

電波産業会（ARIB） 規格会議 第38作業班 携帯電話基地局周辺の適合性評価法Ad-hocにおける 地中埋設型基地局ばく露評価法の検討状況について

（一社）電波産業会 規格会議 第38作業班
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）

- 第1回（令和2年1月28日）
 - ・ 地中埋設型基地局のばく露評価における課題
 - ・ 検討方針
- 第2回（令和2年2月27日）
 - ・ 報告なし
- 第3回（令和2年4月2日）
 - ・ 数値解析検討状況（700MHz帯～3.5GHz帯）
- 第4回（令和2年6月19日）
 - ・ 数値解析検討状況（700MHz帯～4.5GHz帯、吸収境界条件見直し）
 - ・ 地中埋設型基地局向け空間的最大値・平均値の算出範囲の提案
- 第5回（令和2年8月27日）
 - ・ 数値解析検討状況（700MHz帯～4.5GHz帯、地下構成パターン追加）
- **第6回（今回）**
 - ・ **まとめ**
 - ✓ **（参考）第5回までの報告分に対する追加内容**
 - **数値解析検討結果（0.7～4.5GHz帯の地下構成追加パターン未了分及び3.7GHz帯追加）**
 - **数値解析不確かさ分析結果**
 - **地中埋設型基地局向け算出式の提案**

※「携帯電話基地局周辺の適合性評価法Ad-hoc」については、「基地局Ad-hoc」と示す。

■ 設置・エリア

- 地中に設置し、地上の通信サービスエリアを構築
- 景観に配慮した設置、スポット的なエリア対策が可能

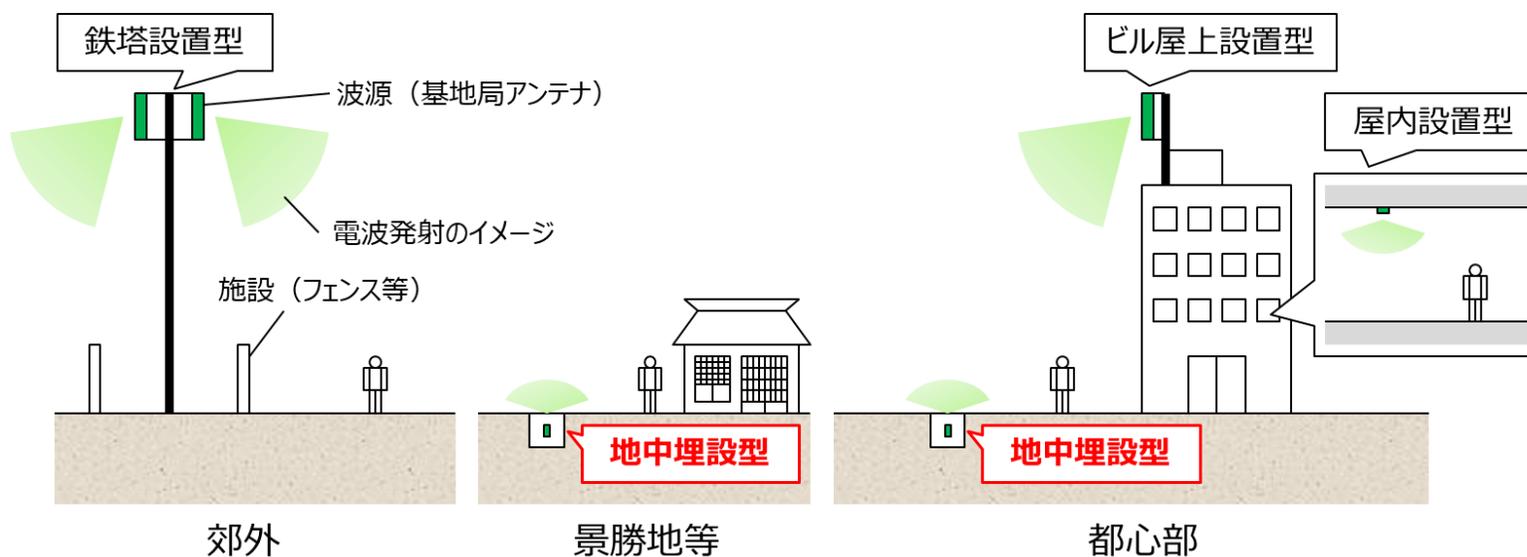
■ 構造

- 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等）内部に波源（基地局アンテナ）を設置
- 電波透過性と強度確保のため、蓋素材は、樹脂等を使用

■ 電波ばく露

- 地中から空中に向けて電波発射

※ 基地局例については
付録1参照



基地局からの電波発射状況のイメージ

第1回作業班資料（基地局Ad-hoc）より抜粋

基地局電波ばく露量の基準値への適合確認方法（現行）

■ 関連法令

- 電波法施行規則第21条の3
- 平成11年郵政省告示第300号
- 平成29年総務省告示第309号

■ 補足資料

- 電波防護のための基準へ適合確認の手引き（総務省）（以下、手引き）

| 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) |
|-------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------------|
| 100kHzを越え3MHz以下 | 275 | 2.18f ¹ | - |
| 3MHzを越え30MHz以下 | 824f ¹ | 2.18f ¹ | - |
| 30MHzを越え300MHz以下 | 27.5 | 0.0728 | 0.2 |
| 300MHzを越え1.5GHz以下 | 1.585f ^{1/2} | f ^{1/2} /237.8 | f/1500 |
| 1.5GHzを越え300GHz以下 | 61.4 | 0.163 | 1 |

電波法施行規則 別表第2号の3の2 電波の強度の値の表（第21条の3関係）より抜粋

| 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] |
|-------------------|-----------------------|-------------------------|--|--|
| 100kHzを越え3MHz以下 | 275 | 2.18f ⁻¹ | | |
| 3MHzを越え30MHz以下 | 824f ⁻¹ | 2.18f ⁻¹ | | |
| 30MHzを越え300MHz以下 | 27.5 | 0.0728 | 0.2 | |
| 300MHzを越え1GHz以下 | 1.585f ^{1/2} | f ^{1/2} /237.8 | f/1500 | 4 |
| 1GHzを越え1.5GHz以下 | 1.585f ^{1/2} | f ^{1/2} /237.8 | f/1500 | 2 |
| 1.5GHzを越え300GHz以下 | 61.4 | 0.163 | 1 | 2 |

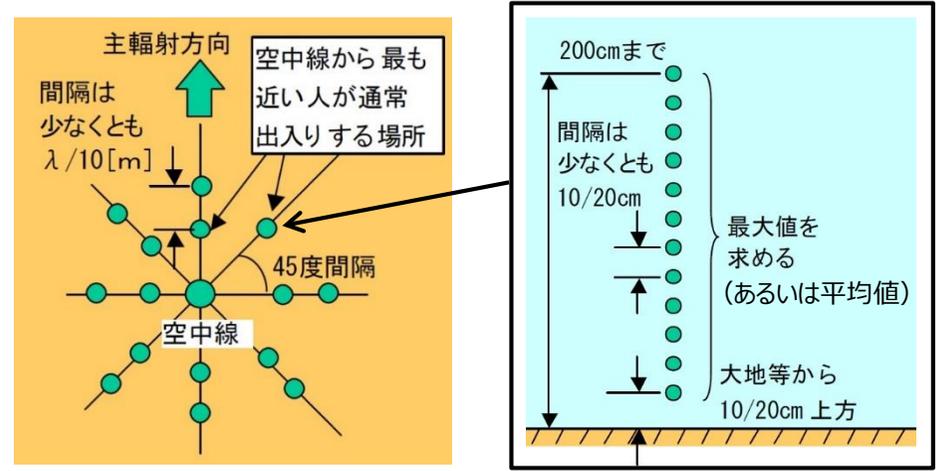
平成29年総務省告示第309号 表1（人体が電波に不均一にばく露される場合の電波の強度の値）より抜粋

