

情報通信審議会 情報通信技術分科会
電波利用環境委員会
報告

諮問第 2045 号

「基地局等から発射される電波の強度等の測定方法及び算出方法」のうち
「地中埋設型基地局等の新たな無線システムから発射される電波の強度等の測定
方法及び算出方法に係る技術的条件」

目次

I	検討事項	1
II	委員会及び作業班の構成	1
III	検討経過	1
IV	検討概要	3
第1章	検討の背景等	3
1. 1	検討の背景	3
1. 2	諸外国の動向	6
1. 3	電波防護指針への適合性評価法	7
第2章	地中埋設型基地局から発射される電波の強度の測定方法及び算出方法に関する検討	11
2. 1	検討事項	11
2. 1. 1	空間評価領域	11
2. 1. 2	電波の強度の算出方法	11
2. 2	実測の結果	12
2. 3	検討結果	17
2. 3. 1	検討モデル	17
2. 3. 2	空間評価領域に関する検討	19
2. 3. 3	電波の強度の算出方法に関する検討	23
第3章	地中埋設型基地局から発射される電波による SAR（比吸収率）の評価	31
3. 1	検討モデル	31
3. 2	評価結果	33
3. 3	SAR 評価のまとめ	37
第4章	地中埋設型基地局から発射される電波の強度の測定方法及び算出方法に関する技術的条件	38
4. 1	一般的条件	38
4. 2	人体が電波に不均一にばく露される場合の空間評価領域	38
4. 3	電力束密度の算出方法	38
第5章	今後の検討課題	39
5. 1	国際標準との整合性確保	39
別表1	情報通信審議会 情報通信技術分科会 電波利用環境委員会 構成員	40

別表2 情報通信審議会 情報通信技術分科会 電波利用環境委員会 基地局等評価方法作業班 構成員.....	41
参考資料1 無線設備から発射される電波の強度の標準測定方法	42
参考資料2 電波の強度に関する検討モデルの数値解析条件	47
参考資料3 FDTD 法を用いた電磁界解析の拡張不確かさの導出	54
参考資料4 全計算条件における電力束密度の空間的最大値の比の最大値及び空間的平均値の比の最大値の一覧.....	57
参考資料5 拡張不確かさを考慮した全計算条件における電力束密度の空間的最大値の比の95%値の算出方法	58
参考資料6 SAR に関する検討モデルの数値解析条件.....	59
参考資料7 地中埋設型基地局の空中線入力電力の最大値	60

I 検討事項

電波利用環境委員会（以下「本委員会」という。）は、諮問第 2045 号「基地局等から発射される電波の強度等の測定方法及び算出方法」（令和 2 年 1 月 21 日諮問）のうち「地中埋設型基地局等の新たな無線システムから発射される電波の強度等の測定方法及び算出方法に係る技術的条件」（以下「技術的条件」という。）について検討を行った。

II 委員会及び作業班の構成

本委員会の構成については、別表 1 のとおり。

なお、検討の促進を図るため、本委員会の下に基地局等評価方法作業班を設けて検討を行った。基地局等評価方法作業班の構成については、別表 2 のとおり。

III 検討経過

1 委員会

① 第 43 回（令和元年 12 月 26 日）

情報通信審議会への諮問内容について検討を行った。

② 第 44 回（令和 2 年 1 月 28 日）

本委員会の運営方針、調査の進め方について検討を行ったほか、検討の促進を図るため、作業班を設置した。

③ 第 46 回（令和 2 年 10 月 2 日）

基地局等評価方法作業班における検討状況を確認し、検討事項の整理を行った。

④ 第 47 回（令和 3 年 1 月 19 日）

技術的条件の検討を行い、意見募集を行う委員会報告（案）を取りまとめた。

⑤ 第 48 回（令和 3 年 3 月 4 日から同年同月 11 日まで）（メール審議）

委員会報告（案）に対する意見募集の結果及び考え方について検討を行い、委員会報告を取りまとめ、情報通信技術分科会に報告することとした。

2 作業班

① 第 1 回（令和 2 年 1 月 28 日）

作業班の運営方針及び調査の進め方について検討を行った。

② 第 2 回（令和 2 年 2 月 27 日）

地中埋設型基地局について関係者からヒアリングを行うとともに、今後の検討事項について検討を行った。

③ 第3回（令和2年4月2日）

地中埋設型基地局を始めとする新たな無線システムについて関係者からヒアリングを行うとともに、地中埋設型基地局からの電波ばく露量の評価方法について検討を行った。

④ 第4回（令和2年6月19日）

地中埋設型基地局からの電波ばく露量の評価方法について検討を行った。

⑤ 第5回（令和2年8月27日）

地中埋設型基地局からの電波ばく露量の評価方法について検討を行った。

⑥ 第6回（令和2年12月2日）

地中埋設型基地局からの電波ばく露量の評価方法について検討を行い、技術的条件案の取りまとめに向けた検討を行った。

⑦ 第7回（令和2年12月23日）

基地局等評価方法作業班報告書案の検討を行った。

IV 検討概要

第1章 検討の背景等

1. 1 検討の背景

我が国で利用される移動通信システムでは、高速かつ確実な接続をより広いエリアで実現するため、携帯電話の基地局等が数多く設置されてきたところである。携帯電話のサービスエリアを形成する基地局については、鉄塔、建物等に設置されることが一般的であるが、観光地、景勝地等においては景観に配慮して設置が制限される状況もあった。携帯電話事業者等では、そのような場所での通信の確保のため、地中に設置し地上にエリアを構築する地中埋設型基地局の導入に向けた検討が行われているが、この場合、空中線が従来のように身体の上方ではなく、より身体に近い下方の位置に設置されることになる。

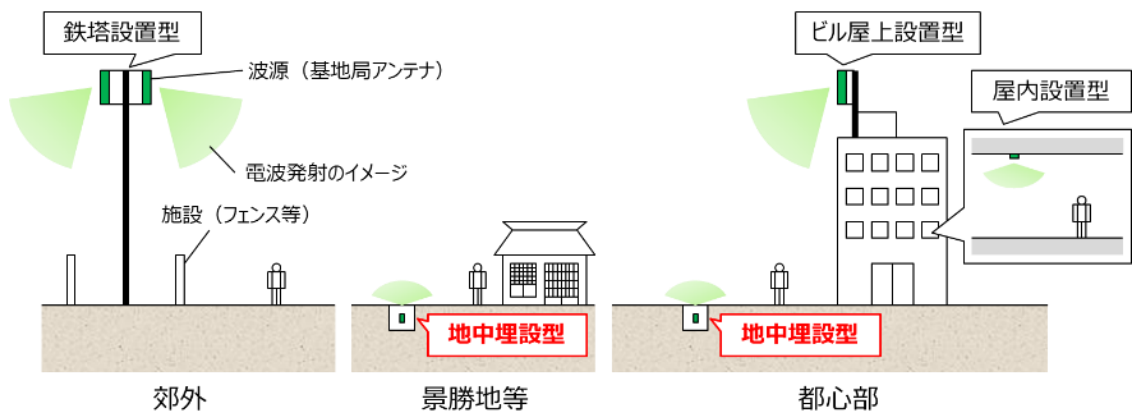
地中埋設型基地局の利用シーンは図1-1のとおりであり、専用の穴を掘り、穴に設置した筐体（電気、通信配線用のハンドホール¹等）の内部に基地局の空中線を設置するものである。また、電波の透過性確保のため、蓋素材には一般的に用いられるような金属ではなく、強度を確保した樹脂等を使用することが想定されている。地中埋設型基地局は、無線設備の防水対策が施された上で設置され、従来の基地局と同様に異常検知時に電波を停止する機能が具備されることが想定されている。通信事業者が開発中の地中埋設型基地局の外観は図1-2のとおりであり、空中線を大地面よりも下の位置に設置し、両者とも垂直偏波を用いている。

地中埋設型基地局は、鉄塔、建物等に設置される一般的な基地局とは異なり、地中から上空に向けて電波を発射するという特徴があり、従来、このような電波の利用形態は想定されていなかったため、地中埋設型基地局から発射される電波について、我が国では電波防護指針への適合性評価方法が確立されていない。

本件は、以上のような状況を踏まえ、電波防護指針の適合性評価に必要な地中埋設型基地局から発射される電波の強度²等の測定方法及び算出方法に関する技術的条件等について、検討を行うものである。

¹ ハンドホールとは、地中に埋設する設備等の敷設・保守等のために設けられ、手を入れて作業することを前提としたものである。一般的に用いられるマンホールは、下水管等の保守・点検等のために設けられ、人が中に入ることを前提としたものであり、ハンドホールとは異なる。

² 電界強度、磁界強度及び電力束密度及び磁束密度をいう。（電波法施行規則第21条の3）



出典 基地局等評価方法作業班（第1回）資料より

図1-1 地中埋設型基地局の利用シーン



<NTT ドコモ>

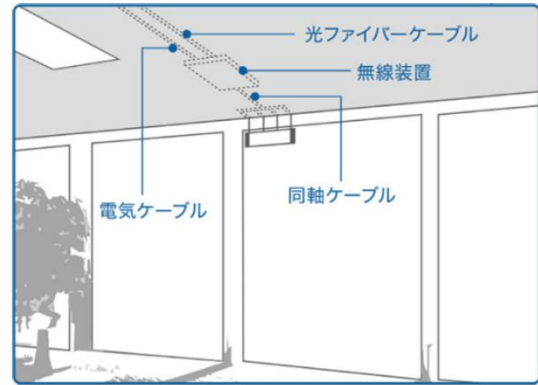


<KDDI>

出典 基地局等評価方法作業班（第2回）資料、基地局等評価方法作業班（第3回）資料より

図1-2 通信事業者が開発中の地中埋設型基地局の外観

また、景観へ配慮した設置が可能な環境融合型の基地局として、オフィスビル等の窓に設置され屋外に通信サービスエリアを構築する透過性の高いガラス状アンテナを有する基地局についても、ニーズが高まりつつある。ガラス状アンテナのイメージは図1-3のとおりであり、オフィスビル等の窓の内側に設置し、窓の外側をエリア化することを目的に設置されるものである。ただし、ガラス状アンテナは、景観に配慮した設置が可能だという特徴を有するものの、その電波利用形態はこれまでの一般的な基地局と変わらないため、電波防護指針への適合性評価方法については従来の一般的な基地局と同等の方法を適用することが可能である。



出典 基地局等評価方法作業班（第3回）資料より

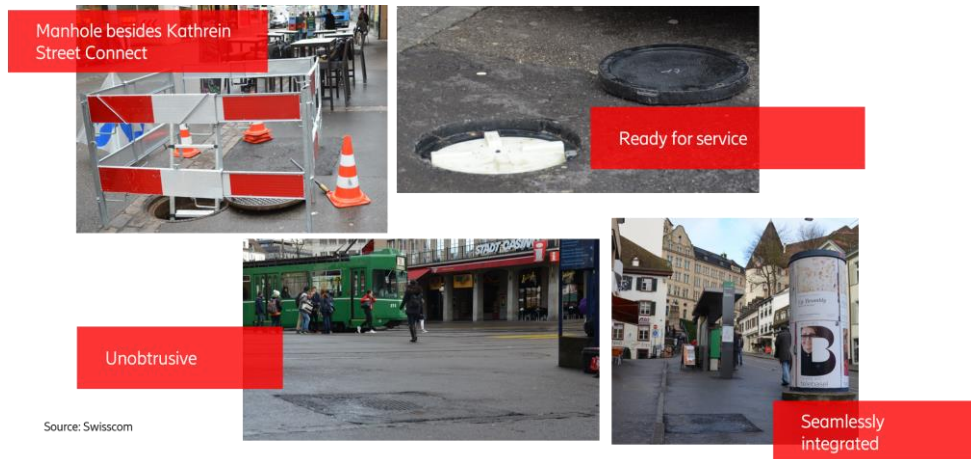
図1-3 ガラス状アンテナのイメージ

1. 2 諸外国の動向

(1) スイス

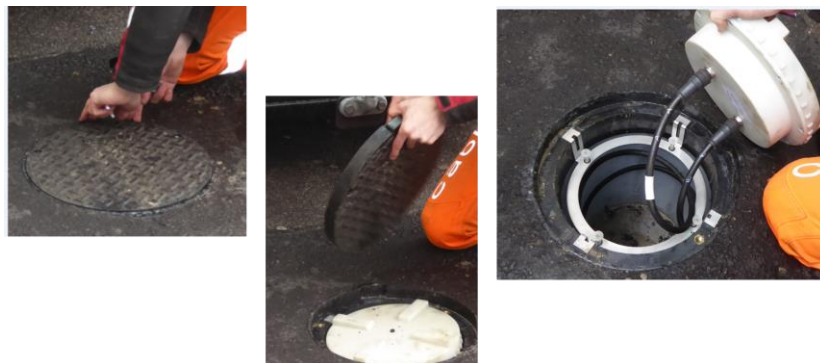
スイスにおいては、17 サイトにおける試験を経て、2015 年から地中埋設型基地局の運用が開始されている。カバレッジは半径 100m 程度である。地中埋設型基地局の設置状況を図 1-4 に、地中埋設型基地局の空中線の外観を図 1-5 にそれぞれ示す。

また、地中埋設型基地局について、比吸収率（SAR: Specific Absorption Rate）による評価を実施し、我が国の基準値と同等の ICNIRP³ の定める制限値を満たしていることが確認⁴されている。



出典 基地局等評価方法作業班（第 3 回）資料より

図 1-4 スイスにおける地中埋設型基地局の設置状況



出典 基地局等評価方法作業班（第 3 回）資料より

図 1-5 スイスにおける地中埋設型基地局の空中線の外観

³ 国際非電離放射線防護委員会(International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection): 1992 年に設立された非電離放射線の健康/環境影響の防護を目的として、科学的根拠に基づいた指導と助言を行う非営利の科学的専門組織。世界保健機関(WHO)と国際労働機関(ILO)から連携機関として正式に認められている。(出典: 総務省「生体電磁環境に関する検討会」(第 17 回)、ICNIRP 高周波ガイドライン(2020 年 3 月)の概要)

⁴ スイスでは、実効輻射電力が 6W 以上のものが規制の対象になっているが、実効輻射電力が 6W 未満の地中埋設型基地局について通信事業者によって ICNIRP の定める制限値との適合が確認された。

(2) 英国

Vodafone UK がハンドホールタイプのスモールセルを開発しており、半径約 200m のカバレッジを確保している旨⁵が報告されている。

1. 3 電波防護指針への適合性評価法

無線設備から発射される電波の強度の指針値への適合性評価については、測定ではなく、算出によることが基本とされている。これは、電界強度の測定が多くの時間及び労力を要すること、新設の際には無線局免許申請前に電波を発射できないこと等に配慮したものである。

基地局の場合は、遠方領域⁶における電波の強度を評価する必要があることから、電波防護指針が定める電磁界強度指針の基準値に従う必要がある。基地局の適用範囲となる 300MHz 超の周波数帯における一般環境の電磁界強度指針の基準値は、表 1-1 のとおりである。

遠方領域においては、電界強度 E [V/m]、磁界強度 H [A/m]、電力束密度 S [W/m²] の間に次式の換算関係が成り立つことから、これらの物理量のうちいずれか一つの物理量が求まれば、他の二つの物理量も決まることになる。

$$S = \frac{E^2}{120\pi} = 120\pi H^2$$

そのため、電力束密度を用いて評価することを基本としており、[mW/cm²] を単位とする電力束密度 S は次の基本算出式によって求められる。ただし、図 1-6 に示すように、遠方領域にある基地局からの直接波及び大地反射波による二波電波伝搬モデルを想定しており、 P は空中線入力電力 [W]、 G は送信空中線の最大輻射方向における絶対利得を電力比率で表したものの、 R は算出に係る送信空中線と算出を行う地点との距離 [m]、 K は大地面等の反射を考慮した係数⁷である。

【基本算出式】

$$S = \frac{PG}{40\pi R^2} \times K$$

⁵ (出典) Vodafone lifts lid on manhole covers to improve mobile coverage
(<https://newscentre.vodafone.co.uk/our-network/vodafone-lifts-lid-on-manhole-covers-to-improve-mobile-coverage/>)

⁶ 最も近い電波の放射に寄与する空中線構造体からの距離が $2D^2/\lambda$ 又は $\lambda/2\pi$ のいずれよりも遠い領域。ただし、 D は電波の放射に寄与する空中線構造体の最大寸法、 λ は自由空間における波長とする。

⁷ 大地面の反射を考慮する場合であって送信周波数が 76MHz 以上の場合は 2.56、大地面の反射を考慮する場合であって送信周波数が 76MHz 未満の場合は 4、水面等大地面以外の反射を考慮する場合は 4、すべての反射を考慮しない場合は 1。

表 1-1 電磁界強度指針の基準値 (300MHz 超)

周波数	電界強度の実効値 (V/m)	磁界強度の実効値 (A/m)	電力束密度の実効値 (mW/cm ²)
300MHz を超え 1.5GHz 以下	$1.585f^{1/2}$	$f^{1/2}/237.8$	$f/1500$
1.5GHz を超え 300GHz 以下	61.4	0.163	1

注1 f は、MHz を単位とする周波数とする。

2 電界強度、磁界強度及び電力束密度は、それらの6分間における平均値⁸とする。

3 人体が電波に不均一にばく露される場合は、表1-2によるものとする。

4 同一場所若しくはその周辺の複数の無線局が電波を発射する場合又は一の無線局が複数の電波を発射する場合は、電界強度及び磁界強度については各周波数の表中の値に対する割合の自乗和の値、また電力束密度については各周波数の表中の値に対する割合の和の値がそれぞれ1を超えてはならない。

表 1-2 人体が電波に不均一にばく露される場合の電波の強度の値 (300MHz 超)

周波数	電界強度の実効値 の空間的平均値 (V/m)	磁界強度の実効値 の空間的平均値 (A/m)	電力束密度の 実効値の 空間的平均値 (mW/cm ²)	電力束密度の 実効値の 空間的最大値 (mW/cm ²)
300MHz を超え 1GHz 以下	$1.585f^{1/2}$	$f^{1/2}/237.8$	$f/1500$	4
1GHz を超え 1.5GHz 以下	$1.585f^{1/2}$	$f^{1/2}/237.8$	$f/1500$	2
1.5GHz を超え 300GHz 以下	61.4	0.163	1	2

注1 f は、MHz を単位とする周波数とする。

2 電界強度、磁界強度及び電力束密度は、それらの6分間における平均値⁹とする。

3 同一場所若しくはその周辺の複数の無線局が電波を発射する場合又は一の無線局が複数の電波を発射する場合は、電界強度及び磁界強度については各周波数の表中の値に対する割合の自乗和の値、また電力束密度については各周波数の表中の値に対する割合の和の値がそれぞれ1を超えてはならない。

