとの共用検討を行った際に設定した値（当時に最も受信電圧が高くなる代表例として設定）に対して、今回の調査において提供頂いた仕様書に記載された仕様は受信電圧が低くなる（コイルの面積×ターン数が小さい）値であったため、EV用WPTとの共用検討時に設定した値をそのまま使用することとした。

また、回線設計上のスケルチ感度については、EV用WPTとの共用検討時より高く設定されている例が見られたが、EV用WPTとの共用検討時と同じ値が設定されている線区が存在したため、EV用WPTとの共用検討時に設定した値をそのまま使用することとした。

所要離隔距離の計算に必要な共用受信機入力については、電気自動車用WPTとの共用検討時と同じ考え方に沿って、スケルチレベルを基準として所要CNR=20dBを考慮した値を用いることとした。

表4 空中線系と許容受信機入力電圧等の設定

	100kHz 帯磁界結合型 WPT
車上受信用アンテナ面積 (m ²)	1.3
車上受信用アンテナターン数	10
車上受信用アンテナインピーダンス比	400:75
車上アンテナ～地上誘導線間距離	0.6
地上誘導線の面積 (m ²)	1
地上誘導線のターン数	1
地上誘導線インピーダンス比	600:75
移動局 受信周波数 (kHz)	145
移動局 スケルチ感度 (dBμV)	50
移動局 許容受信機所要入力 (dBμV)	30
地上局 受信周波数 (kHz)	145
地上局 スケルチ感度 (dBμV)	50
地上局 許容受信機入力 (dBμV)	30

(2) 所要離隔距離の計算方法

誘導式列車無線設備との所要離隔距離の計算については、電気自動車用WPTとの共用検討時と同じ考え方に沿って、以下の手順にて行った。

①受信機入力電圧の計算

- 4.2節で示した磁界強度の計算値から空中線の端子に発生する開放端電圧 V_{emf} を下式から求め、インピーダンス整合回路での電圧変換比を補正して受信機入力電圧 V_i (dBuV)の距離特性を算出。

$$V_{emf} = \omega \mu S N |H|$$

$$\omega = 2\pi f \text{ (rad/s)}, \mu = \text{透磁率(H/m)} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (H/m)},$$

$$S = \text{ループの面積(m}^2\text{)}, N = \text{ループのターン数}, H = \text{ループと交差する磁界(A/m)}$$

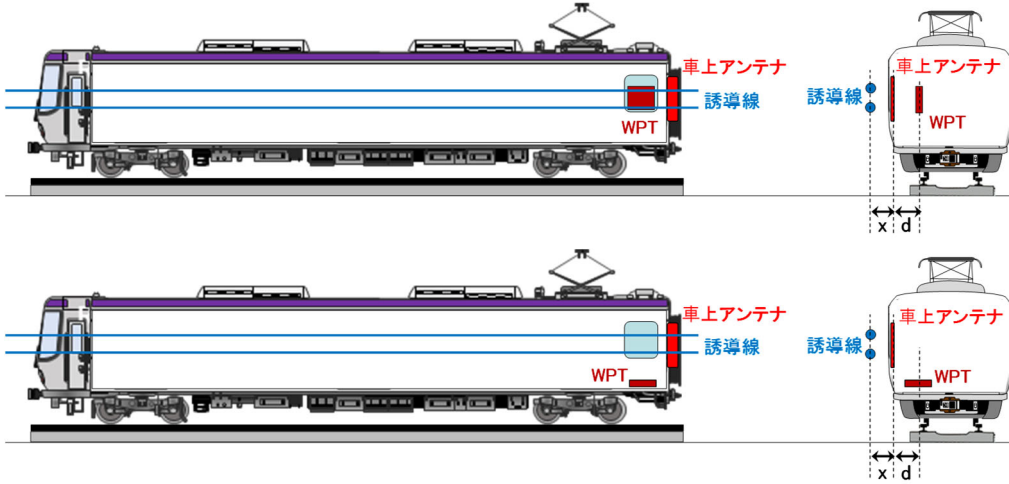
※ここでは計算を簡単にするため、WPT側のループ面積の値を使用(誘導無線側より小さい)