- ✓ fはMHzを単位とする周波数
- ✓ 値は6分間における平均値



適合確認手順

水平面内の各点で、
垂直面内の空間的最大値（平均値）を算出



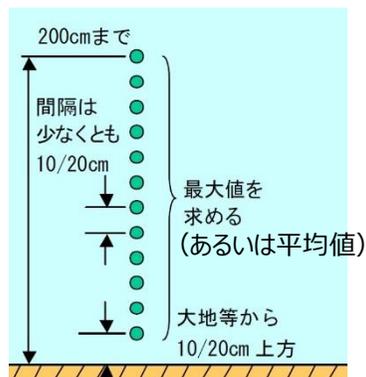
水平面内の評価点

垂直面内の評価点

手引きより抜粋

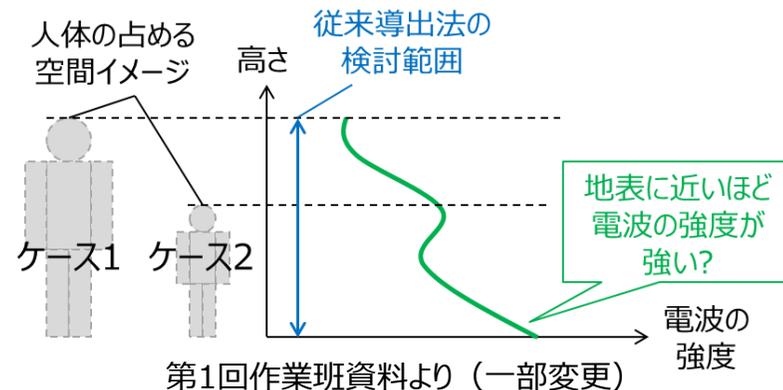
電波の強度を適切に評価可能な適合確認方法の確保

■ 課題①：空間評価領域（⇒計算及び測定法関連）



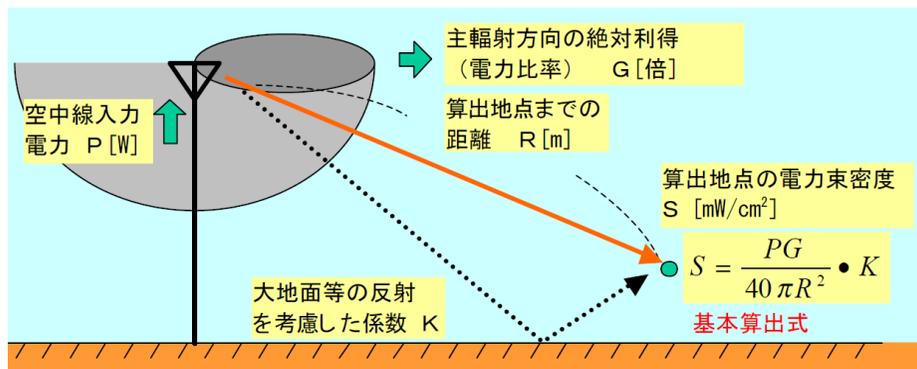
垂直面内の評価点

手引きより抜粋



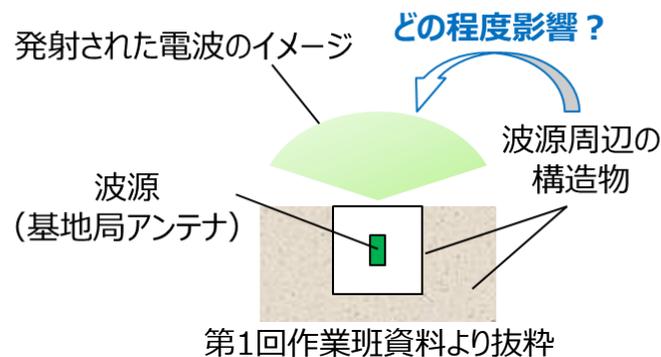
従来の空間評価領域は妥当か

■ 課題②：基本算出式（及び指向性を考慮した基本算出式）（⇒計算法関連）



基本算出式

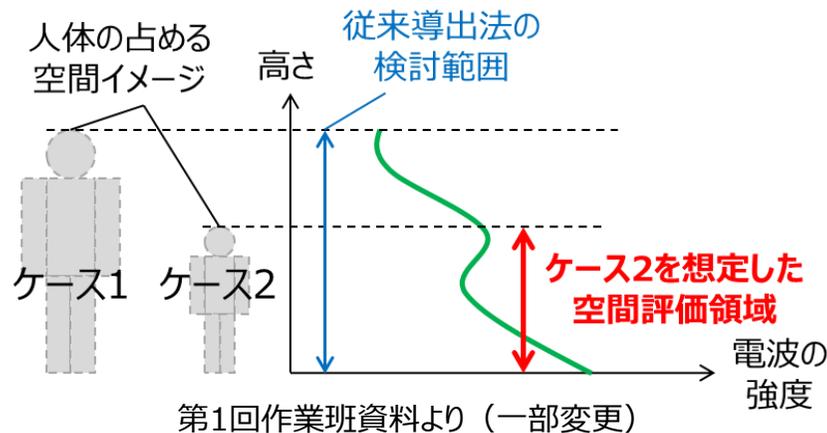
手引きより抜粋



算出式に、周辺構造物（ハンドホールや土など）の影響をどのように反映するか

■ 課題①：空間評価領域

- 地中埋設型基地局に**特化した空間評価領域**の導入
 - 垂直面内において、**高さ70cm**までの空間評価領域の導入
 - ※ 一般に歩行可能となる1歳児の平均身長*1を参照した領域設定



■ 課題②：基本算出式

- 地中埋設型基地局に**特化した基本算出式**（及び指向性を考慮した基本算出式）の導入
 - 波源周辺の構造物の影響を考慮した**係数A**の導入

$$S_0 = \frac{PG}{40\pi R^2} \cdot A$$

$$S_1 = S_0 \cdot D_\theta$$

S_0, S_1 [mW/cm²] : 電力密度
 P [W] : アンテナ入力
 G : アンテナ絶対利得
 R [m] : 波源と評価地点との距離
A : 係数
 D_θ : 指向性減衰量

大地面等の反射係数Kの削除理由

- 周辺構造物の反射は係数Aに含まれている
- 波源は地中に設置される

*1 乳幼児身体発育調査、厚生労働省、平成22年 (<https://www.mhlw.go.jp/toukei/list/73-22b.html#gaiyou>)

■ 検討範囲

- 地中埋設型基地局に特化
 - 周波数帯：700MHz~4.5GHz
 - アンテナ設置：アンテナ最上部が地表の10cm以下となるような設置
 - 従来基地局と同様に、電磁界強度指針及び補助指針を適用するための前提条件と認識（⇒付録2参照）
 - アンテナ偏波：垂直及び水平
 - ハンドホールの構造； H_{1-6} （内部空隙高600mm）^{*1}及び H_{1-9} （同900mm）^{*1}相当

■ 検討手段

- 数値解析（FDTD法^{*2}）を用いた電磁界計算
 - **課題①：空間評価領域**
 - 電力束密度の空間的最大値及び平均値について、高さ範囲を変化して比較
⇒ **空間評価領域を2mより短くする必要はあるか？**
 - **課題②：基本算出式**
 - 電力束密度の空間的最大値及び平均値について、基本算出式から求めたものと比較
⇒ **係数Aの値は？**

*1 国土交通省大臣官房官庁営繕部設備・環境課，“公共建築設備工事標準図（電気設備工事編）平成31年版,” 国営設第188号, 平成31年3月20日.