⁸ 電界強度又は磁界強度が変化する場合は、平均時間内で実効値を自乗平均平方根した値を用い、電力密度が変化する場合は平均時間内での平均値を用いる。

⁹ 同上

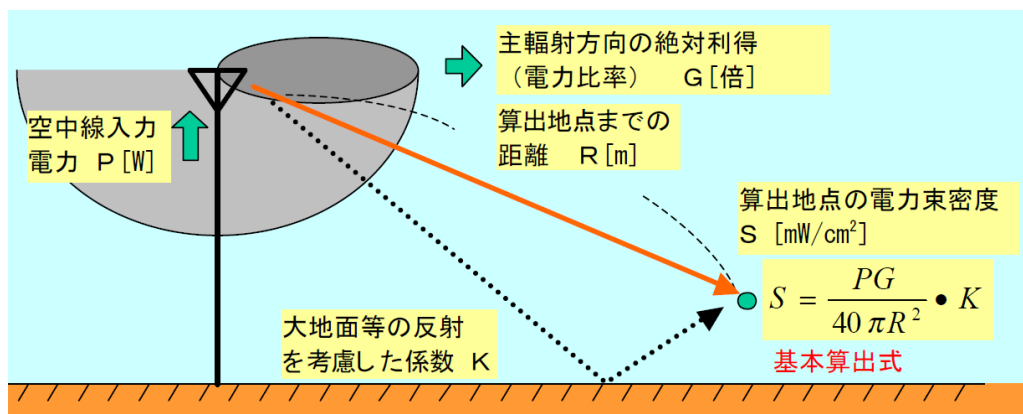


図 1-6 基本算出式を用いる電波伝搬モデル

初めに、電力束密度の空間的最大値を算出し、基準値との適合性の確認を行う。送信空中線を中心に、図 1-7 に示すように最大輻射方向を基準とする 45 度間隔の各方位における、人が通常、通行し、集合し、その他出入りする場所について送信空中線から見て最も近い地点から、少なくとも $\lambda/10$ [m]¹⁰ 間隔の各地点で、基本算出式の算出結果が基準値を満たす地点までを算出地点とする。算出地点において、図 1-8 に示すように、大地等から 10cm (300MHz 未満の周波数においては 20cm) の上方から高さ 200cm までの領域において、少なくとも 10cm 間隔 (300MHz 未満の周波数においては 20cm) で、電力束密度の空間的最大値を求める。ただし、各算出地点は、送信空中線及び金属物体から 10cm 以上 (300MHz 未満の周波数においては 20cm 以上) 離れていなければならない。

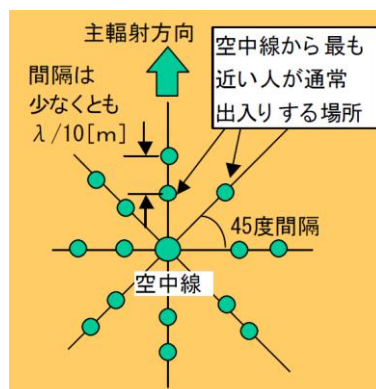


図 1-7 電力束密度の空間的最大値の算出地点

¹⁰ λ は自由空間における波長とする。

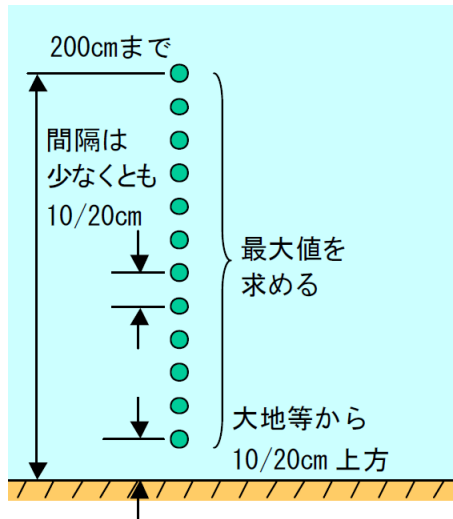


図 1 - 8 電力束密度の空間的最大値の算出方法

また、基本算出式では空中線の特性を考慮していないため、基本算出式による算出結果が過大になる場合は、空中線の指向性を考慮した算出法が定められているほか、コリニアアレイアンテナ、開口面空中線等の空中線の種類に応じた算出法が定められている。

さらに、空中線の特性を考慮しても算出結果が基準値を超える場合であって、人体が電波に不均一にばく露される場合には、図 1 - 9 に示すように大地等から高さ 200cm までの領域における空間的平均値を算出することが定められている。平均値の算出に必要な測定地点の数については特段の定めはないが、300MHz 以上の周波数においては 10cm 間隔の測定地点においてそれぞれ算出を行った上で空間的平均値を求めることが望ましい。

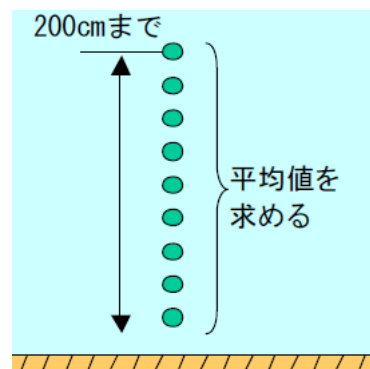


図 1 - 9 電力束密度の空間的平均値の算出に必要な測定地点

以上の算出方法に基づく算出結果が基準値を上回る場合には、測定を行う必要がある。標準測定方法は、参考資料 1 に示すとおりである。

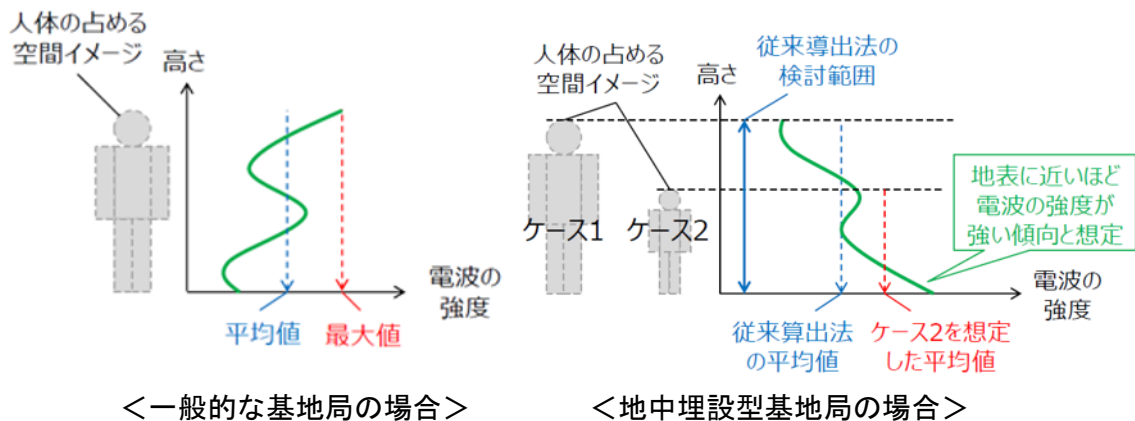
第2章 地中埋設型基地局から発射される電波の強度の測定方法及び算出方法に関する検討

2. 1 検討事項

2. 1. 1 空間評価領域

1. 3節で示したとおり、現行の算出方法では、人体が電波に不均一にばく露される場合の空間評価領域を大地面から200cmまでの範囲内としているが、これは基地局等の無線設備が一般的に人体よりも高い位置にあることを前提としていることによるものである。

地中埋設型基地局では、図2-1に示すように、一般的な基地局とは異なり、電波の発射源が地中にあることから、大地面に近いほど電波の強度が強い状況が想定される。そのため、地中埋設型基地局から発射される電波について、空間上の高さに対する電力束密度の分布を確認した上で、人体の占める空間に対する適切な評価領域を検討することが必要である。



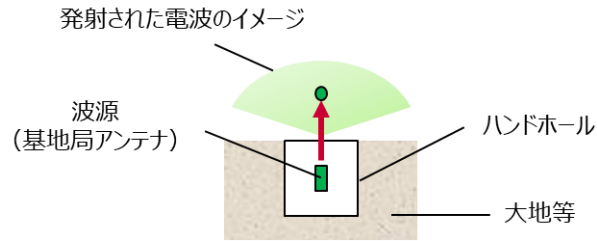
出典 基地局等評価方法作業班（第1回）資料より

図2-1 人体の占める空間における電波の強度の分布イメージ

2. 1. 2 電波の強度の算出方法

地中埋設型基地局では、図2-2に示すように、現行の基本算出式では想定されていないハンドホール等からの反射や大地面からの透過による影響が考えられるため、電波の強度を適切に算出する方法を検討することが必要である。

現行の基本算出式は、遠方領域にある基地局からの直接波及び大地反射波による二波電波伝搬モデルを想定しており、地中埋設型基地局を用いる場合にそのまま適用することは適切ではないと考えられる。そのため、地中埋設型基地局から発射される電波の強度と基本算出式から得られる電波の強度との関係を確認した上で、適切な算出方法を検討することが必要である。



出典 基地局等評価方法作業班（第1回）資料より

図2-2 地中埋設型基地局周辺の電波状況のイメージ

2. 2 実測の結果

(1) 実測時の環境

地中埋設型基地局から発射される電波の強度と基本算出式から得られる電波の強度との関係を確認することを目的に、電力束密度の実測を実施した。

1.5GHz帯のFDD-LTE¹¹方式及び3.5GHz帯のTDD-LTE¹²方式で、複数のMIMO¹³ブランチで構成された地中埋設型基地局を用いた。空中線は大地面から深部へ10cmオフセットした位置に設置し、図1-7及び図1-8に示す各算出地点を参考に電力束密度分布を測定した。基本算出式との比較検討の容易化等のため、得られた測定値については、各アンテナへの入力電力がそれぞれ1Wとなるように正規化した。

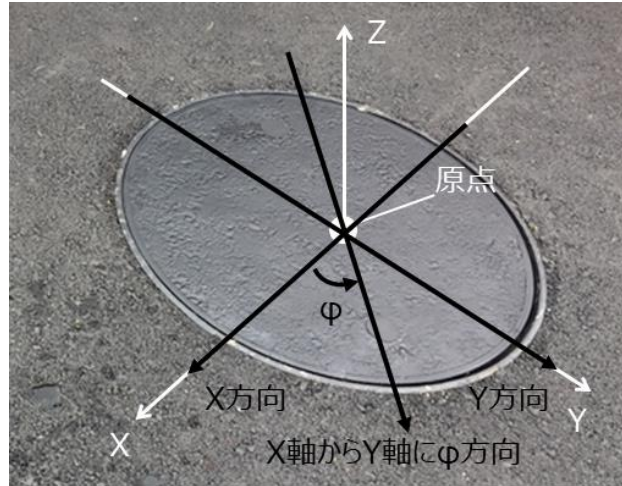
測定機器にはSRM-3006 (Narda S. T. S. 社) を使用し、IEC 62232:2017 (2017年8月発行) に基づき最大トラヒック時を想定した場合の測定を実施した。各測定地点につき測定を4回ずつ行い、それらの平均値を測定値として取り扱うこととした。

ハンドホールの蓋が存在する面にX軸及びY軸をそれらが直交関係にあるように設定し、ハンドホールの蓋の中心部分を原点として設定するとともに、X軸及びY軸とそれぞれ直交する高さ方向にZ軸を設定した(図2-3参照)。なお、地中埋設型基地局は、水平面内において等方性すなわち円状のカバレッジが想定されており、主輻射方向は存在しない。電力束密度の測定地点については、図2-4に示すように空中線の直上及び大地面に近い場所を重要視し、蓋中心の高さ方向(X=0m, Y=0m)、高さ0.1m地点の水平方向(Z=0.1m)を対象とした。

¹¹ FDD-LTE: Frequency Division Duplexing Long Term Evolution

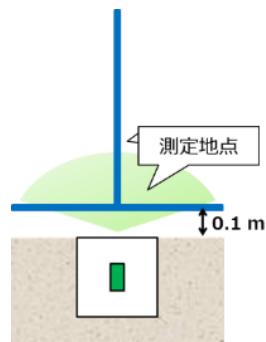
¹² TDD-LTE: Time Division Duplexing Long Term Evolution

¹³ MIMO: Multi-Input and Multi-Output



出典 基地局等評価方法作業班（第2回）資料より

図2-3 地中埋設型基地局の座標設定



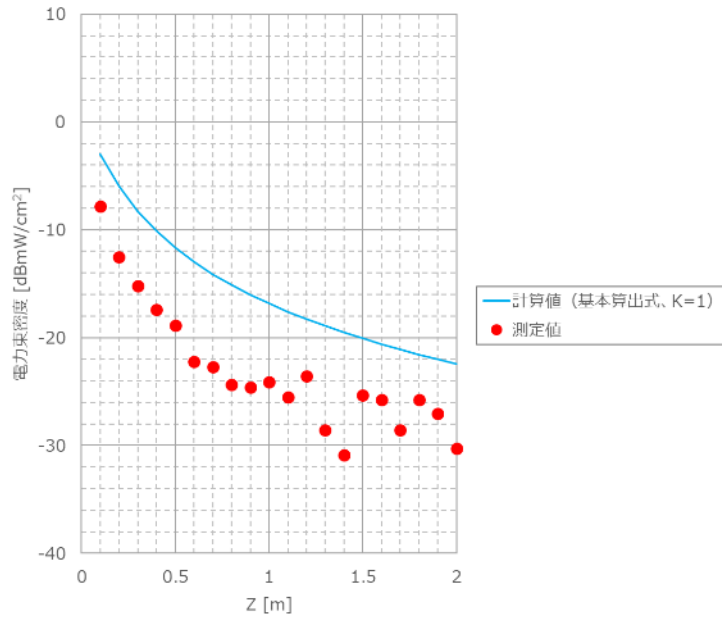
出典 基地局等評価方法作業班（第4回）資料より

図2-4 測定地点のイメージ

(2) 測定結果

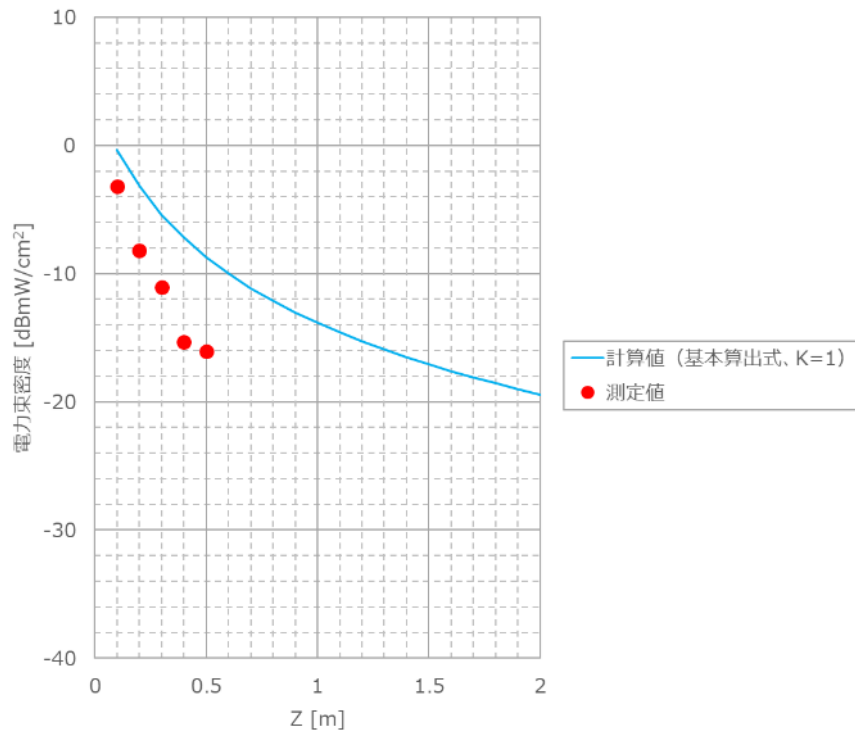
実測により得られた電力束密度について、基本算出式（大地面等の反射を考慮した係数 K を1とした場合）により得られた値との比較検討を行った。

空中線の直上（ $X=0\text{m}$, $Y=0\text{m}$ ）における検討結果は、図2-5及び図2-6のとおりであり、大地面（ $Z=0\text{m}$ が地表面）に近づくほど電力束密度が大きくなる傾向が見られた。また、測定値は、基本算出式による計算結果と同様の傾向を示しているとともに、基本算出式による計算結果よりも低い値を示していることが確認できた。



出典 基地局等評価方法作業班（第4回）資料より

図2-5 空中線の直上 (X=0m, Y=0m) における測定結果 (1.5GHz 帯)

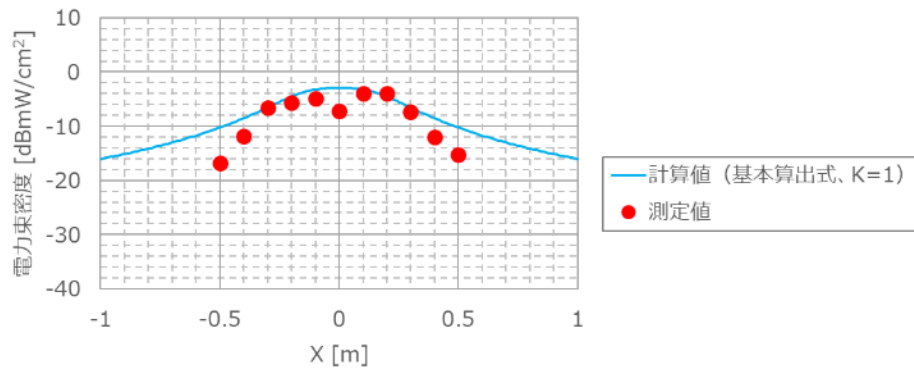


出典 基地局等評価方法作業班（第4回）資料より

図2-6 空中線の直上 (X=0m, Y=0m) における測定結果 (3.5GHz 帯)

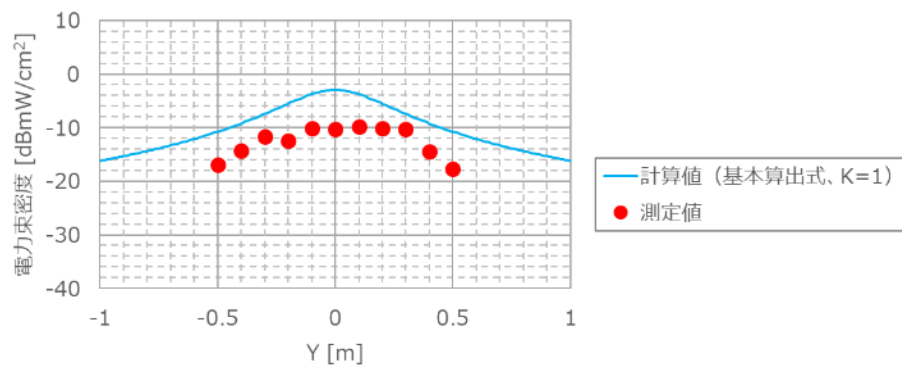
また、高さ0.1m地点の水平方向 (Z=0.1m) における検討結果は、図2-7から図2-10までのとおりである。地中埋設型基地局の周辺は一様な電磁界分布になっておら

ず、空中線からの距離及び高さが同じ場合であっても電力束密度が一致するとは限らないため、X軸方向及びY軸方向の両方について測定している。測定値は、基本算出式による計算結果と同様の傾向を示しているとともに、基本算出式による計算結果よりも高い値を示す場合が存在することが確認できた。