②所要離隔距離の算出

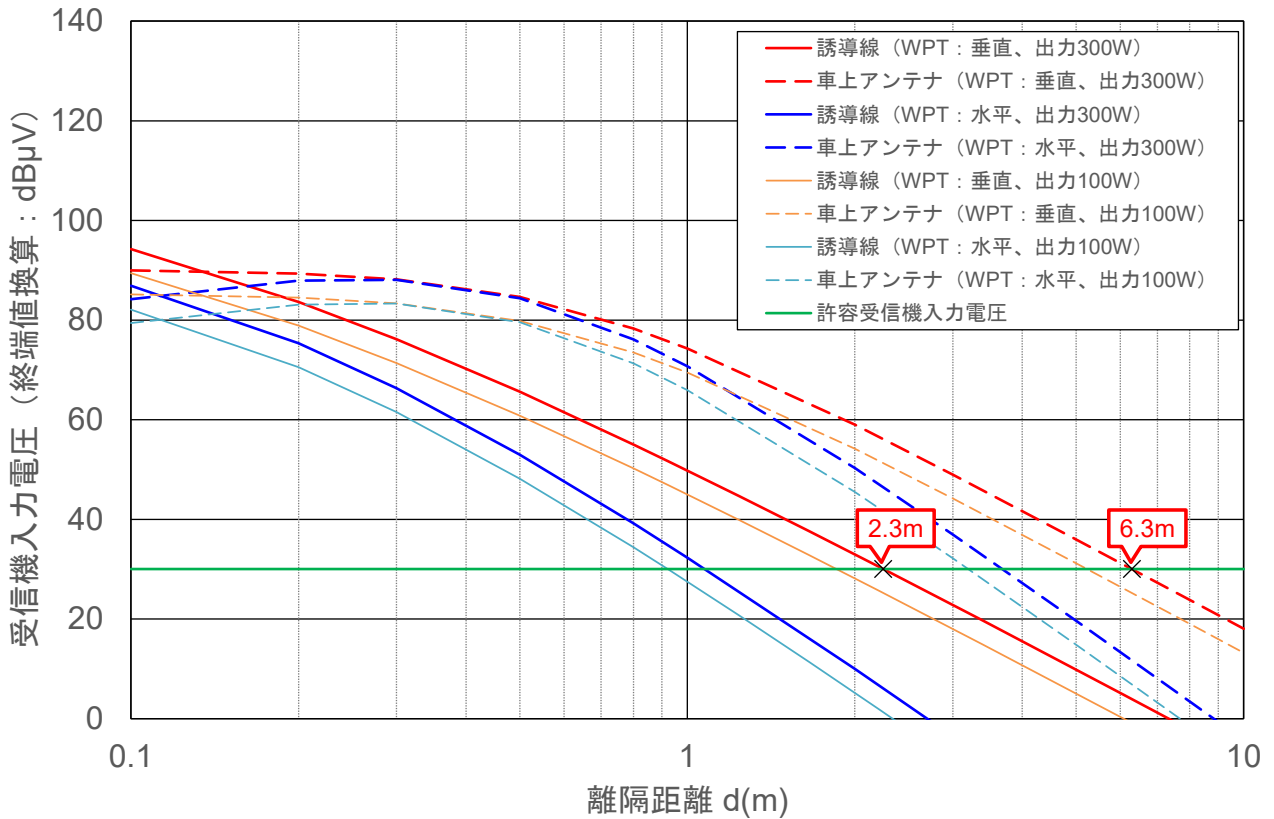
- 上記で求めた V_i の距離特性と、許容受信機入力電圧 V_{limit} から所要離隔距離を算出。

(3) 計算結果

WPT からの距離と受信機入力電圧との関係を求めた結果を図 15 ～図 19 に示す。図 15～図 16 は側面式、図 17～図 18 は屋根上水平式、図 19 は床下式である。各図のタイトルには、4.1 節の表 2 で示したモデルケースの名称を付記した。いずれの図とも、(a)が計算モデルのイメージ図、(b)が離隔距離の計算結果である。