*2 有限差分時間領域法（Finite-Difference Time-Domain）で、電磁界解析に広く用いられている方法

検討モデルと条件

| | | |
|--|--------|---|
| 周波数帯 [GHz] | | 0.7, 0.8, 1.5, 1.7, 2, 3.5, 3.7 , 4.5 |
| アンテナ | 種類 | 半波長ダイポールアンテナ |
| | 実効放射電力 | 数値解析後、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0.1m |
| ハンドホール (以下、HH) | 構成 | H ₁₋₆ 、H ₁₋₉ 相当 (市販モデル参照*1) |
| | 素材 | コンクリート相当 |
| HH蓋 (以下、Cover) | 構成 | H ₁₋₆ 、H ₁₋₉ 相当 (市販モデル参照*1) |
| | 素材 | FRP相当 |
| HH周辺の地下構造 | 素材 | アスファルトコンクリート (以下、AC) 、砕石 (以下、CS) 、土壌 (以下、Loam) (乗入れ舗装アスコン35型参照*2) |
| | 構成 | 上から、AC+CS+Loam, AC+Loam+Loam, Loam+Loam+Loam |
| 環境 | | 乾燥~通常~湿潤想定 (⇒HH及び地下構造の複素比誘電率に影響) |
| 各構造体の複素比誘電率 の実部 ・ 赤字 はNICTによる実測値 ・ その他は文献参照値*3, *4 | Cover | 2.6 , 4 |
| | HH | 2, 2.8 , 4, 6, 8, 12, 20 |
| | AC | 5 |
| | CS | 7 |
| | Loam | 2, 5, 10, 20, 40 (40は、0.7及び0.8GHz帯のみに適用) |

今回追加データ

今回追加データ
(3.7GHz帯以外のH₁₋₉)

第5回作業班資料より (再編集)

※ その他の数値解析条件、数値解析モデルは付録3参照、電界分布計算例は付録4参照

*1 株式会社マンホール商会, "2018 HAND HOLE総合カタログ."

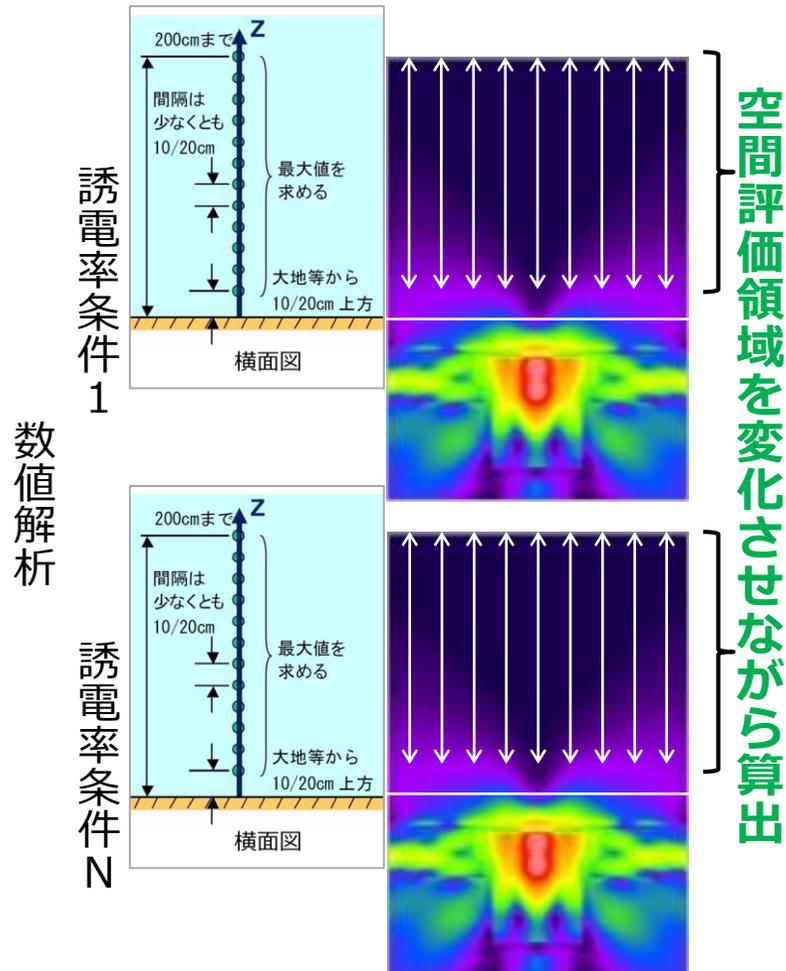
*3 "地中レーダー技術に関する調査検討会報告書," 平成29年3月.

*2 東京都建設局, "一建管内路線 歩道舗装構造図," 2019年12月.

*4 <https://www.key-t.co.jp/resources/rader-tecinfo/rader02/>

◆ Step1

数値解析で求めた電力束密度分布の各水平位置において、**空間評価領域10 cm～200 cm**の**空間的的最大値**を算出



◆ Step2

Step1で得た各水平位置における**空間的的最大値**について、

- X_{avg} ：全誘電率条件における平均値
- $X_{avg} \pm 2s$ ：全誘電率条件における95%値を算出（ s は標本標準偏差）

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

n ：誘電率条件数

x_i ：各誘電率条件の空間的的最大値

X_{avg} ：全誘電率条件の空間的的最大値の平均値

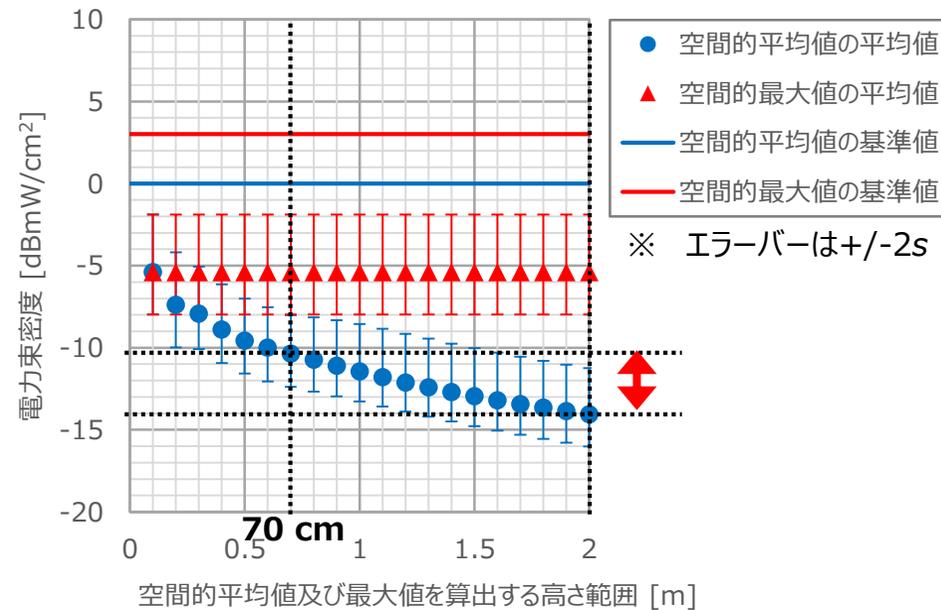
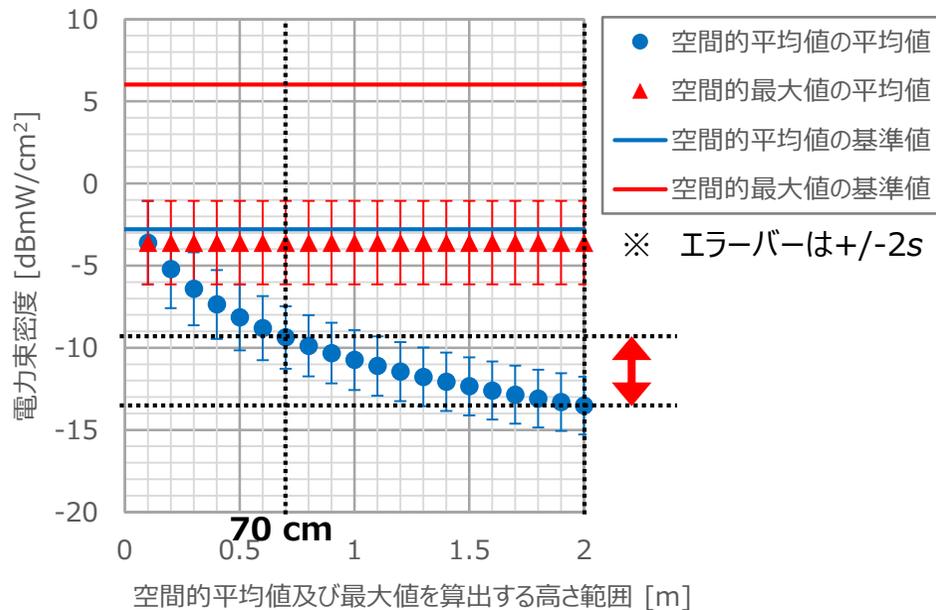
s ：全誘電率条件の空間的的最大値の標本標準偏差