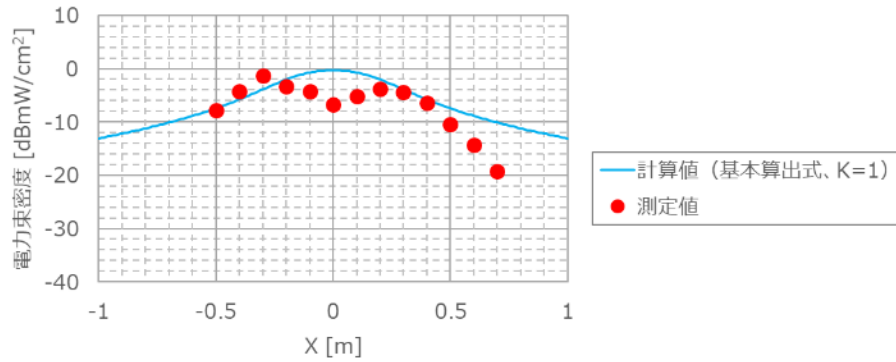
出典 基地局等評価方法作業班（第4回）資料より

図2-7 高さ0.1m地点の水平方向（Y=0m, Z=0.1m）における測定結果（1.5GHz帯）



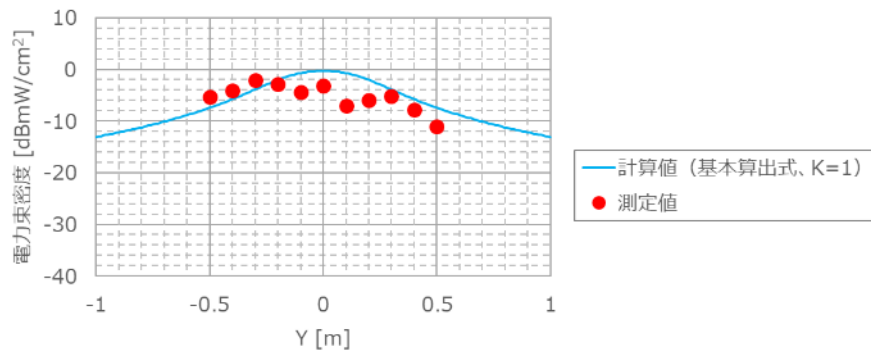
出典 基地局等評価方法作業班（第4回）資料より

図2-8 高さ0.1m地点の水平方向（X=0m, Z=0.1m）における測定結果（1.5GHz帯）



出典 基地局等評価方法作業班（第4回）資料より

図2-9 高さ0.1m地点の水平方向（Y=0m, Z=0.1m）における測定結果（3.5GHz帯）



出典 基地局等評価方法作業班（第4回）資料より

図2-10 高さ0.1m地点の水平方向（X=0m, Z=0.1m）における測定結果（3.5GHz帯）

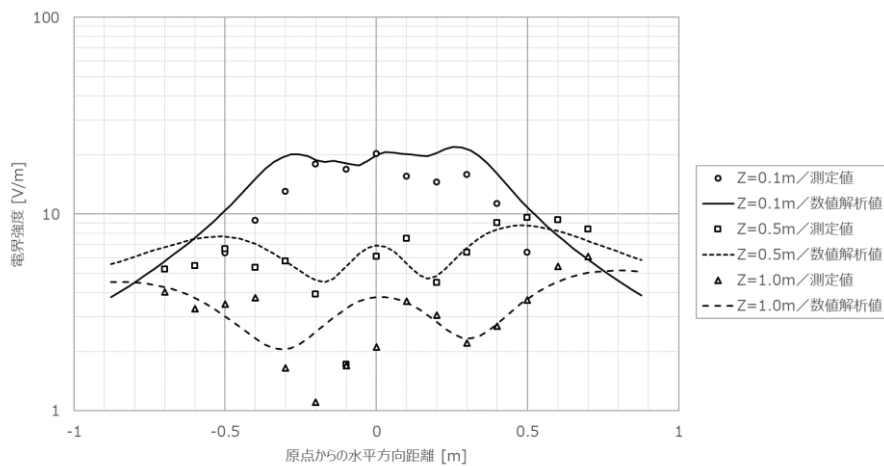
以上の検討結果から、地中埋設型基地局から発射される電波の強度は、基本算出式による計算結果と同様の傾向を示しており、その値は基本算出式で求められる値よりも小さい又は同程度である場合が多いが、基本算出式で求められる値を上回る場合も存在することが確認できた。そのため、地中埋設型基地局から発射される電波の強度については、十分な安全性確保の観点から、次節に示すように基本算出式に補正係数を乗じることによって算出することが適当である。

2. 3 検討結果

2. 3. 1 検討モデル

地中埋設型基地局から発射される電波の強度について、FDTD 法¹⁴による電磁界解析を通じて検討を行った。

まず、事前検討として、FDTD 法による電磁界解析を通じて検討を行うことの妥当性を確認するため、2. 2 節で得られた実測値と、実測対象の地中埋設型基地局を可能な範囲で再現した電磁界解析モデルで得られた電磁界解析値を比較した結果を図 2-1-1 に示す。X 軸から Y 軸に向かって 45° の方向 ($\phi=45^\circ$) の線上で、大地面から高さ 0.1m、0.5m、1.0m の地点での電界強度をそれぞれ測定し、電磁界解析値との比較を実施したところ、一致傾向にあることが確認できた。このことから、電磁界解析結果に基づき技術的条件の検討を行うことは適当であると考えられる。



出典 基地局等評価方法作業班（第 5 回）資料より

図 2-1-1 電界強度分布の実測値と電磁界解析値の比較 (X 軸から Y 軸に向かって 45° の方向 ($\phi=45^\circ$))

次に、様々な条件で検討を行うための検討モデルを構築した。地中埋設型基地局としての利用が想定される 700MHz 帯から 4.5GHz 帯までのうち携帯電話システム用に使用されている周波数帯を検討対象¹⁵とし、電波発射源が人体に極めて近接¹⁶されることのないように大地面から 10cm 深部にオフセットした状態を前提条件とした。また、空中線については地中埋設型基地局で利用が想定されるアンテナの放射指向性と同様な半波長ダイポールアンテナとした。偏波についても実際の利用を想定し垂直偏波を基本として、さらに水平偏波に関しても検討を行った。なお、空中線入力電力は 1W とした。

2. 2 節に示したように、地中埋設型基地局の構成としては、複数のアンテナを有する MIMO 構成等が想定されているが、MIMO 構成の基地局の各ブランチを構成するアンテナ

¹⁴ FDTD 法 (Finite-Difference Time-Domain method): 解析空間における空中線や周囲の散乱体等を高精度に模擬することができる電磁解析手法。

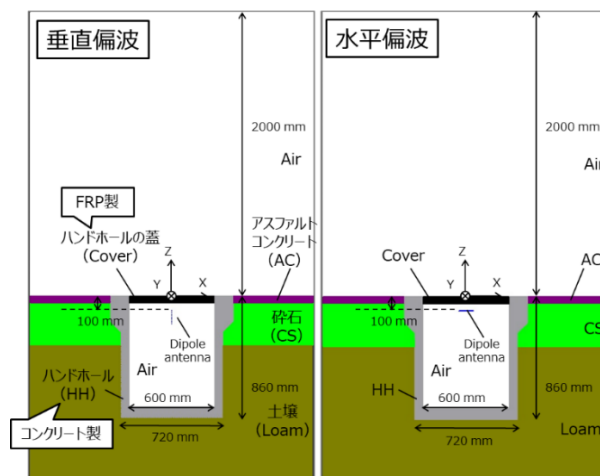
¹⁵ 検討モデルにおいて解析する周波数の範囲は、788MHz から 4550MHz まで。

¹⁶ 電波防護指針より、300MHz を超える周波数帯においては、電磁界強度指針及び補助指針は 10cm 以上離れた空間で適用できる。

から発射される信号は相関性のないものであり、総合的な電力束密度はそれらの単純和で評価することができる¹⁷ため、検討の効率化のため、本検討モデルにおけるアンテナは1本とした。

ハンドホール（図表では「HH」と表記。）については、「公共建築設備工事標準図（電気設備工事編）平成31年版」¹⁸のH₁₋₆相当及びH₁₋₉相当のものを形状として想定し、その材質としてコンクリートを想定した。ハンドホールの蓋（図表では「Cover」と表記。）としてFRP¹⁹相当のものを想定し、ハンドホールの周囲がアスファルトコンクリート（図表では「AC」と表記。）、碎石（図表では「CS」と表記。）及び土壌（図表では「Loam」と表記。）の組合せによる道路で覆われている状態を想定した。環境については、地中埋設型基地局の運用が行われる状態として乾燥、通常及び湿潤の状態を想定し、それぞれの状態に応じた複素比誘電率を設定している。

検討モデルの例は図2-12のとおりであり、電磁界解析に用いた諸元は表2-1のとおりである。アンテナエレメントは、垂直偏波においてはZ軸に、水平偏波においてはX軸にそれぞれ沿って配置した。また、検討モデルの数値解析条件については、参考資料2に示す。



出典 基地局等評価方法作業班（第6回）資料より

図2-12 電磁界解析モデルの例（H₁₋₆相当、AC+CS+Loamの場合）

¹⁷ IEC TR62630:2010, “Guidance for evaluating exposure from multiple electromagnetic sources”

¹⁸ 平成31年3月20日 国営設第188号(国土交通省大臣官房官庁営繕部設備・環境課)

¹⁹ FRP: Fiber Reinforced Plastics(繊維強化プラスチック)

表 2-1 電磁界解析に用いた諸元

周波数帯 [GHz]		0.7, 0.8, 1.5, 1.7, 2, 3.5, 3.7, 4.5
空中線	種類	半波長ダイポールアンテナ
	空中線入力電力	1 W に規格化
	偏波	垂直, 水平
	設置位置	アンテナ上端が地表から深さ 10cm
ハンドホール (HH)	構成	H ₁₋₆ (内寸 60cm×60cm、深さ 60cm)、H ₁₋₉ (内寸 60cm×60cm、深さ 90cm) 相当(市販モデル ²⁰ 参照)
	素材	コンクリート相当
HH 蓋 (Cover)	構成	H ₁₋₆ 、H ₁₋₉ 相当(市販モデル ²¹ 参照)
	素材	FRP 相当
HH 周辺の地 下構造	構成	AC、CS、Loam (乗入れ舗装アスコン 35 型 ²² 参照)
	素材	上から、AC+CS+Loam, AC+Loam+Loam, Loam+Loam+Loam の 3 通り
環境		乾燥～通常～湿潤想定

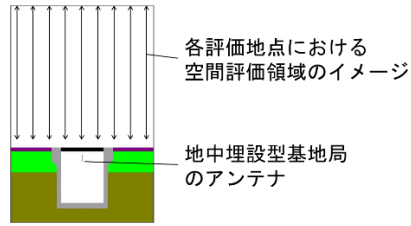
2.3.2 空間評価領域に関する検討

地中埋設型基地局から発射される電波について、1.3 節に掲げる現行の評価方法を適用した FDTD 法による電磁界解析を通じて、人体が電波に不均一にばく露される場合の空間評価領域を 10cm から 200cm までの 10cm 刻みで変化させた場合の電力束密度の空間的最大値及び空間的平均値を確認した。具体的には、2.3.1 節の検討モデルを用いて、電力束密度分布の評価地点ごとに、ある空間評価領域（例えば 10cm から 200cm まで）において電力束密度の空間的最大値及び空間的平均値を算出する。評価地点は、図 1-7 に示す各算出地点を参照し、図 2-12 に示すようにハンドホールの蓋の中心部分を原点とし、X 軸、Y 軸、X 軸から Y 軸に向かって 45° の方向 ($\phi=45^\circ$)、及び X 軸から Y 軸に向かって 135° の方向 ($\phi=135^\circ$) のそれぞれに沿って、+/-90cm の範囲において、2cm 間隔で設定した。各評価地点における空間評価領域のイメージは、図 2-13 のとおり。

²⁰ 「2018 HAND HOLE 総合カタログ」(株式会社マンホール商会)

²¹ 同上

²² 「一建管内路線 歩道舗装構造図」(2019 年 12 月 東京都建設局)



出典 基地局等評価方法作業班（第6回）資料より

図2-13 各評価地点における空間評価領域のイメージ

電力束密度の空間的最大値及び空間的平均値の算出のための具体的手順は、以下のとおりである。

【手順(1)】

ハンドホール周囲の道路を構成するアスファルトコンクリート、砕石及び土壌の誘電率をパラメータとして変化させ、FDTD法によりそれぞれの電力束密度を計算する。このときの誘電率の組合せを n 通りとする。

【手順(2)】

評価地点1か所におけるある空間評価領域について空間的最大値を求める。

まず手順(1)で得られた電力束密度分布より、 i 番目の誘電率条件における電力束密度の空間的最大値 x_i を算出する。

次に、全誘電率 n 条件に対する x_i の平均値 x_{avg} 及び標準偏差 s を算出し、空間的最大値の95%値²³である $x_{avg} \pm 2s$ を算出する。

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{avg})^2}$$

n : 誘電率条件数 (0.7GHz帯及び0.8GHz帯では38、1.5GHz帯から4.5GHz帯までの範囲内では32)

x_i : i 番目の誘電率条件における電力束密度の空間的最大値

x_{avg} : 全誘電率 n 条件の電力束密度の空間的最大値の平均値

【手順(3)】

全ての評価地点において手順(2)を実行し、ある空間評価領域における空間的最大値の x_{avg} 及び $x_{avg} \pm 2s$ を得る。

【手順(4)】

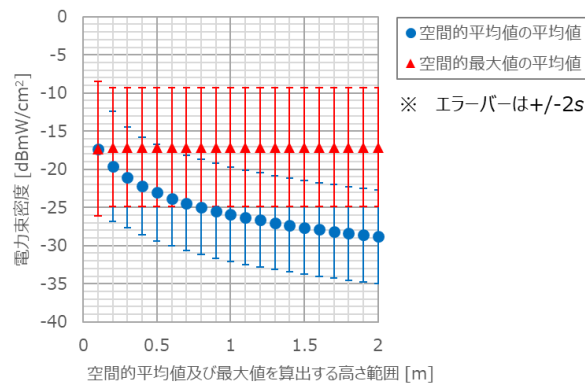
²³ 標本から推定される母集団の平均が95%の確率で含まれる区間の上限値

全ての空間評価領域（10cm から 200cm までの 10cm 刻みで変化）において手順(3)を実行し、全ての評価地点について各空間評価領域における電力束密度の空間的最大値の x_{avg} 及び $x_{avg} \pm 2s$ を得る。

【手順(5)】

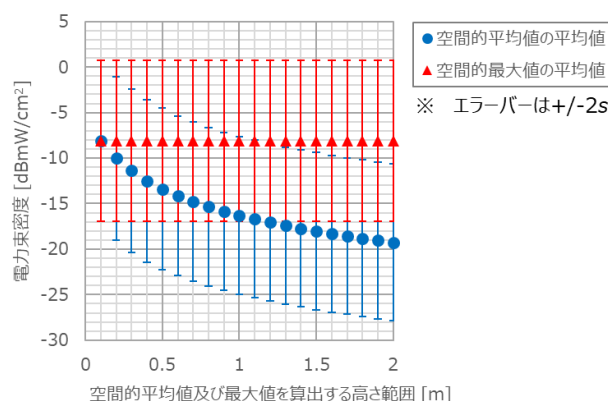
手順(2)から手順(4)までの「空間的最大値」を「空間的平均値」に読み替えて同様の手順を実行することで、「空間的平均値」を算出する。

上記手順に基づき、波源真上の評価地点において、空間評価領域を変化させた場合の電力束密度を算出した結果は図2-14から図2-17までのおりであり、空間評価領域を小さくすれば小さくするほど、当該評価領域における電力束密度が大きくなることが確認できた。



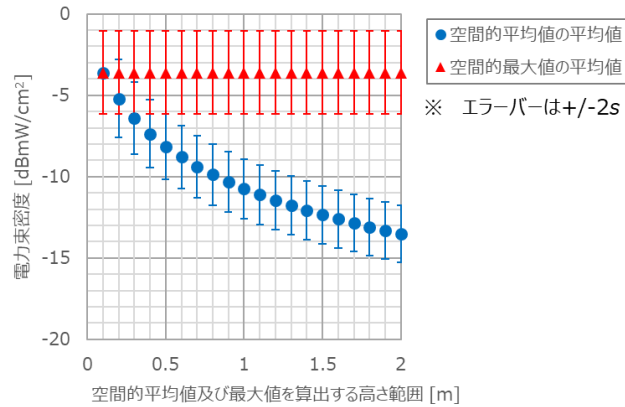
出典 基地局等評価方法作業班（第6回）資料より

図2-14 空間評価領域を変化させた場合における電力束密度（垂直偏波、0.7GHz帯、波源真上）



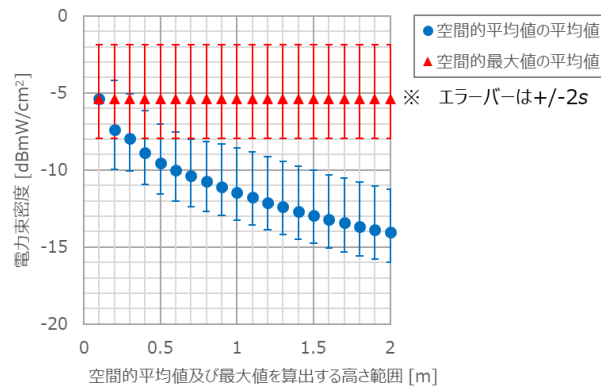
出典 基地局等評価方法作業班（第6回）資料より

図2-15 空間評価領域を変化させた場合における電力束密度（垂直偏波、4.5GHz帯、波源真上）



出典 基地局等評価方法作業班（第6回）資料より

図2-16 空間評価領域を変化させた場合における電力束密度（水平偏波、0.7GHz帯、波源真上）



出典 基地局等評価方法作業班（第6回）資料より

図2-17 空間評価領域を変化させた場合における電力束密度（水平偏波、4.5GHz帯、波源真上）

これは、地中埋設型基地局では大地面に近いほど電磁界強度が大きくなる傾向にあることに起因しているものと考えられ、2.2節の実測の結果とも一致する。

以上の検討結果から、人体が電波に不均一にばく露される場合の空間評価領域について、地中埋設型基地局に対しては、人体に対する安全性を担保するため、大地面から200cmまでとされている現行の範囲内よりも上限を低く設定することが適当であると考えられる。そのため、一般的に歩行可能となる1歳児が存在する空間を対象として想定することとし、1歳児（1年0～1月未満）の平均身長が男子では74.9cm、女子では73.3cm²⁴であることから、地中埋設型基地局に関しては、人体が電波に不均一にばく露される場合の空間評価領域を大地面から70cmまでの範囲内とすることが適当である。

²⁴ 「乳幼児身体発育調査」厚生労働省（平成22年）

2. 3. 3 電波の強度の算出方法に関する検討

2. 2節の実測の結果から、地中埋設型基地局から発射される電波による電力束密度は、基本算出式（大地面等の反射を考慮した係数 K を 1 とした場合）に補正係数 A を乗じることによって算出することとする。

この場合の電力束密度 S [mW/cm^2] は、次式で与えられる。ただし、 P は空中線入力電力 [W]、 G は送信空中線の最大輻射方向における絶対利得を電力比率で表したもの、 R は算出に係る送信空中線と算出を行う地点との距離 [m] である。

$$S = \frac{PG}{40\pi R^2} \times A$$

補正係数 A の算出を行うため、2. 3. 2節の検討結果から空間評価領域を 70cm とした上で、現行の基本算出式（大地面等の反射を考慮した係数 K を 1 とした場合）により求めた電力束密度と、電磁界解析（FDTD 法）による電力束密度との結果を比較した。比較に際して FDTD 法の不確かさを考慮し、さらにその結果に統計処理を施し 95% 値を求める。具体的な手順は、以下のとおりである。