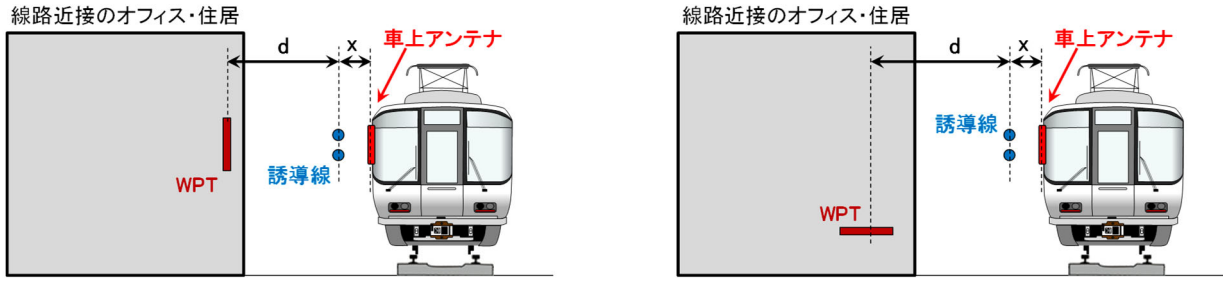


(a) モデルのイメージ図 (上 : WPT が垂直、下 : WPT が水平)