◆ Step3

Step2で得られた値を、空間評価領域10 cm～200 cmで比較

※ **空間的平均値**の導出法については、空間的的最大値を空間的平均値に読み替える

課題①：空間評価領域（2）／計算結果例



H₁₋₆, AC+CS+Loam, 水平偏波, 0.7GHz帯, 波源真上

H₁₋₆, AC+CS+Loam, 水平偏波, 4.5GHz帯, 波源真上

高さ範囲を変化させた場合の空間的最大値及び平均値の計算例



空間評価領域70 cmにおける値に対する200 cmにおける値の比

| | 垂直偏波 | 水平偏波 |
|--------|-----------|-----------|
| 空間的平均値 | -4.5 dB程度 | -4.0 dB程度 |
| 空間的最大値 | 0 dB (一致) | 0 dB (一致) |

- 地中埋設型基地局において、従来の高さ200 cmまでの電力束密度の空間的平均値が、より低い高さまでの空間的平均値に比べて、小さいことを確認
- ↓
- 空間的人体ばく露量を適切に評価するためには、比較的身長の高い人を想定した空間評価領域の設定が必要
- ↓
- **垂直面内において、高さ70cmまでの空間評価領域の導入を提案**
 - 一般に歩行可能となる1歳児の平均身長^{*1}を参照した領域設定

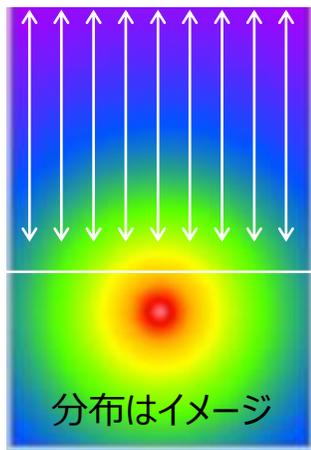
*1 乳幼児身体発育調査、厚生労働省、平成22年 (<https://www.mhlw.go.jp/toukei/list/73-22b.html#gaiyou>)

課題②：基本算出式（1）／具体的検討手段

◆ Step1

基本算出式で求めた電力束密度分布の各水平位置において、**空間評価領域70 cm**の**空間的****最大値**を算出

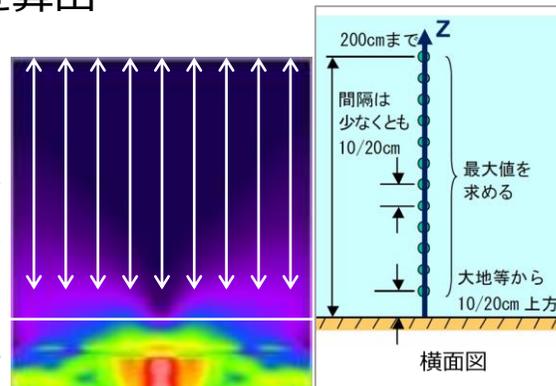
P=1 W
G=2.15 dBi
K=1



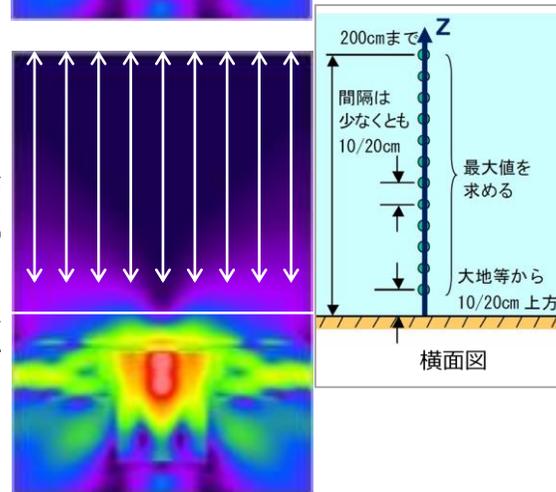
◆ Step2

数値解析で求めた電力束密度分布の各水平位置において、**空間評価領域70 cm**の**空間的****最大値**を算出

誘電率条件 1
数値解析



誘電率条件 N



◆ Step3

各水平位置におけるStep1及び2で得た値の比（**電力束密度の空間的****最大値の比**）を算出

◆ Step4

Step3より、各水平位置における全誘電率条件の**最大値**を算出

◆ Step5

Step3や4の不確かさ検討

◆ Step6

Step3と5より、各水平位置における全誘電率条件の**95%値**（ $x_{avg} + 2s$, s は標本標準偏差）を算出

標本標準偏差の式はP11と同様、変数は以下の通り

- n ：誘電率条件数
- x_i ：各誘電率条件の空間的**最大値**の比
- x_{avg} ：全誘電率条件の空間的**最大値**の比の**平均値**
- s ：全誘電率条件の空間的**最大値**の比の**標本標準偏差**