【手順①】

電力束密度分布の全評価地点において、基本算出式に基づき空間評価領域 70 cm の空間的最大値 (PD_{cal}) を算出する。

評価地点は、2. 3. 2節の手順(1)と同様に、図 1-7 に示す各算出地点を参照し、図 2-12 に示すようにハンドホールの蓋の中心部分を原点とし、 X 軸、 Y 軸、 X 軸から Y 軸に向かって 45° の方向 ($\phi=45^\circ$)、 X 軸から Y 軸に向かって 135° の方向 ($\phi=135^\circ$) のそれぞれに沿って、2cm 間隔で設定した。各評価地点における空間評価領域のイメージは、図 2-13 のとおり。

【手順②】

2. 3. 1節の検討モデルを用いた FDTD 法により得られた電力束密度分布の全評価地点において、ある誘電率条件における空間評価領域 70 cm の場合の空間的最大値 (PD_{FDTD}) を算出する。

評価地点は、手順①と同様であり、各評価地点における空間評価領域のイメージは、図 2-13 のとおり。

【手順③】

全評価地点において、電力束密度の空間的最大値に関して、FDTD 法より求まる値を基本算出式により求まる値で除した ($\text{PD}_{\text{FDTD}}/\text{PD}_{\text{cal}}$) を算出する。この値を「電力束密度の空間的最大値の比」と呼ぶ。

【手順④】

ハンドホール周囲の道路を構成するアスファルトコンクリート、砕石及び土壌の誘電率をパラメータとして変化させ、条件数 n の各誘電率において得られた電力束密度分布より、手順③にて、全評価地点及び全誘電率 n 条件において、それぞれ電力束密度の空間的最大値の比を得る。

【手順⑤】

手順④で得た全評価地点及び全誘電率 n 条件における電力束密度の空間的最大値の比より、各評価地点において、全誘電率 n 条件における「電力束密度の空間的最大値の比」の最大値を算出する。

【手順⑥】

手順⑤で得た各評価地点での全誘電率 n 条件における電力束密度の空間的最大値の比の最大値より、それらの全評価地点における最大値（以下「全計算条件における電力束密度の空間的最大値の比の最大値」という。）を算出する。

【手順⑦】

手順③から手順⑥までの電磁界解析による不確かさを検討する。FDTD 法を用いた電磁界解析の拡張不確かさの導出方法は、参考資料 3 のとおりである。

【手順⑧】

手順⑥で得た全計算条件における電力束密度の空間的最大値の比の最大値に手順⑦で得た拡張不確かさを加えることで、拡張不確かさを考慮した全計算条件における電力束密度の空間的最大値の比の最大値を算出する。

【手順⑨】

手順④で得た全評価地点及び全誘電率 n 条件における、各電力束密度の空間的最大値の比に、手順⑦で得た拡張不確かさを加算し、全評価地点及び全誘電率 n 条件において、それぞれ、拡張不確かさを考慮した電力束密度の空間的最大値の比を算出する。

【手順⑩】

手順⑨で得た値から、各評価地点において、全誘電率 n 条件における拡張不確かさを考慮した電力束密度の空間的最大値の比の 95% 値 ($x_{\text{avg}} + 2s$) を算出する。ただし、 s は拡張不確かさを考慮した誘電率 n 条件の電力束密度の空間的最大値の比の標本標準偏差であり、次式により求められる。

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{avg}})^2}$$

n : 誘電率条件数 (0.7GHz 帯及び 0.8GHz 帯では 38、1.5GHz 帯から 4.5GHz 帯までの範囲内では 32)

x_i : 各評価地点及び i 番目の誘電率条件における拡張不確かさを考慮した電力束密度の空間的最大値の比

x_{avg} : 各評価地点での全誘電率 n 条件における拡張不確かさを考慮した電力束密度の空間的最大値の比の平均値

【手順⑪】

手順⑩で得た各評価地点での誘電率 n 条件における拡張不確かさを考慮した電力束密度の空間的最大値の比の 95% 値より、それらの全評価地点における最大値 (以下「拡張不確かさを考慮した全計算条件における電力束密度の空間的最大値の比の 95% 値の最大値」という。) を算出する。

【手順⑫】

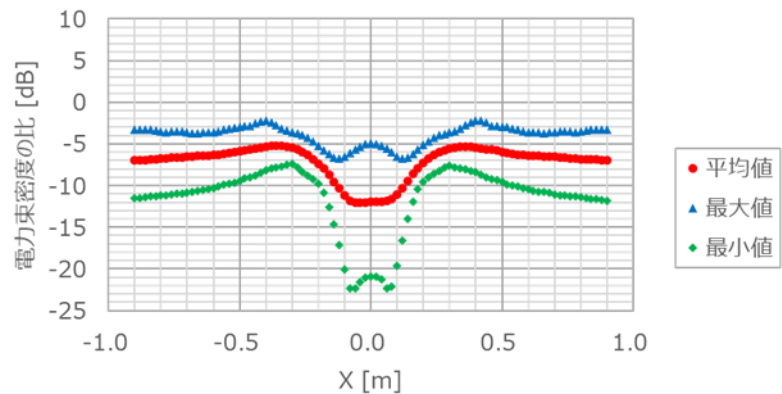
手順①から手順⑪までの「空間的最大値」を「空間的平均値」に読み替えて同様の手順を実行することで、「空間的平均値」を算出する。

以上の手順のうち、手順④で得られた全評価地点及び全誘電率 n 条件における各電力束密度の空間的最大値の比を算出した結果の例は、図 2-18 から図 2-21 までのおりである。これらの図では、誘電率の違いによる空間的最大値の比への影響の特徴を把握しやすくするため、手順⑤で得られる各評価地点での全誘電率 n 条件における空間的最大値の比の最大値に加え、参考として、平均値及び最小値も示している。

垂直偏波の場合、特に波源の真上に当たるハンドホールの蓋の中心 (原点) 付近において、周波数が高くなるほど電力束密度の比が大きくなる傾向が確認された。この原点付近における電力束密度の比の変化については、ハンドホールの誘電率の変化が最も大きく影響しており、全体的には、誘電率が大きいほど電力束密度の比が大きい傾向にあった。アンテナの指向方向に当たる、ハンドホール内部の側壁表面又は側壁とハンドホール周辺の地下構造 (碎石等) との境界からの反射が、影響に支配的な要素と考えられる。

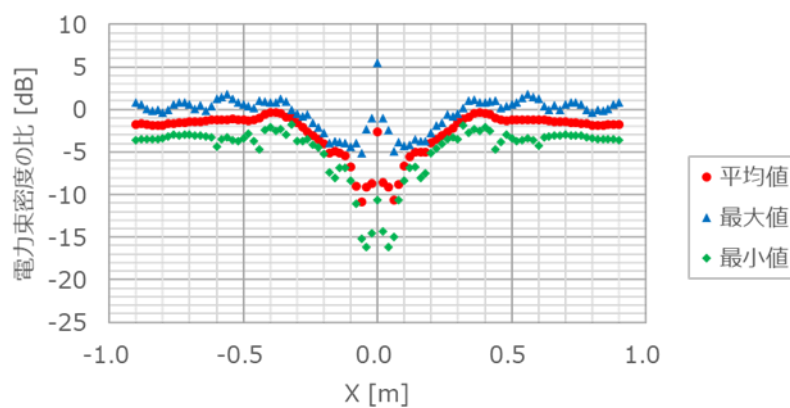
水平偏波の場合、顕著な周波数依存性は確認されなかった。水平偏波における電力束密度の比の変化についても、ハンドホールの誘電率の変化が最も大きく影響しており、全体的には、誘電率が大きいほど電力束密度の比が大きい傾向にあった。これは、空中線指向方向に当たる、ハンドホール内部の底部表面又は底部とハンドホール周辺地下構造 (土壌等) との境界からの反射等が主に影響しているものと考えられる。

垂直偏波と水平偏波との間における周波数依存性の違いは、波源からハンドホール内部の側壁又は底部までの距離と波長との関係、回折の影響等によるものと推察される。



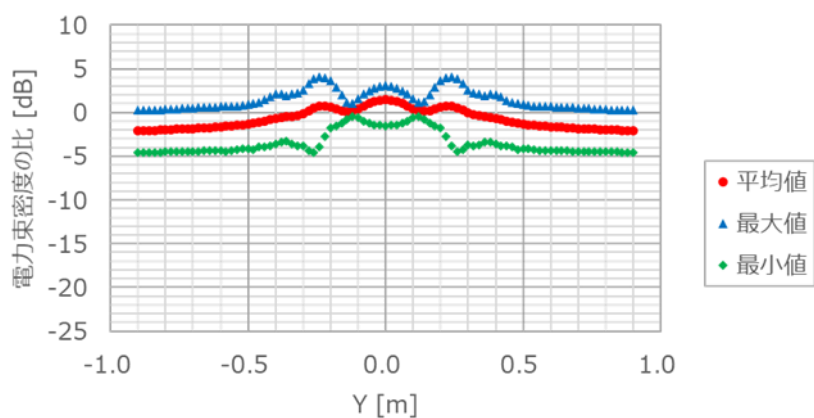
出典 基地局等評価方法作業班（第6回）資料より

図2-18 電力束密度の空間的最大値の比の水平方向距離及び誘電率依存性（垂直偏波、0.7GHz帯、Y=0m）



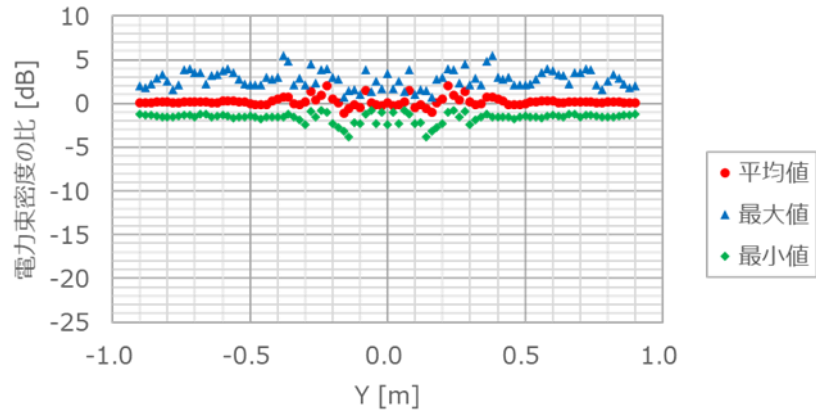
出典 基地局等評価方法作業班（第6回）資料より

図2-19 電力束密度の空間的最大値の比の水平方向距離及び誘電率依存性（垂直偏波、4.5GHz帯、Y=0m）



出典 基地局等評価方法作業班（第6回）資料より

図2-20 電力束密度の空間的最大値の比の水平方向距離及び誘電率依存性（水平偏波、0.7GHz帯、X=0m）

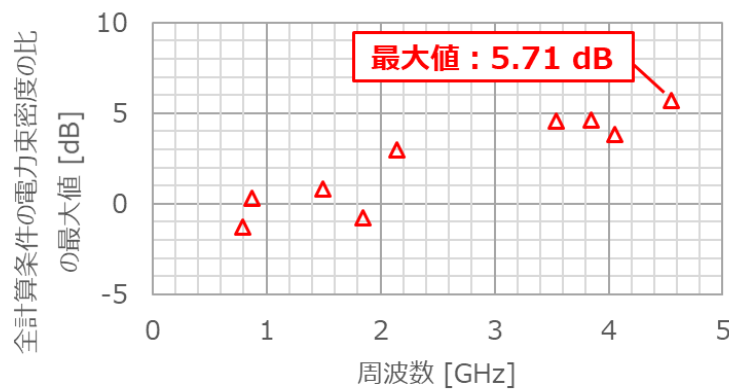


出典 基地局等評価方法作業班（第6回）資料より

図2-21 電力束密度の空間的最大値の比の水平方向距離及び誘電率依存性（水平偏波、4.5GHz帯、X=0m）

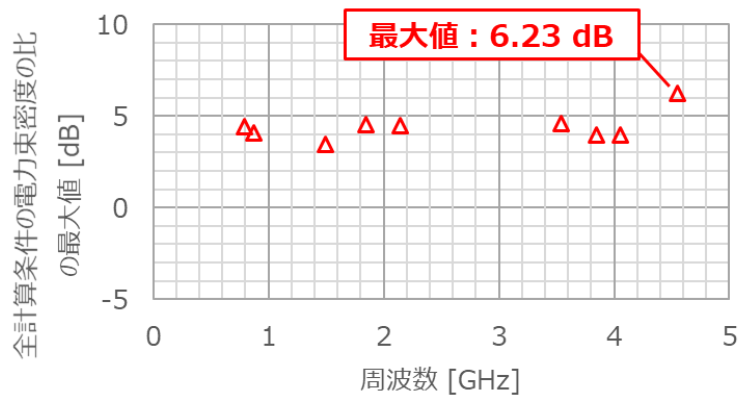
続いて、周波数帯ごとに、手順⑤及び手順⑥に基づき、全計算条件における電力束密度の空間的最大値の比の最大値を算出した。同様に、手順⑫を適用し「空間的最大値」を「空間的平均値」に読み替えた場合の手順⑤及び手順⑥に基づき、全計算条件における電力束密度の空間的平均値の比の最大値を算出した。それらの結果を参考資料4に示す。

これらの結果をグラフ化したものは図2-22から図2-25までのとおりである。全計算条件における電力束密度の空間的最大値の比の最大値は、4.5GHz帯のときに最大となり、その値については、垂直偏波では「5.71dB」、水平偏波では「6.23dB」となった。垂直偏波の場合は、周波数が高くなるとともに電力束密度が基本算出式による計算結果よりも大きくなる傾向が見られた。一方、水平偏波については、周波数依存性は特に確認できなかった。なお、全計算条件における電力束密度の空間的最大値の比の最大値の方が、全計算条件における電力束密度の空間的平均値の比の最大値より大きい傾向にあることが確認された。



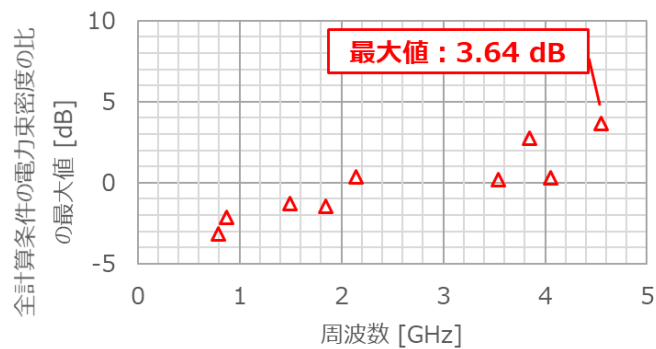
出典 基地局等評価方法作業班（第6回）資料より

図2-22 全計算条件における電力束密度の空間的最大値の比の最大値（垂直偏波）



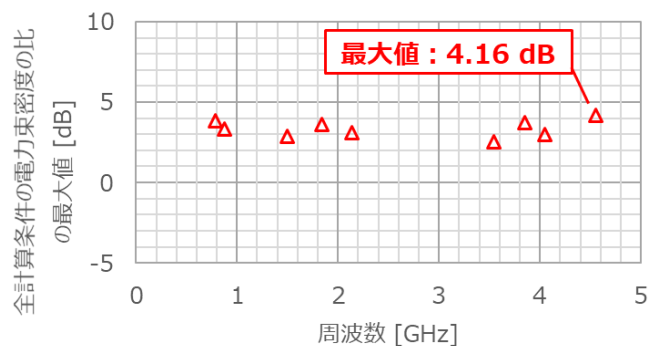
出典 基地局等評価方法作業班（第6回）資料より

図 2 - 2 3 全計算条件における電力束密度の空間的最大値の比の最大値（水平偏波）



出典 基地局等評価方法作業班（第6回）資料より

図 2 - 2 4 全計算条件における電力束密度の空間的平均値の比の最大値（垂直偏波）



出典 基地局等評価方法作業班（第6回）資料より

図 2 - 2 5 全計算条件における電力束密度の空間的平均値の比の最大値（水平偏波）

さらに、FDTD 法を用いた電磁界解析の拡張不確かさは、手順⑦及び参考資料 3 より「±0.526dB」であると見積もられるため、拡張不確かさを考慮した全計算条件におけ

る電力束密度の空間的最大値の比の最大値を手順⑧に従って算出した結果、垂直偏波では「6.24dB」、水平偏波では「6.78dB」となった。

また、拡張不確かさを考慮した全計算条件における電力束密度の空間的最大値の比の95%値の最大値を手順⑨から手順⑪までに従って算出した結果を参考資料5に示す。参考資料5より、垂直偏波では「7.02dB」が、水平偏波では「6.23dB」が、それぞれ最大値として得られた。

以上の検討結果から、電力束密度の比の統計処理結果は表2-2のとおりである。最も大きな値が得られたのは垂直偏波の95%値の場合の「7.02dB」であったことから、この値を基に基本算出式に乗じる補正係数Aを検討することが適当である。「7.02dB」は真値に換算すると「5.04」に相当する。基本算出式の利便性を考慮すると、補正係数Aは整数値であることが望ましいが、小数点第一位以下の取り扱いについて、切上げ又は四捨五入による切捨てのどちらが適切であるかという点には注意が必要である。ここで、諮問第104号「電波防護指針への適合確認するための電波の強度の測定方法及び算出方法」に対する電気通信技術審議会答申（平成10年11月30日）によれば、電波の強度の算出式について「標準算出方法により算出した電波の強度が、実際の値より低くならないようにする必要があり、標準算出方法を定めるに当たっては、この条件を満足するように留意した」と示されている。この考え方に基づき、基本算出式に乗じる補正係数Aとして、「5.04」の小数点第一位以下を切り上げた「6」を適用することが適当である。

表2-2 電力束密度の比の統計処理結果

値の分類	電力束密度の比 [dB]	
	垂直偏波	水平偏波
最大値	6.24	6.76
95%値	7.02	6.23

出典 基地局等評価方法作業班（第6回）資料より

また、 H_{1-6} を用いた場合と H_{1-9} を用いた場合とで電磁界解析結果を比較したところ、評価地点における電力束密度の比は、全体傾向としてはより深さの浅いハンドホールである H_{1-6} を用いた場合の方が僅かに大きくなった。ただし、 H_{1-6} 及び H_{1-9} については、その大きさの違いが小さいことから、その電力束密度の比に及ぼす差異も1dB以下となり、電磁界解析結果については同等程度の大きさのものとして扱うことが適当とした。一方、地中埋設型基地局としての利用が想定されるハンドホールの大きさについては、周辺の道路への影響や設置費用の低減等のため可能な範囲で小さくする必要はあるが、空中線を含む装置を内部に収めることができる最低限の大きさが必要であることから、 H_{1-6} 相当及び H_{1-9} 相当のものが実装時に想定される現実的な大きさであるとした。また、ハンドホールの大きさが H_{1-6} 相当及び H_{1-9} 相当のものよりも大きくなる場合は、ハンドホールからの反射による影響が小さくなると考えられる。以上から、今後も空中線

を含む無線設備の小型化の動向を踏まえていく必要があるが、当面の間は本検討で対象としたハンドホールを用いた場合における補正係数を地中埋設型基地局に一般化して適用することは妥当である。