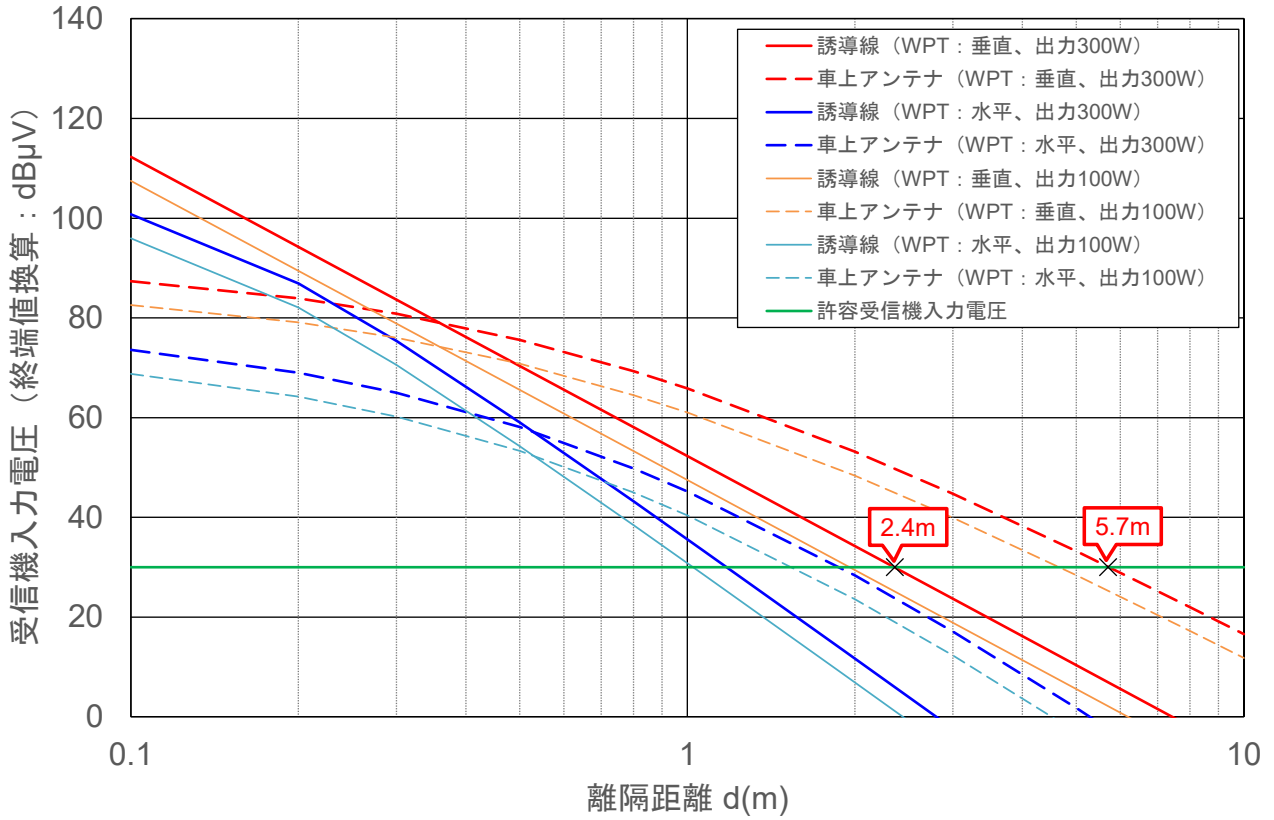


(b) 計算結果

図 15 側面式 : WPT が車内 (横) の場合【モデル : 誘導無線 A-車内②】

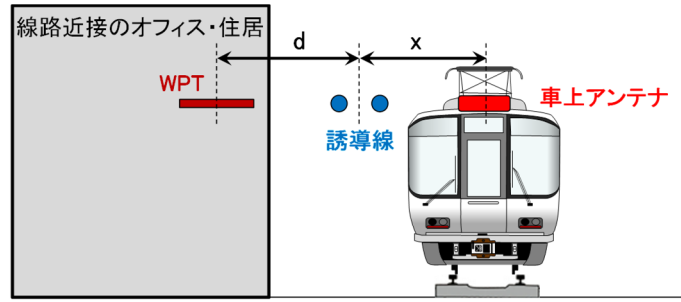


(a) モデルのイメージ図 (左: WPT が垂直、右: WPT が水平)