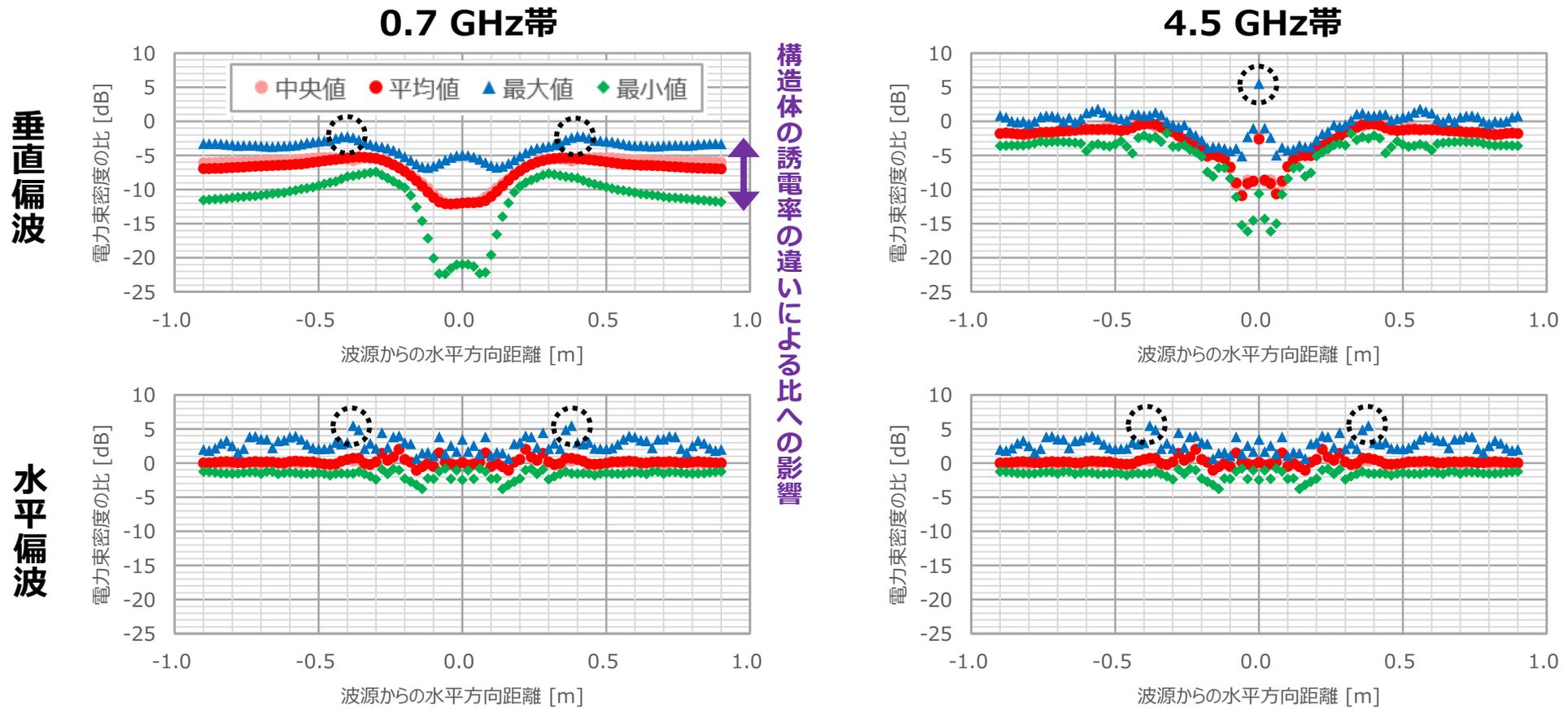
第5回作業班資料より抜粋（一部追記）

※ **空間的平均値**の導出法については、「空間的**最大値**」を「空間的**平均値**」に読み替える

※ **空間評価領域200 cm**の係数の導出法については、「70 cm」を「200 cm」に読み替える

基本算出式
自由空間

- 垂直偏波：周波数が高くなると大きくなる傾向
 - 特に、HH蓋の中心（波源真上）付近の比が大きくなる傾向
 - ⇒ 波源からHH側壁までの距離と波長との関係、回折の影響と推察される
- 水平偏波：周波数依存性は確認されない



構造体の誘電率の違いによる比への影響

H₁₋₆, AC+CS+Loam
 電力束密度の空間的最大値の比（数値解析/基本計算式）

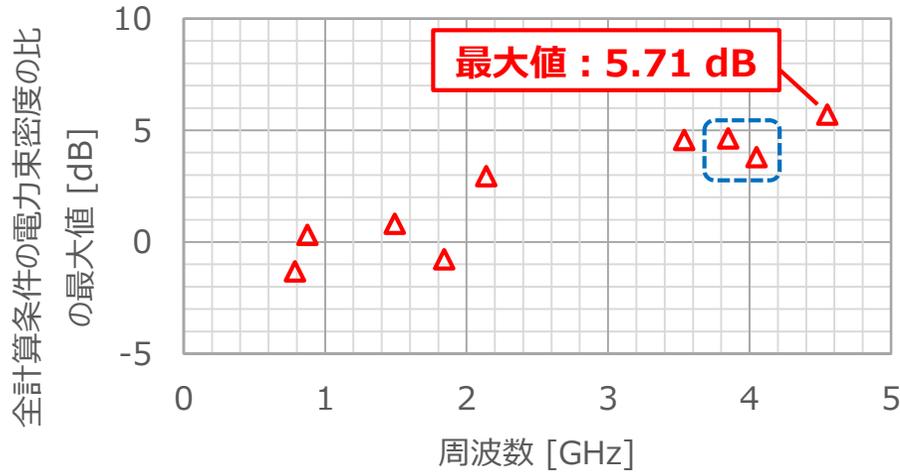
○ は各条件の最大値を示す

は今回追加データ

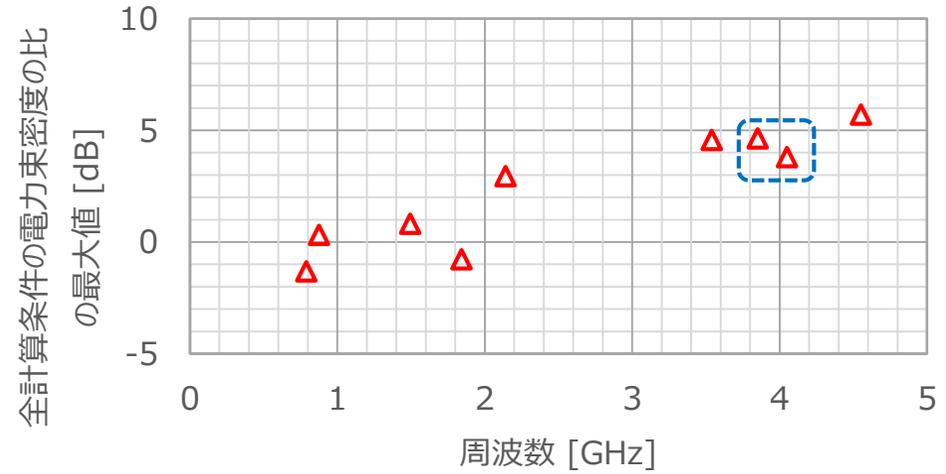
- 電力束密度の空間的最大値の比の最大値は、約6.2 dB
- 偏波、空間評価領域に依らず、値は同じ