また、本検討モデルの対象とした周波数帯は 700MHz 帯から 4.5GHz 帯までであるが、電力束密度の空間的最大値の比、電力束密度の空間的平均値の比のいずれも、周波数が最も高い 4.5GHz 帯の場合に最大となった。4.5GHz 帯の検討に当たっては、「第 5 世代移動通信システムの導入のための特定基地局の開設計画の認定」²⁵において割り当てられた 4.5GHz 帯の中心周波数である 4550MHz（帯域 100MHz）を代表として用いた。そのため、今回の検討結果が適用できる周波数の上限については、当該周波数帯の上限と合わせて 4600MHz までとすることが妥当である。一方で、700MHz 帯の検討に当たっては、携帯電話システムのダウンリンク用に割り当てられている周波数帯の中心周波数である 788MHz を代表として用いた。本検討結果のうち、垂直偏波の場合については周波数が高くなるとともに電力束密度が基本算出式による計算結果よりも大きくなる傾向が見られた一方で、水平偏波の場合については周波数依存性が特に確認できなかったことから、今回の検討結果が適用できる周波数の下限については、携帯電話システムの電波利用状況等を考慮し、700MHz からとすることが妥当である。

²⁵ 電波監理審議会答申「第 5 世代移動通信システムの導入のための特定基地局の開設計画の認定」（平成 31 年 4 月 10 日付け総務省報道資料）

第3章 地中埋設型基地局から発射される電波による SAR（比吸収率）の評価

通常の基地局については遠方領域では電磁界強度指針を遵守すれば人体への安全性は担保されるが、地中埋設型基地局についてはその特殊性を考慮し、局所吸収指針への適合性に関しても確認を行っておくことが望ましいと考えられる。

具体的には、FDTD 法による電磁界解析を通じて、地中埋設型基地局からの電波による全身平均 SAR 及び局所 SAR を見積もり、電波防護指針が定める基準値との比較検討を行うことで、安全性に関する検討を行った。

3. 1 検討モデル

日本人を模擬した数値人体モデル²⁶のうち、図3-1に示す成人男性モデル及び小児モデル（3歳児）を用いて電磁界解析を行い、地中埋設型基地局としての利用が想定される空中線と同様な放射指向性を有する半波長ダイポールアンテナについて SAR の評価を行った。検討モデルの数値解析条件については、参考資料6に示す。なお、実際の人体にはその体型に個体差があり、今回用いた数値人体モデルと異なる場合が存在するが、大地面に近づくほど電波の強度が強くなっていくという地中埋設型基地局の特徴を踏まえると、局所 SAR についてはピークが足の裏付近に現れることが想定されること、全身平均 SAR については身長が低い場合に最も大きくなることが想定されることから、小児モデル（3歳児）を対象に加えることで、概ね全ての体型に関する検討結果を包含できているものと考えられる。

平面波が人体の足から頭部方向に入射する場合を想定した「(1)平面波ばく露評価」、地中埋設型基地局の直上に人体が存在する状態を想定した「(2)地中埋設型基地局ばく露評価」を実施した。

また、評価に用いた周波数は、表3-1のとおりである。



出典 基地局等評価方法作業班（第6回）資料より

図3-1 日本人を模擬した数値人体モデル

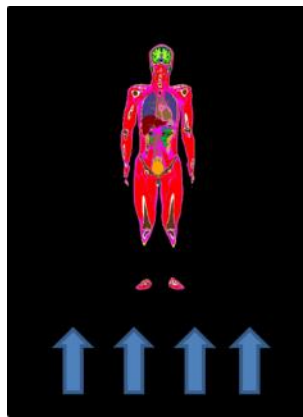
²⁶ 国立研究開発法人情報通信研究機構が開発したもので、国内外の200以上の研究機関において利用実績がある。数値人体モデルとは、人体（組織・臓器）の形状を微小な要素の集合体として表現し、各微小ブロックに筋肉、脂肪といった組織・臓器名を示す番号を付与したもの。その組織・臓器に対応する電気定数を与えることで電波が人体に吸収される様子をシミュレーションすることができる。

表 3-1 評価に用いた周波数

周波数 (MHz)	788	875	1493.4	1842.5	2140	3540	3850	4050	4550
--------------	-----	-----	--------	--------	------	------	------	------	------

(1) 平面波ばく露評価

平面波にばく露された場合の全身平均 SAR については、人体の正面からばく露されたときに最大となるものと考えられているが、確認のため、自由空間中の数値人体モデルに対して、表 3-1 に示す周波数の平面波が、図 3-2 に示すように、人体の足元から頭部方向に入射する場合を想定した評価を行った。平面波の強度は、電波防護指針の電磁界強度指針の基準値とした。



出典 基地局等評価方法作業班（第 6 回）資料より

図 3-2 平面波の入射イメージ

(2) 地中埋設型基地局のばく露評価

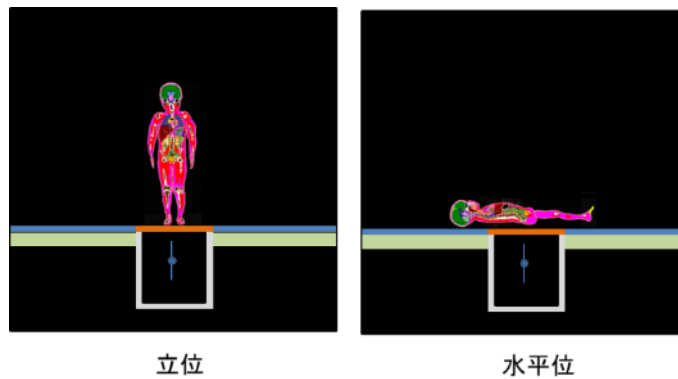
地中埋設型基地局としての利用が想定される垂直偏波の半波長ダイポールアンテナを波源とし、地中埋設型基地局の周辺の材質として、アスファルト、砕石及び土壌を想定したモデルを用いた。また、アンテナの空中線入力電力は 1W とした。

評価モデルのイメージは図 3-3 のとおりであり、一般的なケースとして、地中埋設型基地局の上に人体が立っている状態（立位）を想定した評価を行った。地中埋設型基地局の空中線の真上に人体の中心が存在する場合を想定した。

さらに、小児モデル（3 歳児）に対しては、一般的ではないが通常環境の中で生じ得るケースとして、地中埋設型基地局の直上で人体が横になった状態（水平位）を想定した評価も行った。水平位では、地中埋設型基地局の空中線の真上に人体のでん部が存在する場合を想定した。

なお、実際の環境下では、ベビーカー、自転車等の乗り物の上に人体が存在するケースも考えられ、その際には乗り物を構成する金属からの反射によって電波ばく露が強くなる可能性がある。しかしながら、地中埋設型基地局から発射される電波の強度は、空中線の近傍かつ地上からの高さが低い地点で大きく、そこから離れると急速に小さくな

っていく傾向にあることから、乗り物に搭乗する人体の高さを考慮すると、反射波が加わることで電波ばく露量が増加した場合であっても人体への影響が出るほどの強度になることは想定されず、立位及び水平位を想定したケースによる評価で十分であると考えられる。また、地中埋設型基地局の付近に金属物体等の建造物が存在し強い反射を生じさせるおそれがある場合については、電磁界強度指針との適合性を確認する際に考慮²⁷されている。



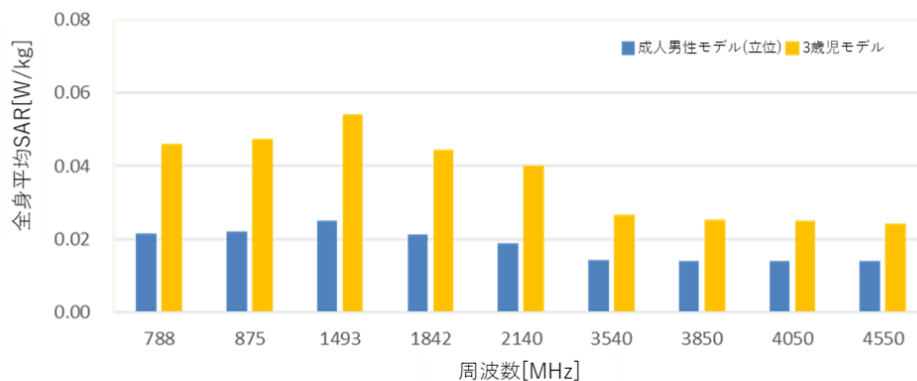
出典 基地局等評価方法作業班（第6回）資料より

図3-3 地中埋設型基地局ばく露評価モデルのイメージ

3. 2 評価結果

(1) 平面波ばく露評価

全身平均 SAR の評価結果は、図3-4のとおりである。平面波の強度は、電波防護指針の電磁界強度指針の基準値とした。小児モデルの方が高くなる傾向が見られ、成人男性に対して最大2倍程度高値を示している。

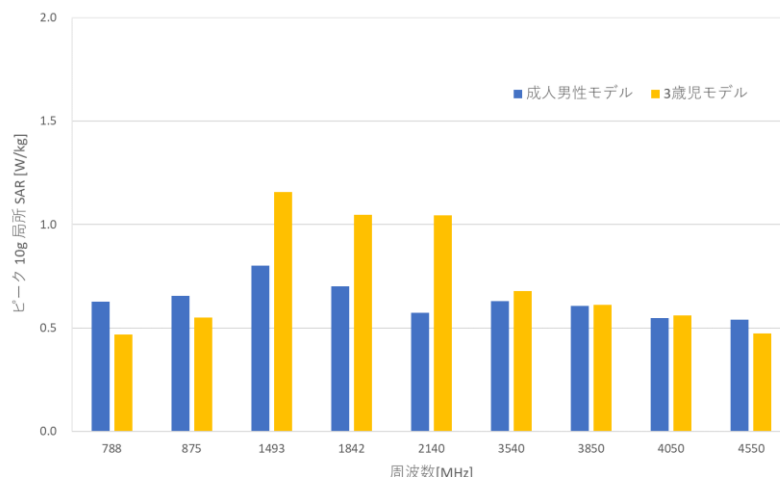


出典 基地局等評価方法作業班（第6回）資料より

図3-4 平面波ばく露の評価結果（全身平均 SAR）

²⁷ 平成11年郵政省告示第300号「電波法施行規則第二十一条の三第二項の規定に基づく無線設備から発射される電波の強度の算出方法及び測定方法」第4項

また、任意の生体組織 10g のうち最大となる局所 SAR（ピーク 10g 局所 SAR）の評価結果は、図 3-5 のとおりである。数値人体モデルの違いによる差分は全身平均 SAR ほど大きくはないが、1493MHz、1842MHz、2140MHz 等において小児モデルの方が高くなる傾向が見られる。

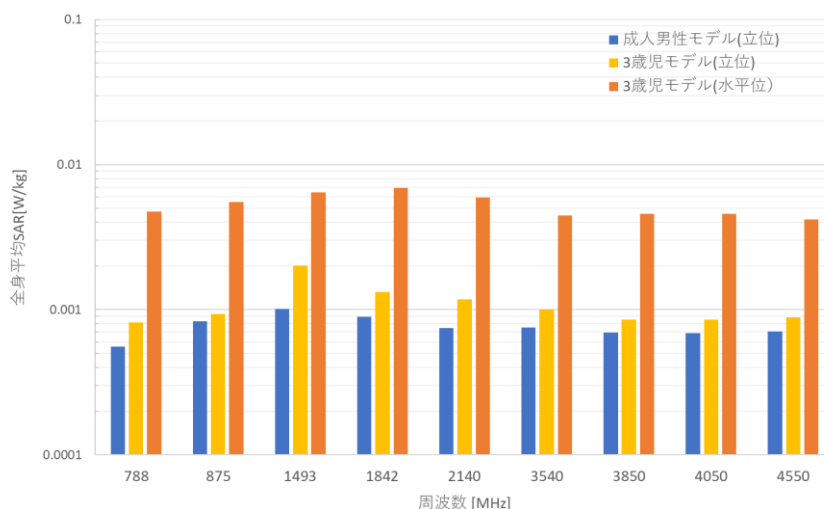


出典 基地局等評価方法作業班（第 6 回）資料より

図 3-5 平面波ばく露の評価結果（局所 SAR）

(2) 地中埋設型基地局のばく露評価

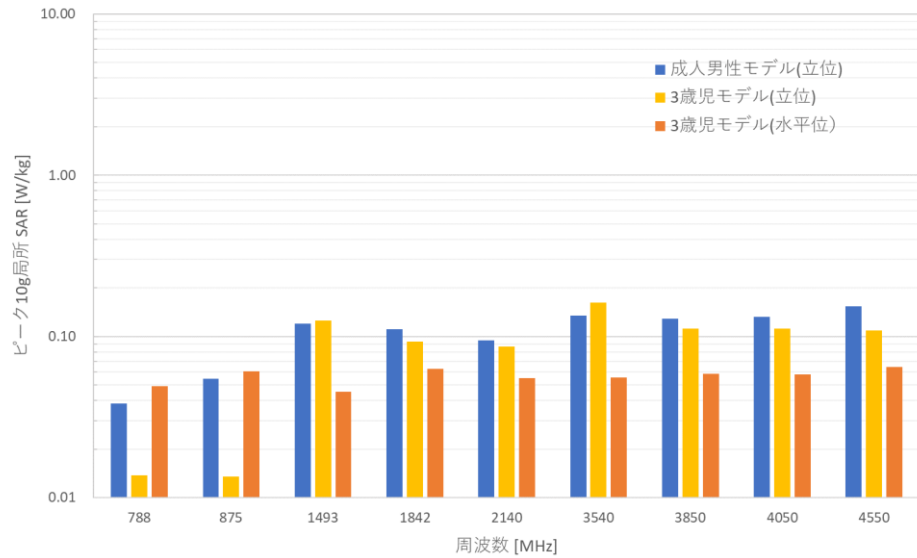
全身平均 SAR の評価結果は、図 3-6 のとおりである。アンテナの空中線入力電力は 1W とした。立位においては、成人男性モデルよりも小児モデルの方がやや高くなる傾向が見られる。また、小児モデルの水平位では、立位よりも 5 倍以上高い値を示している。



出典 基地局等評価方法作業班（第 6 回）資料より

図 3-6 地中埋設型基地局のばく露評価結果（全身平均 SAR）

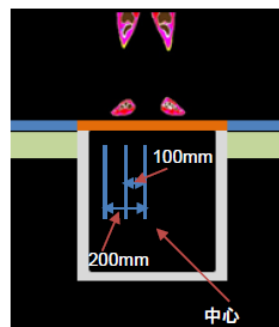
また、ピーク 10g 局所 SAR の評価結果は、図 3-7 のとおりである。数値人体モデルの違いによる差分はそれほど大きくなく、立位と水平位の違いによる差分もそれほど大きくはないという結果が得られている。特に、788 MHz 及び 875 MHz においては、水平位では立位より高値を示したが、その値は 1493 MHz 以上の周波数帯における値と同等程度である。



出典 基地局等評価方法作業班（第 6 回）資料より

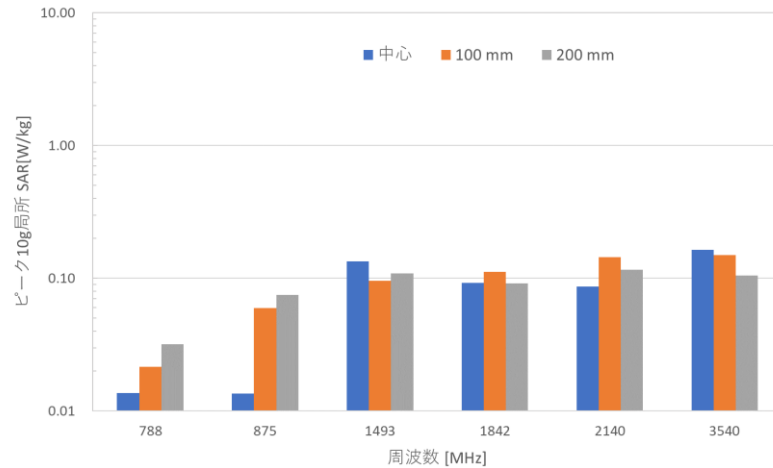
図 3-7 地中埋設型基地局のばく露評価結果（局所 SAR）

なお、周波数が 788 MHz 又は 875 MHz の場合においては、小児モデルの立位の場合に極端に小さい値が示されているが、これは、足の位置等が成人男性と異なることが主な要因であると考えられる。図 3-8 に示すように空中線をハンドホール中心から人体側方へ 10cm 又は 20cm 移動させた条件での計算結果は図 3-9 のとおりであり、成人男性モデルを用いた場合と同等の値が得られている。



出典 基地局等評価方法作業班（第 4 回）資料より

図 3-8 空中線をハンドホール中心から人体側方へ 10cm 又は 20cm 移動させた条件のイメージ



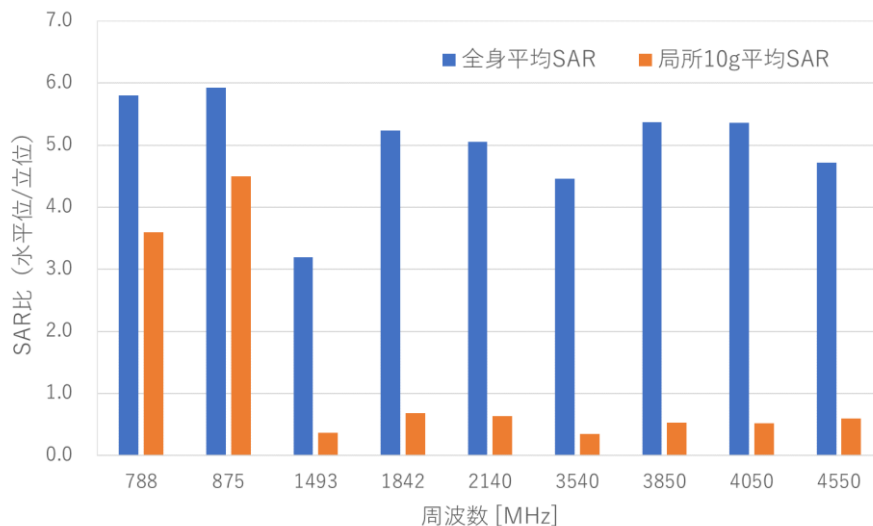
出典 基地局等評価方法作業班（第4回）資料より

図3-9 立位時に空中線を移動させた条件下でのばく露評価結果（小児モデル・局所 SAR）

以上の検討結果から、立位と水平位の差異を確認するため、小児モデルの立位における SAR に対する水平位における SAR の比を図3-10に示す。

全身平均 SAR については、水平位では立位よりも高く、立位での値に比べて最大で6倍程度高い値を示し、最大値は0.007W/kgであった。

ピーク10g局所 SAR については、水平位では、788 MHz 及び 875 MHz においては立位より高値を示したが、1493 MHz 以上の周波数帯においては立位より低い値を示し、最大値は0.065W/kgと、立位での最大値の1/2以下であった。



出典 基地局等評価方法作業班（第6回）資料より

図3-10 立位における SAR に対する水平位における SAR の比（小児モデル）

3. 3 SAR 評価のまとめ

電波防護指針が定める一般環境における SAR の基準値は表 3-2 のとおりであり、全身平均 SAR については 0.08W/kg、任意の組織 10g 当たりの局所 SAR（ピーク 10g 局所 SAR）については 6GHz 以下の周波数帯では 2W/kg（四肢では 4W/kg）となっている。