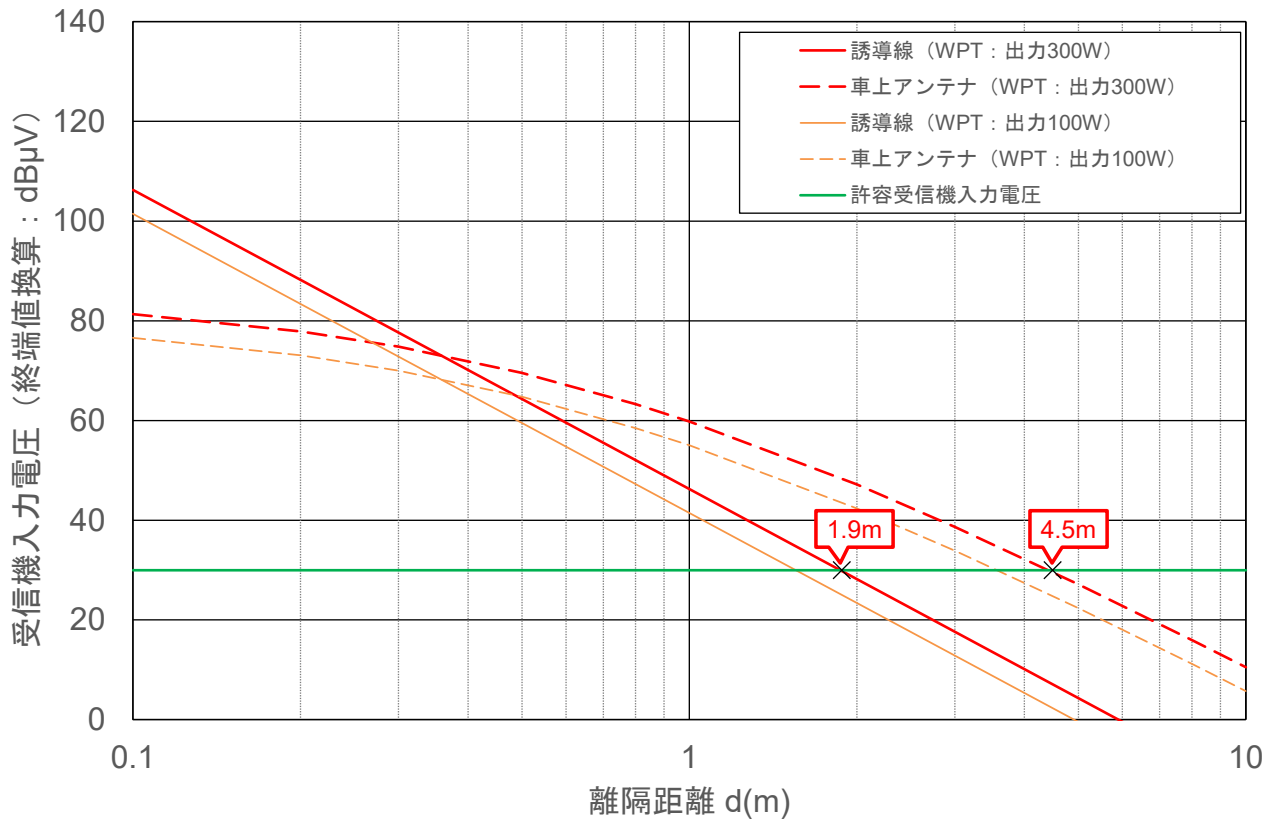


(b) 計算結果

図 16 側面式: WPT が沿線 (横) の場合【モデル: 誘導無線 A-沿線①】

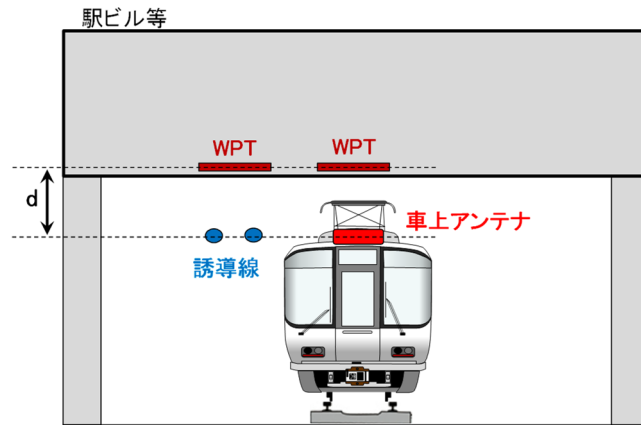


(a) モデルのイメージ図

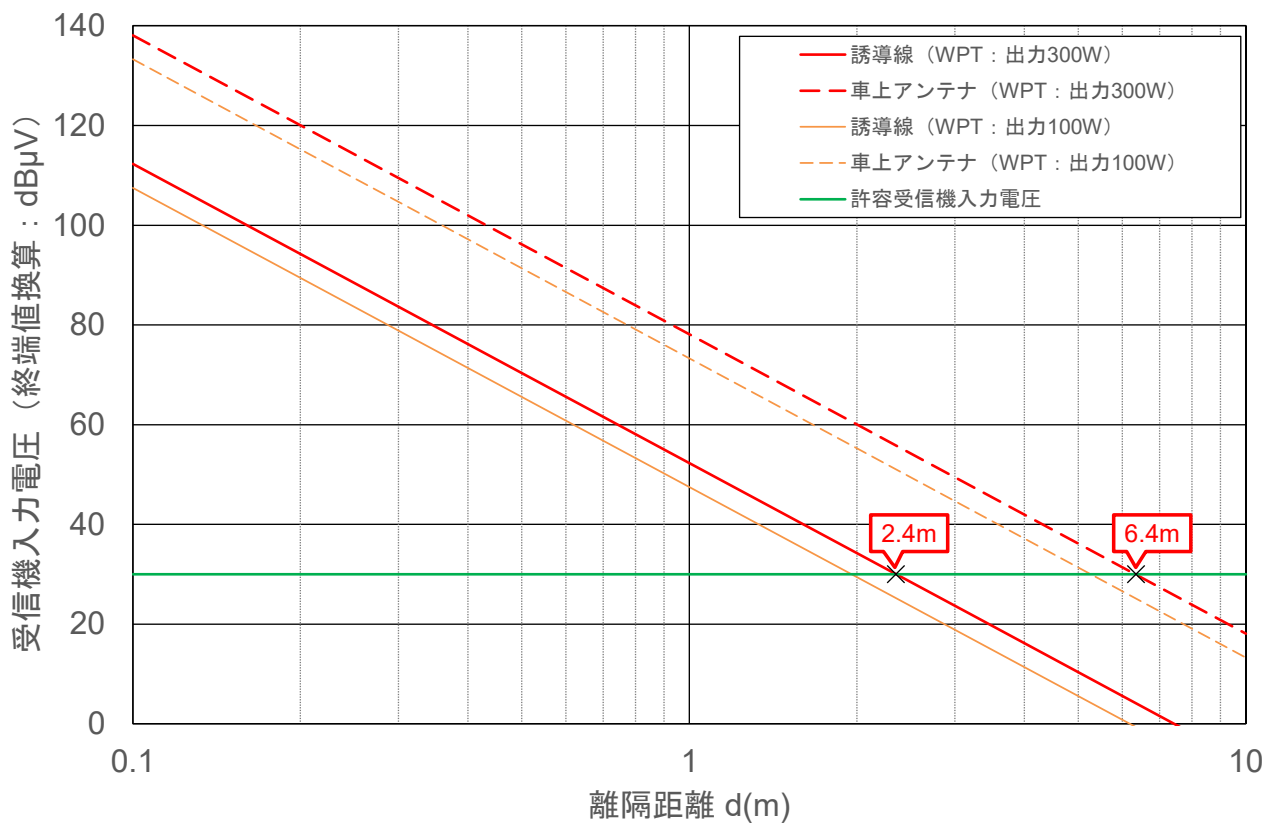


(b) 計算結果

図 17 屋根上水平式：WPT が沿線（横）の場合【モデル：誘導無線 B-沿線①】

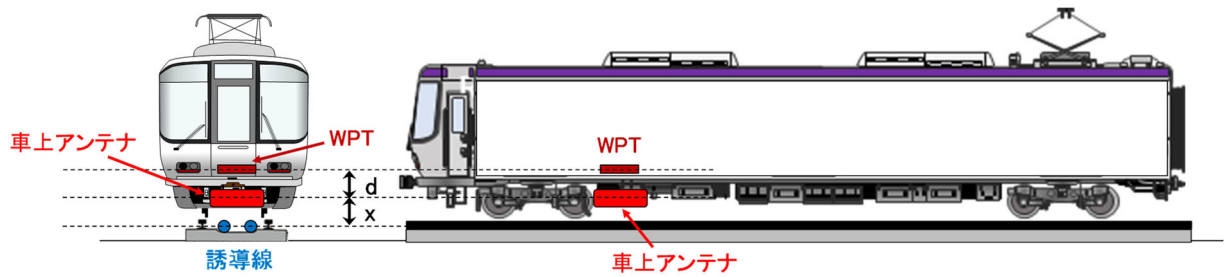


(a) モデルのイメージ図

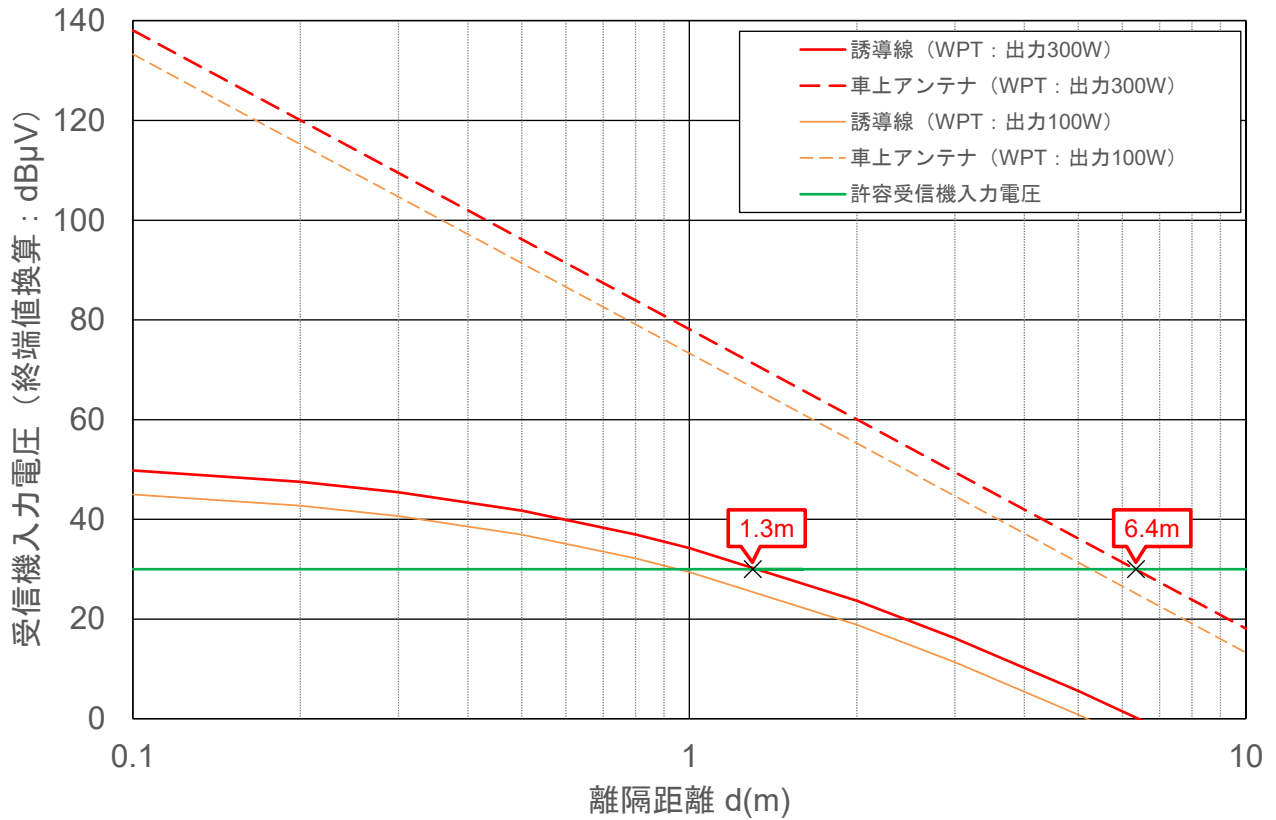


(b) 計算結果

図 18 屋根上水平式：WPT が沿線（上）の場合【モデル：誘導無線 B-沿線②】



(a) モデルのイメージ図



(b) 計算結果

図 19 床下式 : WPT が車内 (床面) の場合【モデル : 誘導無線 C-車内①】