垂直偏波

空間評価領域70 cm

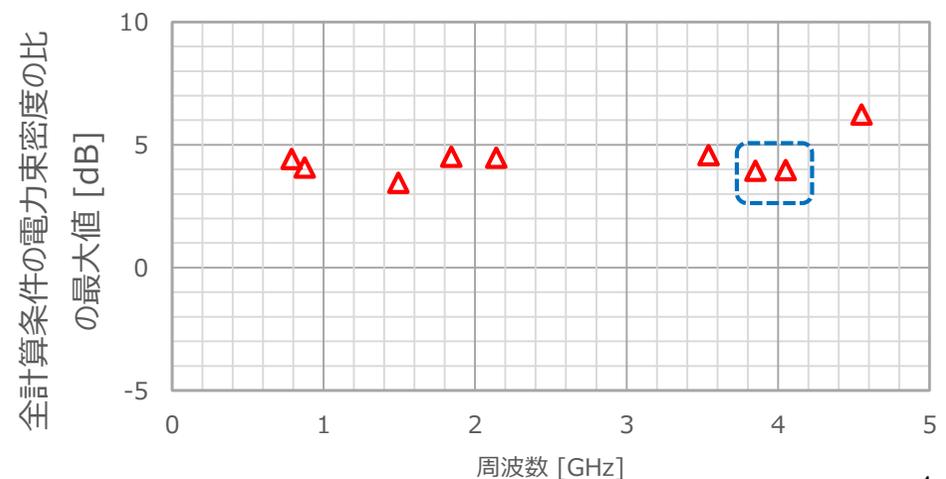
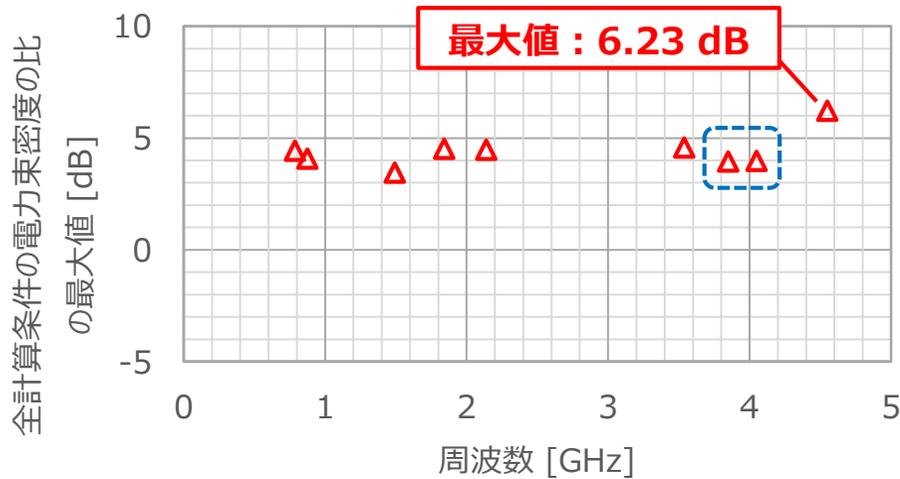


空間評価領域200 cm



水平偏波

最大値 : 6.23 dB

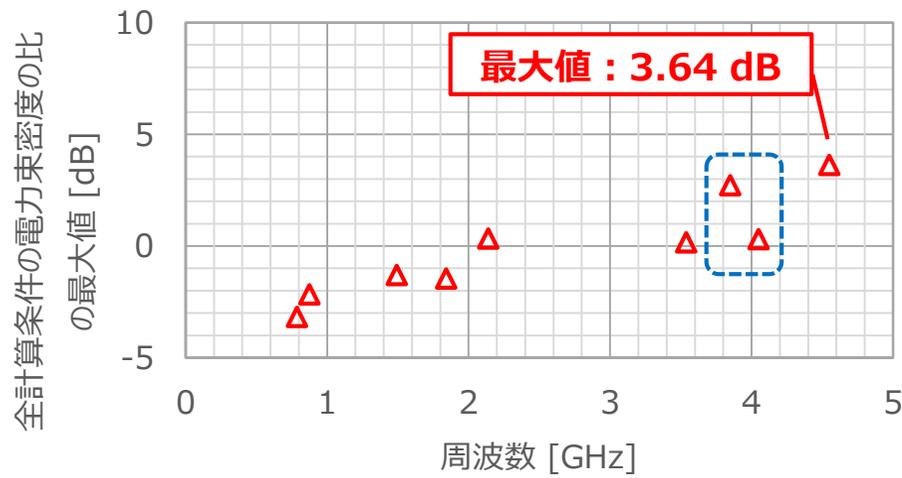


は今回追加データ

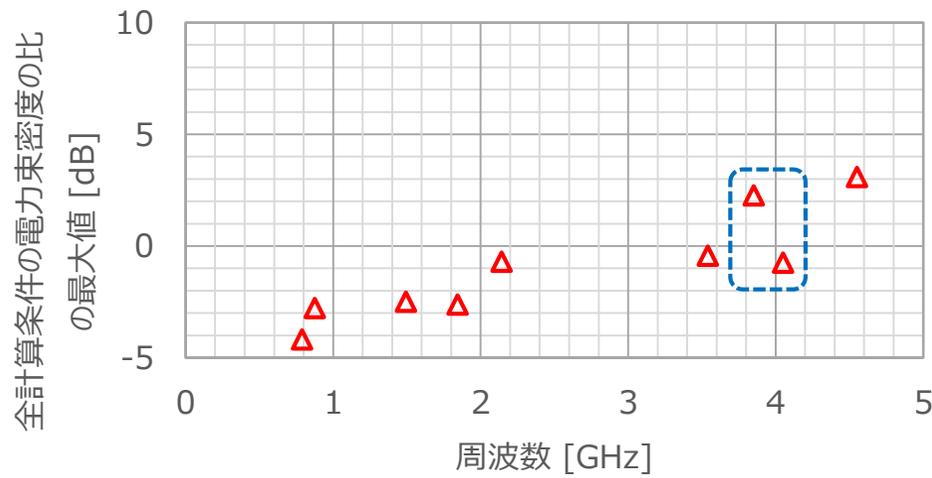
- 電力束密度の空間的平均値の比の最大値は、約4.2 dB
- 垂直偏波では空間評価領域70 cmの場合が大きい傾向、水平偏波はほぼ同様

垂直偏波

空間評価領域70 cm

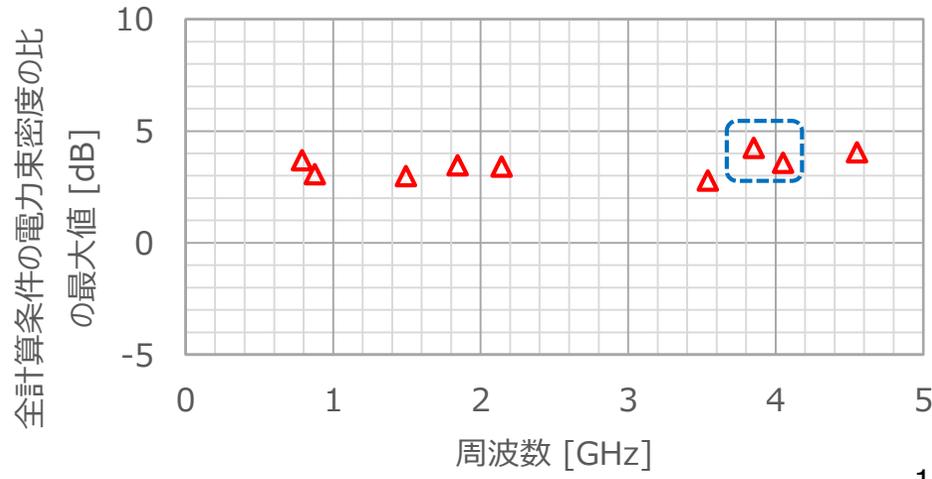
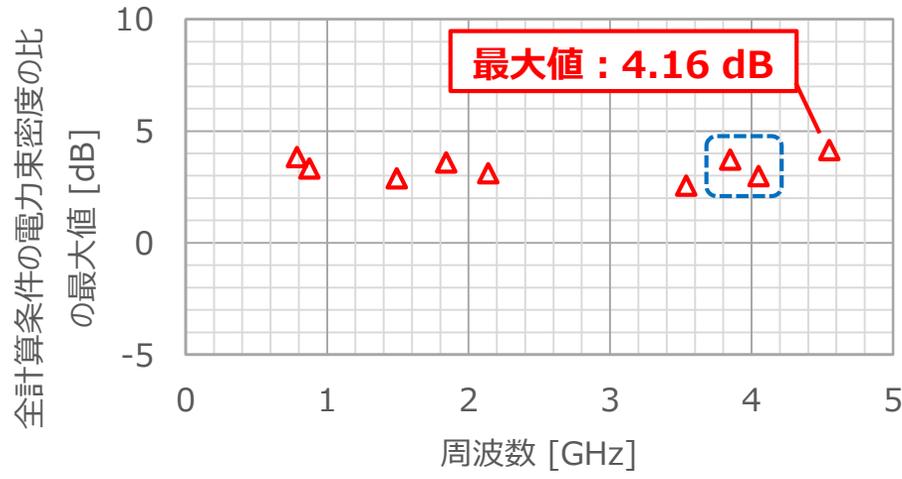