これに対し、足元から電磁界強度指針の基準値相当の平面波にばく露された場合でも、全身平均 SAR 及び局所 SAR の基準値を超えないことが確認された。

また、地中埋設型基地局を想定した一般的なケースである立位においては、空中線入力電力が 1W の場合は、全身平均 SAR は基準値（0.08 W/kg）の 1/30 未満、局所 SAR は基準値（2 W/kg）の 1/10 未満となった。また、地中埋設型基地局の直上で人体が横になったケースである水平位においては、空中線入力電力が 1W の場合は、全身平均 SAR は基準値（0.08 W/kg）の 1/10 未満、局所 SAR は基準値（2 W/kg）の 1/30 未満となった。これらの結果は、空中線入力電力が 10W 以下の場合、局所 SAR 及び全身平均 SAR が基準値以下となることを示唆している。一方、第 2 章で得られた算出式を用いた場合には、参考資料 7 に示すとおり、SAR の基準値を用いた評価に対し約 6 倍の付加的安全率を考慮した評価が可能となり、本算出式が十分に安全側の評価を与えることが確認された。

これらの結果は、電磁界解析に基づくものであり、厳密性を担保するものではないが、地中埋設型基地局からの電波が人体に好ましくないと考えられる生体作用を及ぼさない安全な状況の範囲にあることの確認の一助となるものと考えられる。

表 3-2 電波防護指針が定める一般環境における SAR の基準値

全身平均 SAR	0.08W/kg
任意の組織 10g 当たりの局所 SAR (6GHz 以下の周波数)	2W/kg (四肢では 4W/kg)

第4章 地中埋設型基地局から発射される電波の強度の測定方法及び算出方法に関する技術的条件

4. 1 一般的条件

(1) 適用の対象

地中埋設型基地局（大地面より下の位置にある空中線から電波発射を行う基地局をいう。）

(2) 周波数帯の適用範囲

700MHz から 4600MHz までとする。

(3) 空中線の位置

大地面より 10cm 以上深部に設置するものとする。

4. 2 人体が電波に不均一にばく露される場合の空間評価領域

人体が電波に不均一にばく露される場合において電波の強度を算出する際には、大地等から高さ 70cm までの空間的な平均値を求めることとし、算出する値は従前のおりとする。

人体が電波に不均一にばく露される場合において空間的平均値を求めるために電波の強度を測定する際には、測定地点上方 10cm から 70cm まで 10cm 間隔で測定することとする。

4. 3 電力束密度の算出方法

電波の強度の算出に当たっては、次式により電力束密度の値を求めることとする。

$$S = \frac{PG}{40\pi R^2} \times A$$

ただし、S は電力束密度[mW/cm²]、P は空中線入力電力[W]、G は送信空中線の最大輻射方向における絶対利得を電力比率で表したもの、R は算出に係る送信空中線と算出を行う地点との距離[m]、A は反射等に係る補正係数でありその値は 6 とする。

第5章 今後の検討課題

5. 1 国際標準との整合性確保

IEC 62232:2017 (2017年8月発行)においては、人体ばく露評価を目的とした基地局周辺の電界強度、電力束密度、SAR等の評価方法が定められている。現在、IEC 62232 第3版の規格化が進められており、以下に掲げるような事項が検討内容として含まれている。

- ・ 実際の送信電力又はEIRP²⁸を考慮した評価手順
- ・ Massive MIMO等5G関連技術の評価法
- ・ 複数波源でのばく露における適合基準

以上より、基地局等から発射される電波の強度の測定方法及び算出方法については、今後、国際的な検討状況等を踏まえつつ、国際標準との整合性の視点に留意して検討していくことが重要である。

²⁸ EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power): 等価等方輻射電力

別表1 情報通信審議会 情報通信技術分科会 電波利用環境委員会 構成員

(敬称略)(主査及び主査代理以外は五十音順)

	氏名	所属
主査 専門委員	多氣 昌生	東京都立大学 システムデザイン学部 特別先導教授
主査代理 専門委員	山中 幸雄	国立研究開発法人情報通信研究機構 電磁波研究所電磁環境研究室 マネージャー
委員	長谷山 美紀	北海道大学 数理・データサイエンス教育研究センター センター長／大学院情報科学研究院 教授
〃	増田 悦子	公益社団法人全国消費生活相談員協会 理事長
専門委員	秋山 佳春	NTT アドバンステクノロジー(株) グローバル事業本部 環境ビジネスユニット ビジネスユニット長
〃	石上 忍	東北学院大学 工学部 情報基盤工学科 教授
〃	石山 和志	東北大学 電気通信研究所 教授
〃	大西 輝夫	国立研究開発法人情報通信研究機構 電磁波研究所 電磁環境研究室 主任研究員
〃	尾崎 覚	富士電機株式会社 パワエレシステム事業本部 社会ソリューション事業部 技師長
〃	熊田 亜紀子	東京大学大学院 工学系研究科 電気系工学専攻 教授
〃	清水 久恵	北海道科学大学 保健医療学部 臨床工学科 教授
〃	曾根 秀昭	東北大学サイバーサイエンスセンター 教授
〃	平 和昌	国立研究開発法人 情報通信研究機構 電磁波研究所 所長
〃	田島 公博	一般社団法人情報通信技術委員会 伝送網・電磁環境専門委員会 情報通信装置のEMC・ソフトウェア SWG リーダー
〃	田中 謙治	一般財団法人テレコムエンジニアリングセンター 理事長
〃	塚原 仁	一般財団法人日本品質保証機構 試験部電磁環境試験課 参与
〃	平田 晃正	名古屋工業大学大学院工学研究科 電気・機械工学専攻 教授
〃	堀 和行	ソニー株式会社 品質・環境部 製品安全／環境コンプライアンスグループ チーフEMC/RFコンプライアンスマネージャー
〃	松永 真由美	東京工科大学 工学部 電気電子工学科 准教授
〃	山口 さち子	独立行政法人労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所 上席研究員
〃	山崎 健一	一般財団法人電力中央研究所 電力技術研究所 サージ・電磁気現象領域リーダー 副研究参事
〃	山下 洋治	一般財団法人電気安全環境研究所 横浜事業所 EMC 試験センター 所長
〃	和氣 加奈子	国立研究開発法人情報通信研究機構 電磁波研究所 電磁環境研究室 研究マネージャー

別表2 情報通信審議会 情報通信技術分科会 電波利用環境委員会 基地局等評価方法作業班 構成員

(敬称略)(主任及び主任代理以外は五十音順)

氏名	所属
主任 大西 輝夫	国立研究開発法人情報通信研究機構 電磁波研究所 電磁環境研究室 主任研究員
主任代理 日景 隆	北海道大学 大学院情報科学研究院メディアネットワーク部門 情報通信 システム学分野
青木 章 (第4回から)	ソフトバンク株式会社 モバイルネットワーク本部 電波部
伊藤 泰成	KDDI株式会社 技術企画本部 電波部 管理グループ マネージャー/ 一般社団法人電波産業会携帯電話基地局周辺の適合性評価法 Ad-hoc
小野 孝司	富士通株式会社モバイルシステム事業本部ワイヤレスシステム事業部/ 一般社団法人電波産業会携帯電話基地局周辺の適合性評価法 Ad-hoc
柿沼 由佳	公益社団法人全国消費生活相談員協会 IT研究会 研究員
佐野 康二	一般財団法人テレコムエンジニアリングセンター 電磁環境・較正事業本 部 電磁環境試験部 部長
多賀谷 裕	一般社団法人情報通信ネットワーク産業協会 ICT基盤部/ 一般社団法人電波産業会携帯電話基地局周辺の適合性評価法 Ad-hoc
富樫 浩行	株式会社ディーエスピーリサーチ 認証部 技術開発部 部長
長岡 智明	国立研究開発法人情報通信研究機構 電磁波研究所 電磁環境研究室 主任研究員/ 一般社団法人電波産業会携帯電話基地局周辺の適合性評価法 Ad-hoc
東山 潤司	株式会社NTTドコモ ネットワークイノベーション研究所 無線技術担当/ 一般社団法人電波産業会携帯電話基地局周辺の適合性評価法 Ad-hoc リーダー
平田 晃正	名古屋工業大学 先端医用物理・情報工学研究センター長/大学院工学 研究科 電気・機械工学専攻 教授
藤沢 和弘 (第3回まで)	ソフトバンク株式会社 モバイルネットワーク本部 電波部 企画調整課 担 当課長
藤田 祐智	楽天モバイル株式会社 技術戦略部 マネージャー
前山 利幸	拓殖大学 工学部 電子システム工学科 教授
吉田 和彦	一般社団法人電波産業会 研究開発本部 電磁環境グループ 担当部 長

参考資料 1 無線設備から発射される電波の強度の標準測定方法²⁹

1 標準測定方法の性格と構成

ここで示す標準測定方法は、通常入手可能な一般的な測定器を用いて行う方法で、簡便に測定を行う方法を示したものである。適正な工学的技術に基づいたものであれば、ここに示す測定方法と異なる方法を用いても良い。

本測定法においては、任意の方向・偏波を持つ電波の電磁界強度を正確に測定することが目的であり、このためには、入射波の直交3軸成分実効値の二乗和の平方根を測定することが基本となる。

この値を測定する方法には大きく分けて、次の2種類の方法がある。

- ・専用の等方性電磁界プローブを用いる方法
- ・汎用の測定器を用いる方法

等方性電磁界プローブは、2. 1に示す特徴を有しており、上記の測定が簡便に行える。汎用の測定器を用いる方法は、等方性電磁界プローブでは十分な測定が行い得ない場合(2. 3参照)や電磁界プローブの測定可能周波数範囲(電界:10kHz-50GHz 磁界:300kHz-1GHz)以外の周波数でも測定を行うことができる。

2 等方性電磁界プローブによる方法

2. 1 等方性電磁界プローブの構成と特徴

等方性電磁界プローブは、アンテナ部、検波部、指示計等から構成されている。アンテナ部は、直交する3軸のアンテナエレメント(微小ダイポールまたは微小ループ)からなり、各エレメントの応答を合成処理することにより偏波や到来方向に依存しない特性を得ようとするものである。検波の方式によって、ダイオード検波型と熱電対検波型がある。ダイオード検波型はパルス波のように振幅変動幅の大きいものに対する応答が良いとは言えず、2乗検波特性から外れるため、必ずしも正しい電力(実効値)を指示するとは限らない。熱電対検波型はパルスの電力(実効値)を指示することができるが、許容入力範囲が狭いため、過大な入力があると破壊されるおそれがある。指示計はプローブのセンサ部(アンテナ部、検波部)と一体になったものや、両者を分離して、その間を光ファイバで接続するものがある。

等方性電磁界プローブは、

- ①空間分解能が高い
- ②波源との結合性が小さい
- ③偏波が不明でも最大値を簡便かつ正確に測定することが可能である

等の特徴を持ち、使用するプローブの特徴を理解して使用すれば、狭い空間内や放射源近傍の測定等に簡便に利用できる。

²⁹ 出典:電気通信技術審議会答申諮問第104号「電波防護指針への適合を確認するための電波の強度の測定方法及び算出方法」(平成10年11月30日)

2. 2 等方性電磁界プローブの条件

(1) 等方性

対象無線局の周波数範囲において、電磁波の入射方向に対する応答の変動が3dB以内であること。

(2) 周波数特性

対象無線局の周波数範囲において、周波数に対する振幅特性の応答が平坦であること。(通常、ある周波数範囲における応答偏差という形で示される。)また、その周波数範囲以外の電磁波に対する応答が明らかであること。

(3) 振幅特性

対象無線局の周波数範囲において、正確に測定できる電磁界レベルの範囲が明らかであること。また、プローブおよび付属のケーブル等が測定する物理量以外の物理量に応答しないこと。(例えば、微小ループを用いたプローブは電界に対して応答しないこと。)

(4) 応答時間

1秒以内であること。

2. 3 測定方法

(1) 基本的な測定手順

- ・ 確認の対象となる測定地点において、人体の占める空間（地上では0から2mまでの範囲とする。）にわたり、プローブを走査して最大値を探る。
- ・ 各測定点における平均時間は、原則として6分間（100kHz以下は1秒未満）とする。但し、対象無線局の電波の変調特性から考えて6分間より短い時間で6分間の平均値が得られると考えられる場合は適宜平均時間を短縮しても良い。
- ・ この方法による測定値が指針値を超える場合は、補助指針に定める条件を満たす空間での空間平均をとった値を測定値とする。空間平均をとるポイントは原則として、300MHz未満の周波数においては20cm間隔、300MHz以上の周波数では10cm間隔とする。また、人体が占める空間に相当する場所における最大値を測定し、補助指針に定める値のうち最小の値と比較する。
- ・ 上記各項の手順により、対象となる領域において、アンテナの指向性が広い場合は、最大輻射方向を含み、送信アンテナを中心に少なくとも45度間隔、アンテナの指向性が狭い場合はメインローブ、サイドローブの方向にて測定を行うこと。

(2) 等方性電磁界プローブ使用上の注意点

人体や偏波の影響を受けないようにプローブを保持すること。例えば、プローブのアンテナ部分や高抵抗線の部分を持たないこと。また、電界プローブの軸が電界と平行にならないようにすること。

測定用プローブと電磁波源、大地、金属物体などとの結合を避けるため、これらの

間の最小距離は、原則として 300MHz 未満の周波数では 20cm 以上、300MHz 以上の周波数では 10cm 以上とすること。

(3) 複数波が存在する環境における測定の注意点

電磁界プローブは、一般に非常に広帯域であるので、他の無線局の電波の影響が無視できない場合は使用してはならない。この場合は、3 に示す周波数同調型測定系を使用する必要がある。

(4) パルス波の場合の注意点

パルス波の測定に電磁界プローブを用いる時は、熱電対型の電磁界プローブを用いること。

3 汎用の測定器による方法

3. 1 測定系の構成と特徴

基本的には、一般の電磁界強度測定と同様にアンテナ部（給電ケーブルを含む）と汎用の測定器を組み合わせ測定を行う。

測定系は、周波数同調型測定系と周波数非同調型測定系に分類される。

周波数同調型測定系は特定の周波数に同調し、その周波数を中心とした帯域幅内にある電磁界に対してのみ応答する測定系である。周波数同調型の測定器としては、スペクトラムアナライザ、妨害波測定器、電界強度測定器などがある。

この測定系は、同調可能な周波数範囲は極めて広く（例えば 10kHz～18GHz）、また受信感度が高く、応答時間が極めて短い。測定対象波が複数波である場合でも、各周波数成分を分離してそのレベルが測定可能なので、複数波の測定に適している。

なお、パルス波のようにその占有する帯域幅が測定器の分解能帯域幅より広い場合は正しいレベルを示していないことに注意する必要がある。

周波数非同調型測定系は、広い周波数にわたり電磁界レベルに対する出力値が均一な応答を示す測定系である。基本的な構成としては、広帯域アンテナと広帯域特性を持つ測定器を用いる。具体的な測定器としては、ダイオード検波器とオシロスコープ等の時間波形測定器、パワーセンサとパワーメータなどの組み合わせがある。前者は、電磁界の包絡線の時間波形を測定し、後者は電磁界の実効値を測定できる。このため、パルス波の測定のように時間的に変動する電磁界の測定に適している。但し、感度は周波数同調型測定系に比べて悪い。

3. 2 測定系の条件

(1) アンテナ

測定対象の無線局に応じて、適切なアンテナを用いる。ただし、そのアンテナ係数が既知であること。

(2) 測定器

測定器の測定可能周波数範囲、周波数分解能帯域幅（狭帯域系のみ）、入力感度、検波方式、最大許容入力が既知であること。入力インピーダンスが測定ケーブルと整合していること。強電磁界測定を対象としているので、測定器およびケーブルに十分なシールド特性があること。測定対象以外の高周波電磁界および低周波電磁界の影響を受けないこと。

3. 3 測定方法

(1) 基本的な測定手順

- ・ 確認の対象となる測定地点において、人体の占める空間にわたり、測定アンテナを走査して最大値を探る。
- ・ この場合、測定アンテナの向き及び偏波面は受信電圧が最大になるように配置し、その値を測定する。例えば、送信アンテナの偏波面等の特性が既知の場合は、そのアンテナの偏波面に測定アンテナの偏波面を合わせて測定する。但し、偏波損失を考慮した次の補正値を加えることとする。
 - ア 波源が直線偏波アンテナで、測定アンテナが円偏波アンテナの場合 3dB
 - イ 波源が円偏波アンテナで、測定アンテナが直線偏波アンテナの場合 3dB
- ・ 各測定点における平均時間は、原則として6分間（100kHz以下は1秒未満）とする。但し、対象無線局の電波の変調特性から考えて6分間より短い時間で6分間の平均値が得られると考えられる場合は適宜平均時間を短縮しても良い。
- ・ この方法による測定値が指針値を超える場合は、補助指針に定める条件を満たす空間での空間平均をとった値を測定値とする。空間平均をとるポイントは原則として、300MHz未満の周波数においては20cm間隔、300MHz以上の周波数では10cm間隔とする。また、人体が占める空間に相当する場所における最大値を測定し、補助指針に定める値のうち最小の値と比較する。
- ・ 上記各項の手順により、対象となる領域において、アンテナの指向性が広い場合は、最大輻射方向を含み、送信アンテナを中心に少なくとも45度間隔、アンテナの指向性が狭い場合はメインローブ、サイドローブの方向にて測定を行うこと。

(2) 測定器使用上の注意点

測定場所において、測定アンテナからケーブルを取り外し、ケーブル端を整合負荷で終端した時のレベルが、測定アンテナを接続した時のレベルに比べ無視できるほど小さいことを確認すること。

測定アンテナと電磁波源、大地、金属物体などとの結合を避けるため、これらの間の最小距離は、原則として300MHz未満の周波数では20cm以上、300MHz以上の周波数では10cm以上とすること。

なお、測定アンテナのサイズは専用の電磁界プローブと比べて大きいため、電磁波源、大地、金属物体などとの結合が大きくなることに注意すること。

測定アンテナを走査する時は、人体の影響が小さくなるように注意すること。

(3) 複数波の測定の注意点

周波数同調型測定系を用いる。3.3の(1)の方法に従って、各周波数成分ごとに入射波の最大値を測定すること。(最大点、最大方向は必ずしも一致しないことに注意する)。各周波数成分ごとに指針値に対する割合を算出し、それらの和(電界強度又は磁界強度においては、自乗和)が1を超えなければ、指針値を満たすと評価される。

(4) パルス波の測定の注意点

周波数非同調型測定系を用いる。ダイオード検波器とオシロスコープを用いた場合は、時間波形より平均値を計算すること。

4 測定上の注意事項

- (1) 測定に際して測定場所に立ち入る場合には、予め電磁界強度を推定し必要に応じて防護対策を講じるなど、測定者の安全を確保することが重要である。
- (2) 測定系の選定を誤らないこと。例えば、ダイオード検波型の等方性電磁界プローブを用いてレーダ波を測定したような場合は、電磁界強度を過小評価することがある。
- (3) 測定空間の内又は近傍に反射物等がある場合は、測定位置のわずかな変化に対して、電磁界強度が複雑に変化し局所的に大きくなることがあるので、測定位置の選定に注意すること。
- (4) 指向性を有するアンテナを用いる場合には、その指向特性(水平・垂直)を十分考慮し、主輻射方向以外の方向からの入射波の影響についても考慮すること。
- (5) 測定実施時には、測定者及び測定系に起因する電磁界のじょう乱を極力避けるように配慮すること。特に、時間的に変化している電磁界を測定している間は、測定者、アンテナ及び周囲の物体は移動させないこと。また、走査測定に伴って生じる電磁界の変動が、空間的な変動か、時間的な変動かを区別するため、走査を遅くするなど十分な注意を払いながら測定を実施すること。
- (6) 測定機器は、環境条件(温度、湿度、振動、電磁界など)の影響を受ける場合があるので注意すること。
- (7) 測定系は較正されたものを用い、構成機器の経過年数、使用頻度などに応じて定期的に較正を実施することが望ましい。
- (8) 測定に用いた測定器の型番、特性等を記録しておくことが望ましい。