図 15～図 19 の結果から、300W 出力の 100kHz 帯磁界結合型 WPT から放射される磁界によって誘導式列車無線に影響が生じる離隔距離は、車上アンテナに対しては 6.4 m、誘導線に対しては 2.4 m となった。なお、100W 出力の場合は、車上アンテナに対しては 5.3 m、誘導線に対しては 2.0 m であった。

図 15～図 19 に示した計算結果は、WPT と誘導線もしくは車上アンテナ間には遮蔽物が存在しないものとして求めたものである。このうち、図 15 および図 19 に示した車内で使用される WPT の場合については、実際には車体による遮蔽があるため、WPT による影響を受ける離隔距離は短くなる可能性がある。しかし、4.3.1 でも述べたとおり、100kHz～148.5kHz の周波数域における鉄道車両の遮蔽効果については未知であり、最低限の遮蔽効果を見極めて計算を行うためにはシミュレーションおよび実験による遮蔽効果の把握が必要と考える。

5. 共用条件のまとめ

4 章までの検討によって求められた、300W 出力の 100kHz 帯磁界結合型 WPT と鉄道設備が共存するための所要離隔距離を表 5、表 6 に示す。なお、参考のため、表 5、表 6 には 100W 出力の場合の距離も記載した。

表 5 WPT と信号保安設備とが共存するための所要離隔距離

被干渉側 \ WPT の出力	300W	100W (参考)
ATS 装置	0.8 m	0.7 m
踏切バックアップ装置	0.7 m	0.6 m
ホームドア連携装置	0.3 m	0.3 m

表 6 WPT と誘導式列車無線設備とが共存するための所要離隔距離

被干渉側 \ WPT の出力	300W	100W (参考)
車上アンテナ	6.4 m	5.3 m
誘導線	2.4 m	2.0 m

よって、今回の検討において BWF から提示された 100kHz 帯磁界結合型 WPT の仕様および使用条件において、WPT と鉄道設備が共存するためには、上表に示した距離以上の離隔を確保する必要がある。

ただし、上記の値は WPT と誘導線もしくは車上アンテナ間には遮蔽物が存在しないものとして求めたものである。車両内で使用される WPT に関しては、実使用環境において所要離隔距離が短くなる可能性があるが、具体的な距離を求めるためには車両の遮蔽効果をシミュレーション、実験等により把握する必要がある。

以上