空間評価領域200 cm



水平偏波

最大値 : 4.16 dB



■ 不確かさの導出方法

- FDTD法を用いた数値計算の拡張不確かさ（ $k=2$ ）を導出した^{*1, *2, *3}
 - 評価対象：最も大きな電力束密度の比が得られた計算条件
 - ✓ 周波数：4.5GHz帯
 - ✓ 偏波：垂直及び水平
 - ✓ 電力束密度の比のベース：空間的最大値
 - ✓ 誘電率：Cover=2.6, HH=20, Loam=20
 - 考慮した不確かさ要素
 - ✓ モデリング関連（基本メッシュの大きさ、メッシュ間の最低距離）
 - ✓ 吸収境界関連（境界の層数、波源から境界までの水平・垂直方向距離）
 - ✓ 解析時間関連（収束判断の減衰量）
 - ⇒ これらを検討モデルから変化させ、電力束密度の比への影響を評価
 - 導出手順
 - 一般的な導出手順及び導出過程例は付録5参照

■ 得られた拡張不確かさ

- **±0.526dB（≒±0.53 dB）**
 - 他事例（±0.96 dB）と同等のオーダ

*1 例えば、IEC 62232, ed. 2, "Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure," IEC, Aug. 2017.

*2 例えば、<http://www.mac.or.jp/mail/181201/02.shtml>

*3 例えば、<https://unit.aist.go.jp/riem/ds-rg/uncertainty/club/club8-1.pdf>

| Model | Freq. (GHz) | wbSAR (W/kg)/(2·W) | SAR10g (W/kg)/(2·W) |
|-------|----------------|-----------------------|------------------------|
| Duke | 1.82 | 0.0045 ± 0.96 dB | 0.88 ± 0.96 dB |
| Nina | 1.82 | 0.033 ± 0.96 dB | 0.90 ± 0.96 dB |
| Duke | 2.655 | 0.0032 ± 0.96 dB | 0.63 ± 0.96 dB |
| Nina | 2.655 | 0.021 ± 0.96 dB | 0.70 ± 0.96 dB |

第3回作業班エリクソン様資料より抜粋

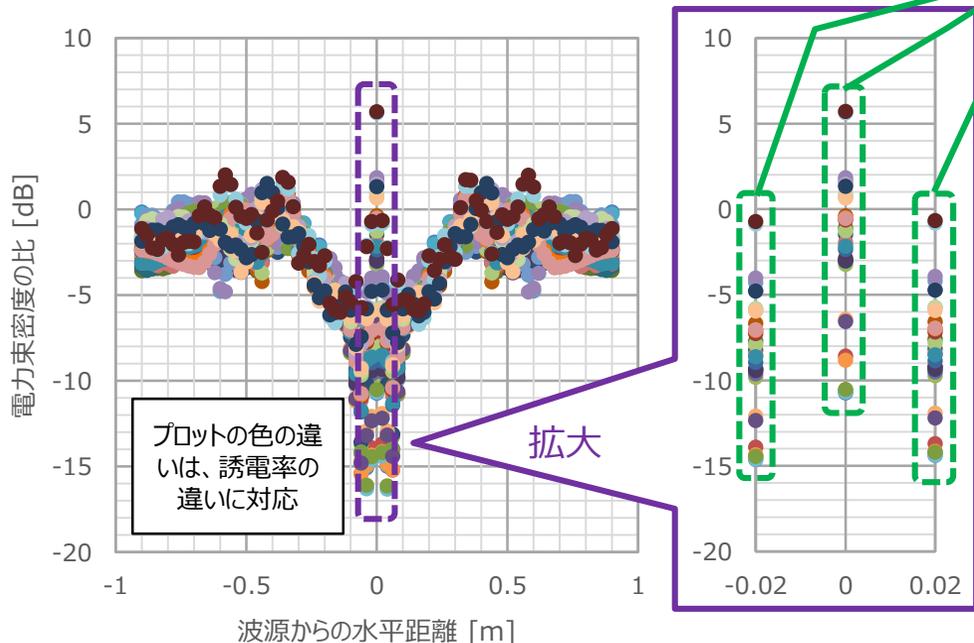
地中埋設型基地局のSAR数値解析結果例

■ 不確かさを考慮した電力束密度の比の最大値

- ✓ 垂直偏波： $5.71\text{dB}^{*1} + 0.526\text{dB} = 6.24\text{dB}$
 - ✓ 水平偏波： $6.23\text{dB}^{*1} + 0.526\text{dB} = \mathbf{6.76\text{dB}}$
- *1 P14のグラフより

■ 不確かさを考慮した電力束密度の比から求めた全誘電率条件の95%値

- 全誘電率条件の95%値を算出し、その中で最も大きな値を抽出
 - ✓ 垂直偏波：**7.02dB**
 - ✓ 水平偏波：6.23dB



- 各水平位置において
 - ✓ 誘電率全32条件で得られた比に0.526dBを加算
 - ✓ 上記値に基づき、95%値を導出
- X=0m（波源真上）で最も大きな95%値
 - ✓ 平均値： $x_{\text{avg}} = -1.98\text{dB}$
 - ✓ 標本標準偏差： $s = 4.50\text{dB}$
 - ✓ 95%値： $x_{\text{avg}} + 2s = \mathbf{7.02\text{dB}}$

不確かさを考慮した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 |

最も大きな95%値が得られた条件の元データ

※ 空間的最大値、4.5GHz帯、垂直偏波、 H_{1-9} 、X方向

※ 全条件（各周波数、空間的平均値及び最大値）における最も大きな値のみ

- 数値解析と基本算出式で得られた電力束密度の比の結果は、以下の通り
 - ✓ 垂直偏波は周波数が高いほど大きい傾向であるが、水平偏波は周波数によらず一定傾向
 - ✓ 不確かさと各誘電率間でのバラツキも考慮し、得られた最も大きな比は、7.02dB



- 提案基本算出式に適用する係数としては、以下が適切
 - ✓ **周波数特性は設けず、一定**
 - ✓ 検討で得られた最も大きな比



- 係数を以下のように導出
 - ✓ **7.02dBを真数に変換すると、5.04**
⇒ **整数に切り上げて6**
 - (参考) 大地面等の反射係数k : 1, 2.56, 4