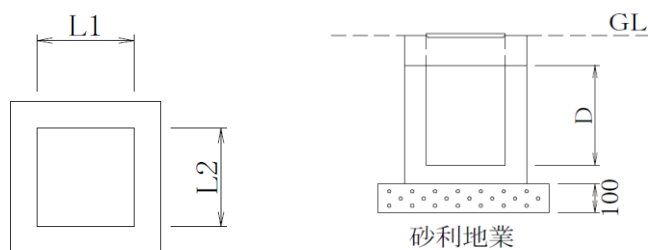
参考資料2 電波の強度に関する検討モデルの数値解析条件

1. 基本的事項

数値解析ソフト	XFDTD ver. 7.8 (Remcom 社)
各誘電体内のセルサイズ	各誘電体内の波長短縮を考慮した最小波長に対して 1/10 以下
吸収境界	PML (Perfect Matched Layer) 7 層

2. ハンドホールの寸法

「公共建築設備工事標準図（電気設備工事編）平成 31 年版」³⁰の H₁₋₆ 相当及び H₁₋₉ 相当。



(H₁、H₂)

(H₁)

[単位 mm]

記号		有効寸法(内部) *			構造体標準厚さ	
		L1	L2	D	側面	底面
ハンドホール	H ₁₋₆	600	600	600	60	80
	H ₁₋₉	600	600	900	60	80

備考

- 図は、一例とし、種別に応じた有効寸法を有するものとする。
- H₁ 及び H₂ は、現場打ハンドホールとすることができる。
- 構成は、一体形・多分割形いずれでもよい。ただし、多分割形の場合は各部分がずれないように一体化する。
- 配管用ノックアウトを有するほか、マンホール内には、支持材、ボルト、ケーブルフックを、ハンドホール内には、インサートを設ける。

注 * L1 及び L2 は、±5%以内、D は最小値とする。

³⁰ 平成 31 年 3 月 20 日 国営設第 188 号(国土交通省大臣官房官庁営繕部設備・環境課)

3. 各構造体の複素比誘電率

複素比誘電率については、参考文献^{31, 32}に基づき、以下のとおり設定した。

構造物の 想定状態	複素比誘電率の実部				
	Cover	HH	AC	CS	Loam
乾燥	2.6 ^{注1} , 4	2, 2.8 ^{注1} , 4, 6	5	7	2
通常		2, 2.8, 4, 6, 8			5
		6, 8, 12, 20			10
湿潤		8, 12, 20			20
				40 ^{注2}	

注1 国立研究開発法人情報通信研究機構による実測値

注2 700MHz 帯及び 800MHz 帯のみ Loam の複素比誘電率の実部を 40 に設定

一般に、複素比誘電率の虚部を含むと、誘電体内部の電波伝搬において損失が発生する。本検討モデルの検討対象は、空中線から発射された電波がハンドホールの蓋等の誘電体を通過して空間評価領域に到達した際の電力束密度分布であり、これらの損失、反射等による影響を考慮する必要がある。一方で、空間評価領域における電力束密度については、複素比誘電率の虚部を0として電磁界解析を行った方がより大きな値が得られることが想定されることから、人体に対する安全性の担保という観点では、複素比誘電率の実部のみを用いて電磁界解析を行っても特段の問題はないと考えられる。この確認のため、一部の条件で電磁界解析を行い、複素比誘電率の虚部を0として計算した場合と虚部を含めて計算した場合とを比較すると、電力束密度が大きい評価地点においては前者の方が電力束密度が大きくなる傾向が見られた。また、電力束密度分布の傾向は、ほぼ同様であった。そのため、複素比誘電率については、電磁界解析の計算量低減等の効率化を目的として、実部のみを用いることとした。参考として、数値解析を行った一部の条件を下表に、その結果を下図に、それぞれ示す。

³¹ 総務省「地中レーダー技術に関する調査検討会」報告書(平成 29 年 3 月)

³² 「コンクリート内部探査用電磁波レーダの原理 - 比誘電率について」, KEYTEC 株式会社ホームページ(<https://www.key-t.co.jp/resources/rader-tecinfo/rader02/>)

表 1 複素比誘電率の実部及び虚部を考慮した一部の条件

数値解析モデルの 構成物	組合せ 1		組合せ 2		組合せ 3	
	比誘電率 *1	導電率 [S/m]*2	比誘電率 *1	導電率 [S/m]*2	比誘電率 *1	導電率 [S/m]*2
ハンドホールの蓋 (Cover)	4	0.0057*3	4	0.0057*3	4	0.0057*3
ハンドホール (HH)	4	0.0051*3	8	0.0051*3	20	0.0051*3
アスファルトコン クリート (AC)	5	0.35*4	5	0.35*4	5	0.35*4
砕石 (CS)	7	10 ⁻⁶ *5	7	10 ⁻⁶ *5	7	10 ⁻⁶ *5
土壌 (Loam)	2	10 ⁻⁴ *5	5	10 ⁻⁴ *5	20	10 ⁻² *5

*1 複素比誘電率の実部。

*2 複素比誘電率の虚部に、真空中の誘電率と角周波数を乗じて算出。

*3 国立研究開発法人情報通信研究機構の測定値を参照。

*4 株式会社 NTT ドコモの測定値を参照。

*5 総務省「地中レーダー技術に関する調査検討会」報告書（平成 29 年 3 月）を参照。

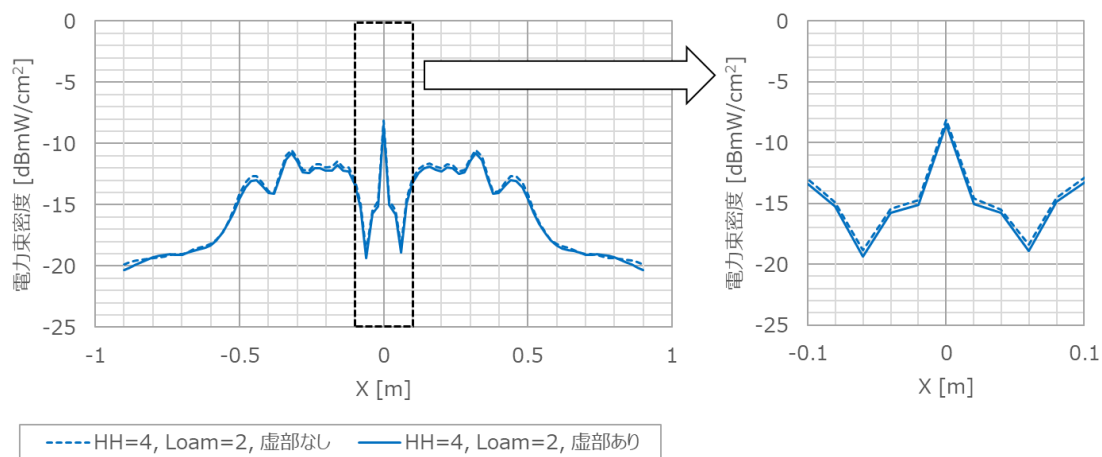


図 1 電力束密度の空間的最大値の数値解析例（垂直偏波、4.5GHz 帯、H₁₋₆、HH=4、Loam=2）

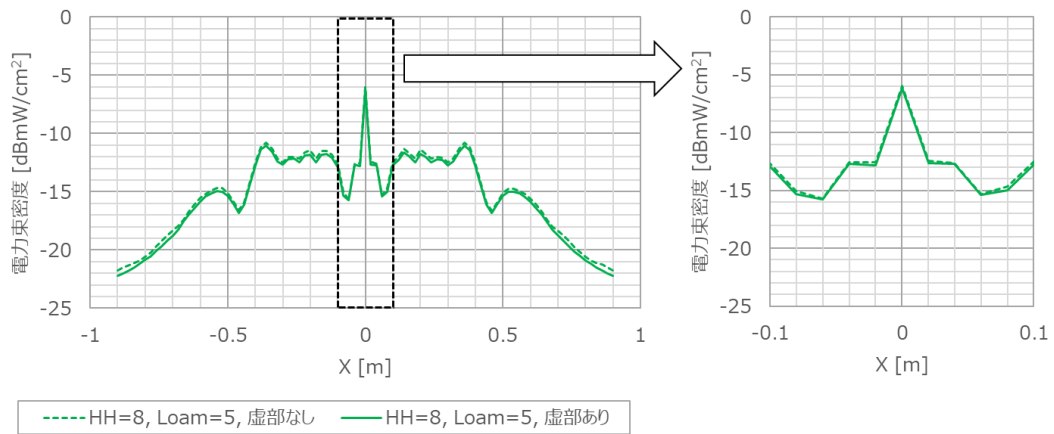


図2 電力束密度の空間的最大値の数値解析例（垂直偏波、4.5GHz 帯、 H_{1-6} 、HH=8、Loam=5）

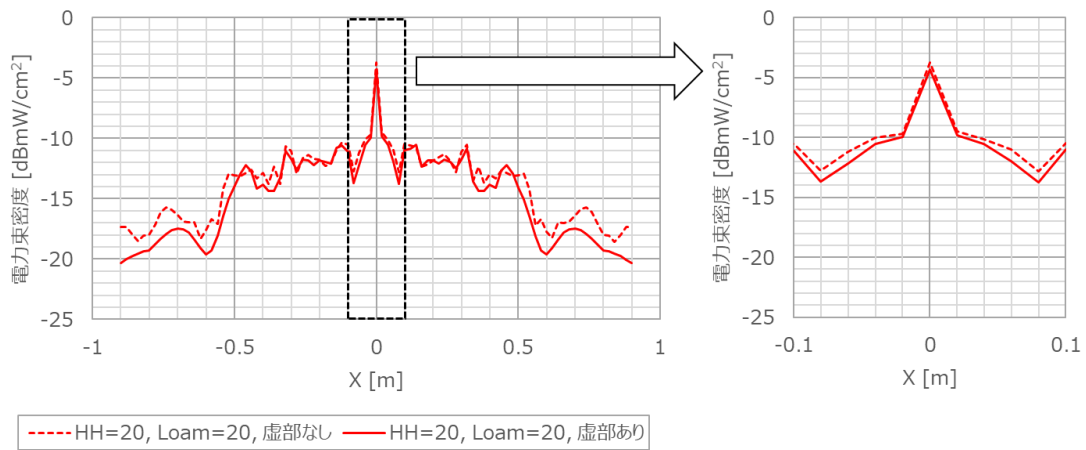


図3 電力束密度の空間的最大値の数値解析例（垂直偏波、4.5GHz 帯、 H_{1-6} 、HH=20、Loam=20）

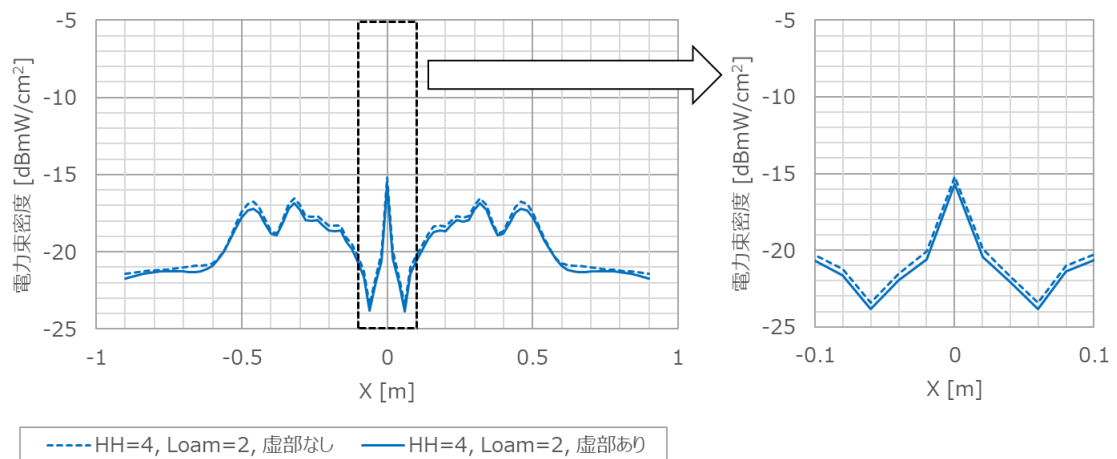


図4 電力束密度の空間的平均値の数値解析例（垂直偏波、4.5GHz 帯、 H_{1-6} 、HH=4、Loam=2）

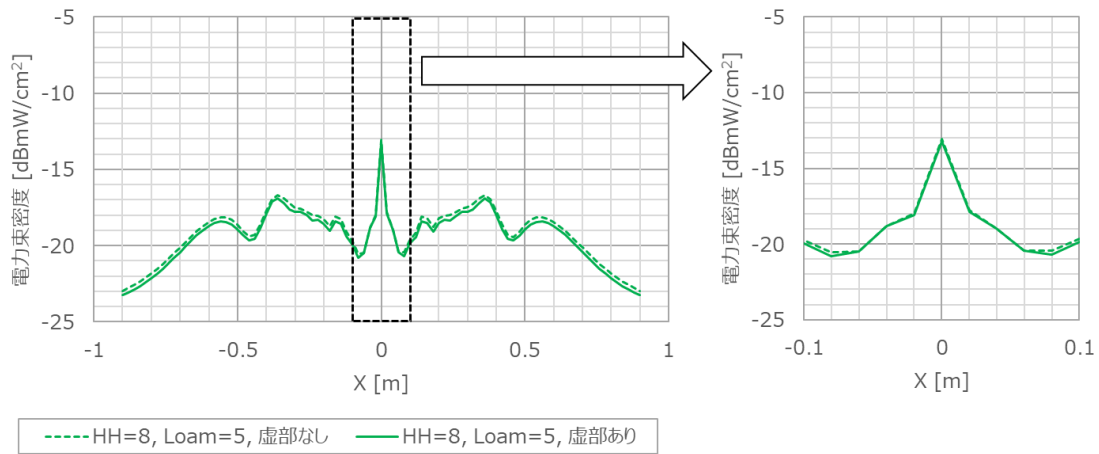


図5 電力束密度の空間的平均値の数値解析例（垂直偏波、4.5GHz帯、 H_{1-6} 、HH=8、Loam=5）

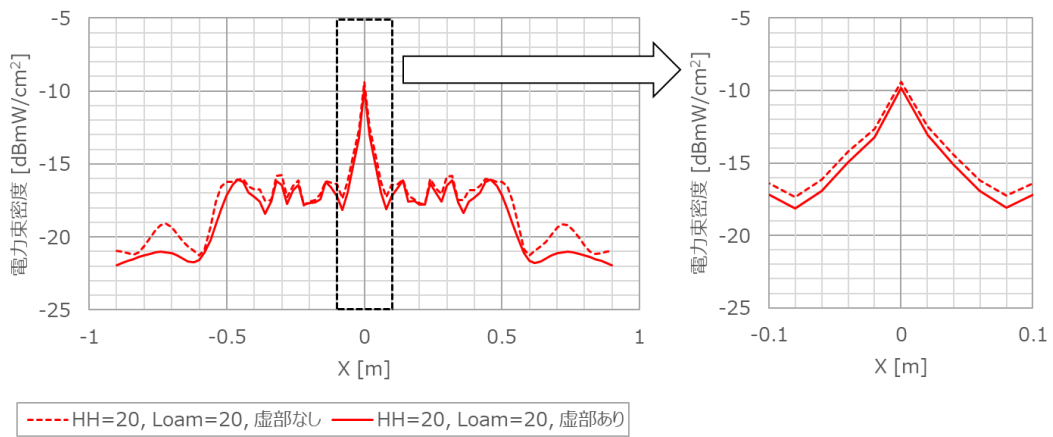


図6 電力束密度の空間的平均値の数値解析例（垂直偏波、4.5GHz帯、 H_{1-6} 、HH=20、Loam=20）

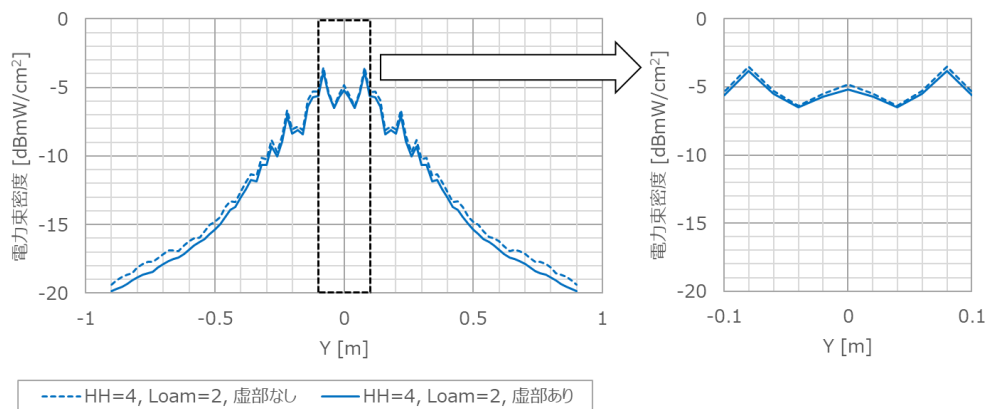


図7 電力束密度の空間的最大値の数値解析例（水平偏波、4.5GHz帯、 H_{1-6} 、HH=4、Loam=2）

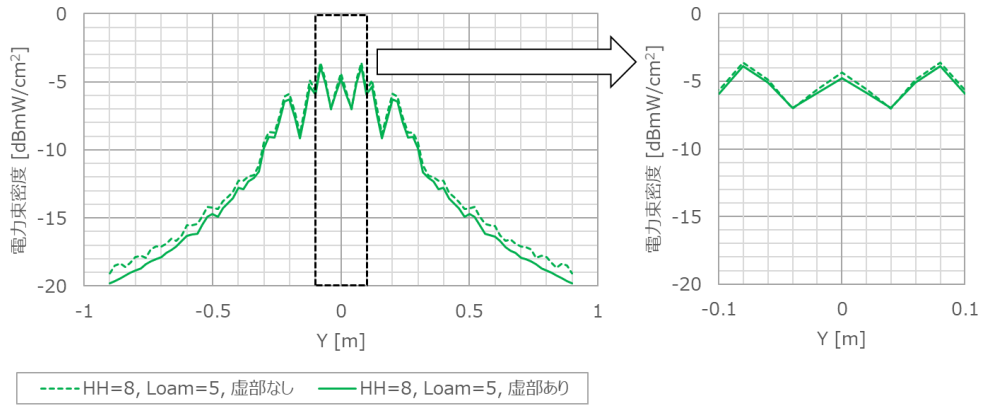


図 8 電力束密度の空間的 maximum 値の数値解析例（水平偏波、4.5GHz 帯、 H_{1-6} 、HH=8、Loam=5）

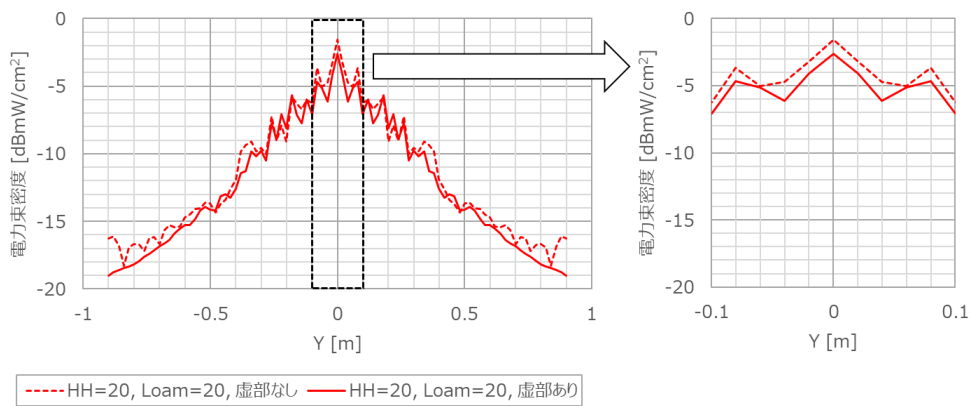


図 9 電力束密度の空間的 maximum 値の数値解析例（水平偏波、4.5GHz 帯、 H_{1-6} 、HH=20、Loam=20）

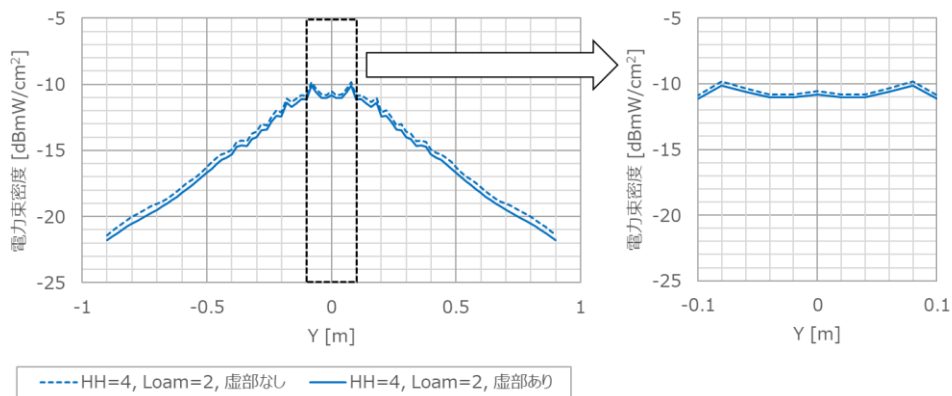


図 10 電力束密度の空間的 average 値の数値解析例（水平偏波、4.5GHz 帯、 H_{1-6} 、HH=4、Loam=2）

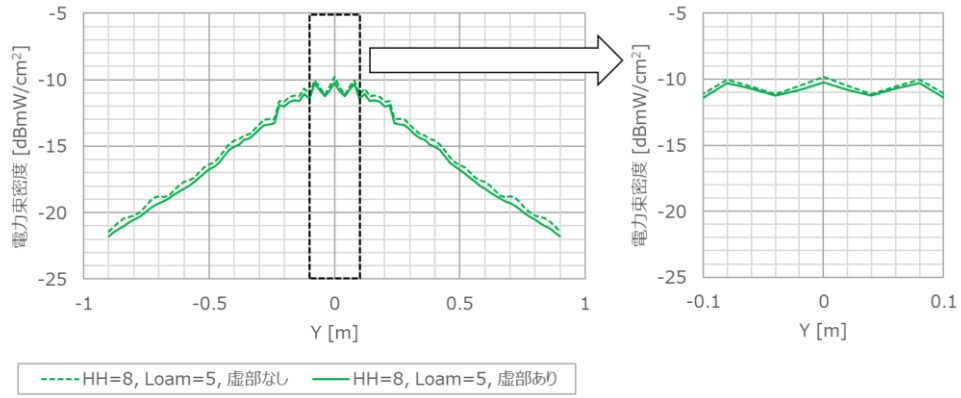


図 1 1 電力束密度の空間的平均値の数値解析例（水平偏波、4.5GHz 帯、 H_{1-6} 、HH=8、Loam=5）

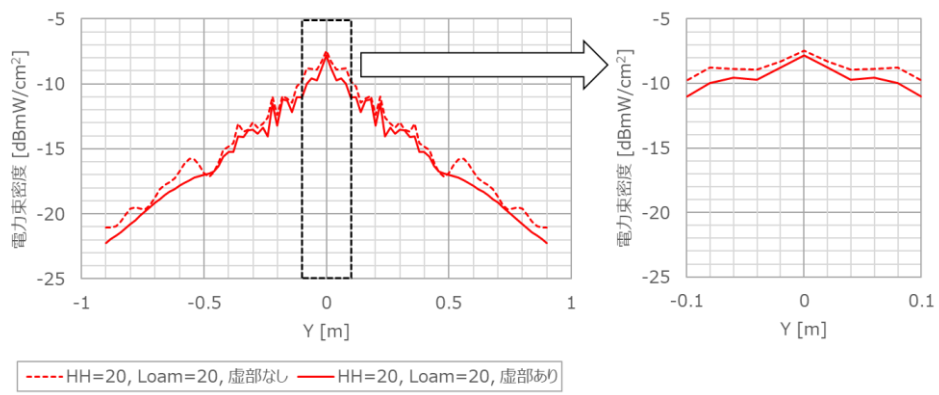


図 1 2 電力束密度の空間的平均値の数値解析例（水平偏波、4.5GHz 帯、 H_{1-6} 、HH=20、Loam=20）

参考資料3 FDTD 法を用いた電磁界解析の拡張不確かさの導出

不確かさの要因のうち影響が大きいと考えられる要素として、以下の表に示す項目を抽出した。

表1 本検討で考慮した不確かさの要素

不確かさの要素	内容
収束条件	電磁界解析の解析時間に関する要素であり、一般に、この値が小さいほど電磁界の振る舞いが十分に定常的な状態まで進行し、より正確な電磁界解析結果が得られる。
各誘電体内のセルサイズ	電磁界解析のセルの細かさに関する要素であり、一般に、この値が小さいほどより正確な電磁界解析結果が得られる。ここでは、誘電体内の最小波長に対するセルサイズについて検討する。
Perfect Matched Layer (PML)の層数	有限の電磁界解析空間において、無限に近い現実空間を再現するに当たっての課題である電磁界解析空間の端(境界)からの反射量に関する要素であり、一般に、これらの値が大きいほど数値解析空間の端からの反射量が小さくなり、より正確な電磁界解析結果が得られる。
地下モデル端までの水平距離	
地下モデル端までの垂直距離	

2. 3. 1節に示した検討モデル及び参考資料2に示した電磁界解析条件を基本とし、不確かさの要素を変化させ、各値に対する電力束密度の比(空間的最大値の比及び空間的平均値の比)を算出した。各要素の変化量を下表に示す。

表2 各要素の変化量

不確かさの要素	変化量
収束条件	-40 dB から-60 dB
各誘電体内のセルサイズ	誘電体内の最小波長に対して 1/10 以下から 1/10.5 以下
Perfect Matched Layer(PML)の層数	7 から 28
地下モデル端までの水平距離	波源を起点とし、1000 mm から 1100 mm
地下モデル端までの垂直距離	ハンドホール下端を起点とし、740 mm から 840 mm

不確かさの評価については、電磁界解析の計算量低減を目的に、電磁界解析条件を限定して実施した。

評価対象の条件は、最終的に求めるべき電力束密度の空間的最大値の比の最大値又は空間的平均値の比の最大値への影響が想定される条件とし、2. 3. 3節の図2-20から図2-23までの結果に基づき、周波数は 4.5GHz 帯、偏波は垂直偏波及び水平偏波、電力束密度の比は空間的最大値の比とした。また、この条件において、電力束密度の空間的最大値の比の最大値が得られた

比誘電率は、Cover=2.6、HH=20、Loam=20 (AC=5、CS=7 は固定値)であったことから、比誘電率はこの条件とした。

次に、ある要素の値を変化させた場合の電力束密度の比の標本標準偏差 s を以下の式で算出した。

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{avg}})^2}$$

ここで、 x_i はある要素の i 番目の値における電力束密度の比、 n はある要素の変化させた値の数、 x_{avg} はある要素の値を変化させた場合の電力束密度の比の平均値である。

さらに、ある要素の値を変化させた場合の電力束密度の比の標準不確かさ u を以下の式で算出した。

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

各要素の値を変化させた場合の電力束密度の比の標準不確かさから、電力束密度の比の合成標準不確かさ u_c を以下の式により算出した。

$$u_c = \sqrt{\sum_{j=1}^m (c_j u_j)^2}$$

ここで、 c_j は j 番目の要素に対する感度係数(この場合は、全て 1)、 u_j は j 番目の要素に対する標準不確かさ、 m は考慮した不確かさ要素の数である。

電力束密度の比の合成標準不確かさから、電力束密度の比の拡張不確かさ U を以下の式で算出した。

$$U = k u_c$$

ここで、 k は包含係数であり、 $k=2$ として算出した。 $k=2$ の場合、拡張不確かさの範囲に真の値が存在する可能性は約 95%となる。

得られた拡張不確かさは、水平偏波より垂直偏波の方が大きく、「0.526dB」であった。拡張不確かさの導出過程の例として、垂直偏波における導出過程の値について、下表に示す。

表3 拡張不確かさ及び導出過程の例(垂直偏波)

不確かさの要素	単位	c_j	u_j	$c_j^2 u_j^2$
収束検出	dB	1	0.00173	2.98×10^{-6}
各誘電体内のセルサイズ	dB	1	0.250	6.26×10^{-2}
Perfect Matched Layer(PML)の層数	dB	1	0.0000707	4.99×10^{-9}
地下モデル端までの水平距離	dB	1	0.000283	8.02×10^{-8}
地下モデル端までの垂直距離	dB	1	0.0815	6.64×10^{-3}
合成標準不確かさ: u_c				0.263
包含係数: k				2
拡張不確かさ: U				0.526

本検討では、ここで得られた拡張不確かさ「0.526dB」を全ての電磁界解析条件に適用して考慮することとした。

参考資料4 全計算条件における電力束密度の空間的最大値の比の最大値及び空間的平均値の比の最大値の一覧

表1 全計算条件における電力束密度の空間的最大値の比の最大値及び空間的平均値の比の最大値

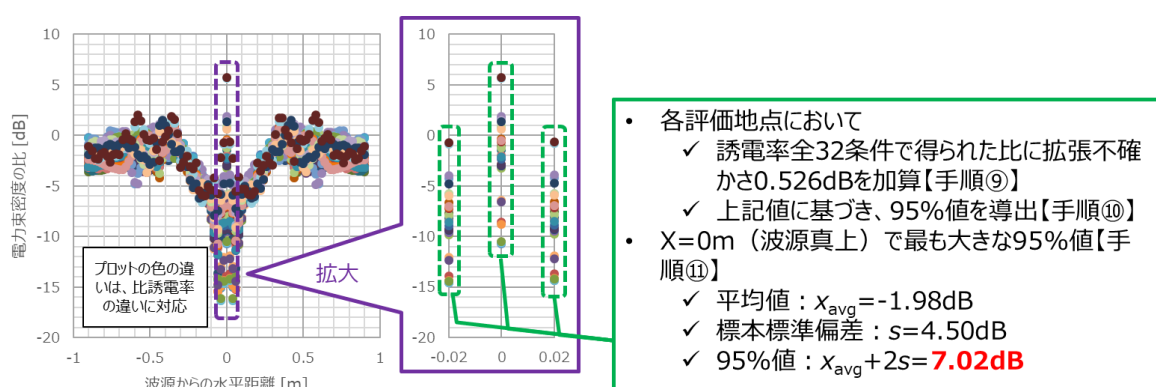
周波数帯	周波数 [MHz]	空間的最大値の比の最大値 [dB]		空間的平均値の比の最大値 [dB]	
		垂直偏波	水平偏波	垂直偏波	水平偏波
700MHz 帯	788	-1.32	4.43	-3.18	3.85
800MHz 帯	875	0.32	4.08	-2.17	3.33
1.5GHz 帯	1493.4	0.83	3.45	-1.31	2.90
1.7GHz 帯	1842.5	-0.78	4.52	-1.46	3.59
2GHz 帯	2140	2.95	4.48	0.34	3.12
3.5GHz 帯	3540	4.57	4.58	0.17	2.56
3.7GHz 帯	3850	4.65	3.95	2.72	3.73
	4050	3.80	3.98	0.31	2.98
4.5GHz 帯	4550	5.71	6.23	3.64	4.16

参考資料5 拡張不確かさを考慮した全計算条件における電力束密度の空間的最大値の比の95%値の算出方法

拡張不確かさを考慮した全計算条件における電力束密度の空間的最大値の比の95%値の最大値及び空間的平均値の比の95%値の最大値の一覧を下表に示す。また、これらのうち、最も大きな値が得られた条件（4.5GHz帯、垂直偏波、空間的最大値の比）を例として、2.3.3節の手順⑨から手順⑪までの補足説明を下図に示す。

表1 拡張不確かさを考慮した全計算条件における電力束密度の空間的最大値の比の95%値の最大値及び空間的平均値の比の95%値の最大値

周波数帯	周波数 [MHz]	空間的最大値の比の 95%値の最大値 [dB]		空間的平均値の比の 95%値の最大値 [dB]	
		垂直偏波	水平偏波	垂直偏波	水平偏波
700MHz帯	788	-0.73	5.77	-1.13	5.13
800MHz帯	875	1.03	4.68	-1.06	3.83
1.5GHz帯	1493.4	2.18	4.20	-0.30	3.53
1.7GHz帯	1842.5	0.86	4.67	-0.25	4.18
2GHz帯	2140	3.60	6.23	0.98	4.49
3.5GHz帯	3540	4.91	4.58	2.55	3.39
3.7GHz帯	3850	5.03	5.52	3.71	3.61
	4050	3.96	4.74	0.65	3.39
4.5GHz帯	4550	7.02	5.36	5.27	3.90



最も大きな95%値が得られた条件の電力束密度の比

※ 空間的最大値、4.5GHz帯、垂直偏波、 H_{1-9} 、X方向

出典 基地局等評価方法作業班（第6回）資料より

図1 拡張不確かさを考慮した95%値の最大値が得られた条件（4.5GHz帯、垂直偏波、空間的最大値の比）における2.3.3節の手順⑨から手順⑪までの補足説明

参考資料6 SAR に関する検討モデルの数値解析条件

(1) 平面波ばく露評価

解析条件

解析手法	FDTD 法
セルサイズ	1 mm (1GHz 未満) 0.5 mm (1GHz 以上)
電気定数 (数値人体モデル)	文献値 *1 を参照
吸収境界	PML 8 層

(2) 地中埋設型基地局ばく露評価

解析条件

解析手法	FDTD 法
セルサイズ	1 mm
地下構造物	H ₁₋₆ 相当
波源	半波長ダイポールアンテナ (垂直偏波)
波源配置位置	アンテナ端が地上面から 10 cm 下方かつ給電点がハンドホール水平面の中心
電気定数 (数値人体モデル)	文献値*1 を参照
電気定数 (地下構造物等)	HH: 比誘電率 2.8、導電率 0.001~0.005 [S/m] Cover: 比誘電率 2.6、導電率 0.001~0.006 [S/m] (HH 及び Cover に係る電気定数は NICT による実測値) AC: 比誘電率 5 (参考資料 2 の通常想定値) GS: 比誘電率 7 (参考資料 2 の通常想定値) Loam: 比誘電率 10 (参考資料 2 の通常想定値)
吸収境界	PML 8 層
解析領域	大地面 : 160 cm x 160 cm

*1 <https://www.fcc.gov/general/body-tissue-dielectric-parameters>

参考資料7 地中埋設型基地局の空中線入力電力の最大値

第2章で得られた算出式に基づいて計算を行った場合における、地中埋設型基地局の空中線入力電力の最大値を算出する。

第2章の検討結果から、電力束密度 S [mW/cm^2] は次式により求められる。

$$S = \frac{PG}{40\pi R^2} \times 6$$

ただし、 P は空中線入力電力 [W]、 G は送信空中線の最大輻射方向における絶対利得を電力比率で表したものの、 R は算出に係る送信空中線と算出を行う地点との距離 [m] である。

(1) 電力束密度の空間的最大値

電磁界強度指針より、電力束密度の空間的最大値は、300MHz を超え 1GHz 以下の周波数では $4[\text{mW}/\text{cm}^2]$ に、1GHz を超え 300GHz 以下の周波数では $2[\text{mW}/\text{cm}^2]$ に、それぞれ制限されることから、最大でも $4[\text{mW}/\text{cm}^2]$ となる。

電力束密度は、評価地点が送信空中線に最も近づいたときに最大となる。このとき、送信空中線から大地面までの距離が $0.1[\text{m}]$ 、大地面から評価地点までの距離が $0.1[\text{m}]$ であることから、送信空中線から評価地点までの距離 R は $0.2[\text{m}]$ となる。このとき、実効輻射電力 PG は、以下のとおり制限される。

$$PG = S \times \frac{40\pi R^2}{6}$$

S が $4[\text{mW}/\text{cm}^2]$ 、 R が $0.2[\text{m}]$ のとき、 PG は $3.35[\text{W}]$ となることから、送信空中線として半波長ダイポールアンテナを用いた場合には、空中線入力電力の最大値は $2.04[\text{W}]$ になる。

(2) 電力束密度の空間的平均値

電磁界強度指針より、電力束密度の空間的平均値は、300MHz を超え 1.5GHz 以下の周波数では $f/1500$ (f は MHz を単位とする周波数) [mW/cm^2] に、1.5GHz を超え 300GHz 以下の周波数では $1[\text{mW}/\text{cm}^2]$ に、それぞれ制限されることから、最大でも $1[\text{mW}/\text{cm}^2]$ となる。

電力束密度の空間的平均値は、大地面より $0.1[\text{m}]$ の高さから $0.7[\text{m}]$ の高さまでの空間で $0.1[\text{m}]$ 刻みの 8 つの評価地点における電力束密度の平均によって求められる。送信空中線から大地面までの距離が $0.1[\text{m}]$ であることから、電力束密度の空間的平均値は、 R が $0.2[\text{m}]$ 、 $0.3[\text{m}]$ 、 $0.4[\text{m}]$ 、 $0.5[\text{m}]$ 、 $0.6[\text{m}]$ 、 $0.7[\text{m}]$ 、 $0.8[\text{m}]$ の場合の電力束密度の平均によって求められ、 $0.36 PG[\text{mW}/\text{cm}^2]$ となる。これが $1[\text{mW}/\text{cm}^2]$ 以下に制限されることから、実効輻射電力 PG は $2.78[\text{W}]$ となり、送信空中線として半波長ダイポールアンテナを用いた場合には、空中線入力電力の最大値は $1.69[\text{W}]$ になる。

一方で、第3章の SAR 評価の結果より、局所吸収指針を超えない空中線入力電力の最大値は 10W であったことから、第2章で得られた算出式を用いた場合には、SAR の基準値を用いた評価に対し約 6 倍の付加的安全率を考慮できていることが確認できる。