提案する基本算出式（再掲）

$$S_0 = \frac{PG}{40\pi R^2} \cdot A$$



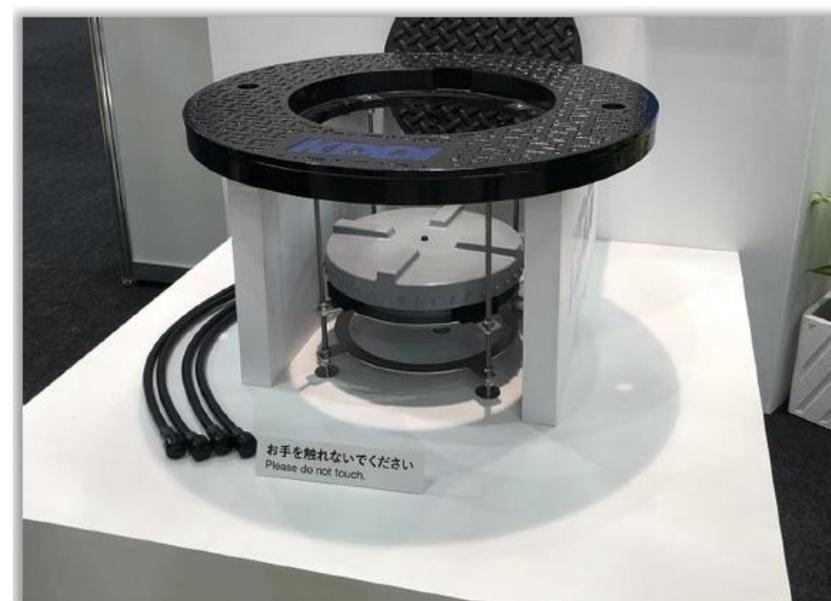
- **係数Aとして、6の導入を提案**

- 地中埋設型基地局からのばく露評価法の課題及び課題解決のための提案について、基地局Ad-hocにおける検討結果を示した。
 - 前提条件
 - ✓ アンテナ最上部が地表の10cm以下となるような設置を条件とする地中埋設型基地局
 - 課題①：空間評価領域（⇒計算及び測定法関連）
 - ✓ 垂直方向の空間評価領域について、地中埋設型基地局においては、従来よりも低い空間評価領域設定の必要性を示した。
 - ✓ 地中埋設型基地局向けに、高さ70cmまでの空間評価領域の設定を提案した。
 - 課題②：基本算出式（⇒計算法関連）
 - ✓ 基本算出式について、地中埋設型基地局においては、大地面の反射係数Kを削除し、波源周辺の構造物（ハンドホールや土など）の影響を考慮した係数Aを加えた式を提案した。
 - ✓ 上記係数Aとして、6を提案した。

| | | |
|----------|-----------------|------------|
| 携帯電話事業者 | NTTドコモ | KDDI |
| 周波数帯 | 1.5GHz, 3.5GHz帯 | 1.7GHz帯 |
| アンテナ設置位置 | 地表から10cm以下 | 地表から20cm以下 |
| アンテナ偏波 | 垂直偏波 | 垂直偏波 |



第2回作業班資料（NTTドコモ）より抜粋



第2回作業班資料（KDDI）より抜粋

2.1.5 防護指針の適用手順

管理指針（電磁界強度指針、補助指針及び局所吸収指針）、基礎指針及び基本制限で構成される防護指針の適用の手順は次のとおりとする。

実際に評価を行う場合は、放射源等の条件にかかわらず電磁界強度指針を最初に適用する。評価する対象が、電波利用の実情が認識され防護指針の主旨に基づいた電波利用を行うことが可能な場合は、管理環境を適用し、このような条件が満たされない場合は、一般環境を適用する。対象とする全空間（場所）において電磁界強度指針が満足されている場合は、その空間（場所）は安全であると判断する。

対象とする空間の電磁界は、一般的に不均一又は近傍界であることが多く、真の電磁界強度より大きな値として評価される。こうした状況において電磁界強度指針が満たされない場合には、補助指針による詳細な評価を行うことによって、安全かどうかを判断する。さらに、補助指針を適用できない、人体と電磁放射源が近接した場合には、局所吸収指針による評価を行う。

諮問第2035号「電波防護指針の在り方」のうち「低周波領域（10kHz以上10MHz以下）における電波防護指針の在り方」, 平成27年3月より抜粋

2.2.3 局所吸収指針

(a) 適用範囲

本指針は、周波数 100kHz から 300GHz までに適用する。

局所吸収指針の主な対象は、携帯電話端末等の小型無線機であり、電磁放射源に寄与するアンテナや筐体が人体に極めて近接して使用される場合を想定している。

具体的には、本指針は、電磁放射源（主にアンテナ）や放射に関わる金属（筐体等）と人体との距離が 20cm 以内の場合に適用される。また、それ以外の距離においても、電磁界強度指針、補助指針又は局所吸収指針のいずれか 1 つを満たせば基礎指針を満たしていると判断できる。ただし、300MHz から 300GHz までの周波数において、10cm 以上 20cm 以内の距離における電磁界強度指針又は補助指針の適用は排除されない。

諮問第2035号「電波防護指針の在り方」のうち「高周波領域における電波防護指針の在り方」, 平成30年9月より抜粋

300MHz以上の周波数において、電磁界強度指針及び補助指針が適用可能な領域は、**アンテナや金属と人体との距離が10cm以上離れた領域**

具体的な複素比誘電率の実部の組合せ

| 構造物の 想定状態 | 複素比誘電率の実部 ^{*1} | | | | |
|--------------|-------------------------|-----------------|----|------------------|------|
| | Cover | HH | AC | CS | Loam |
| 乾燥 | 2.6, 4 | 2, 2.8, 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 ^{*2} | |

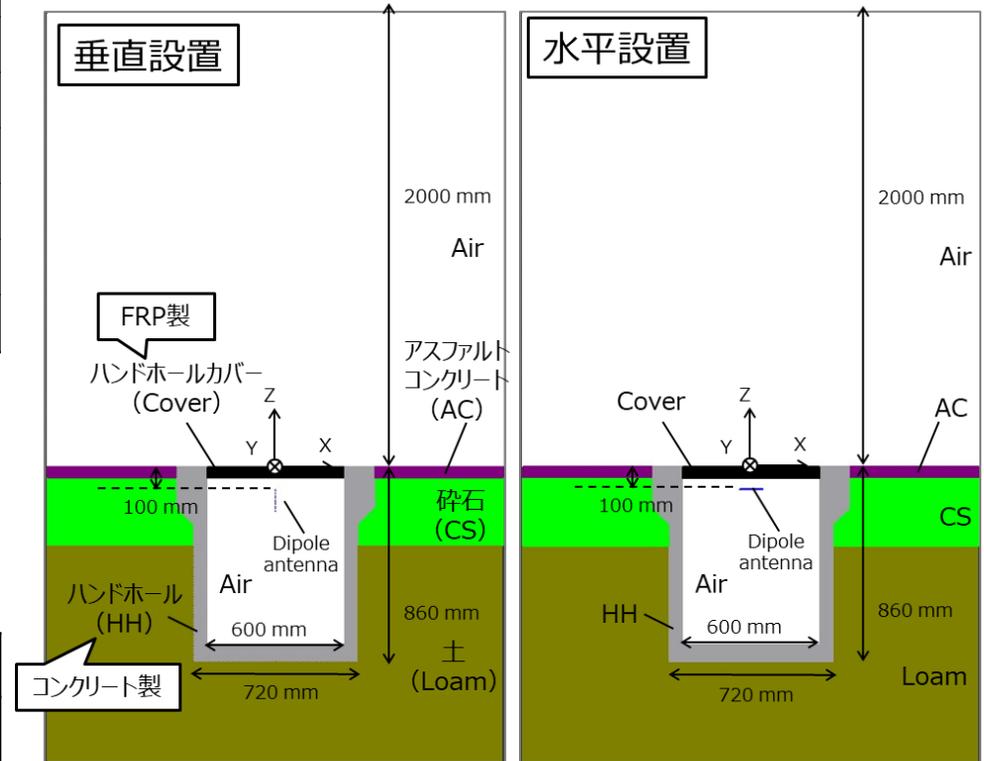
*1 虚部は全て0。仮に虚部が0でない場合、虚部が0の場合に比べて地上の電力束密度が小さくなることを一部条件で確認済み。

*2 40は、0.7及び0.8GHz帯のみ。

第4回作業班資料より抜粋

数値解析ソフトと設定

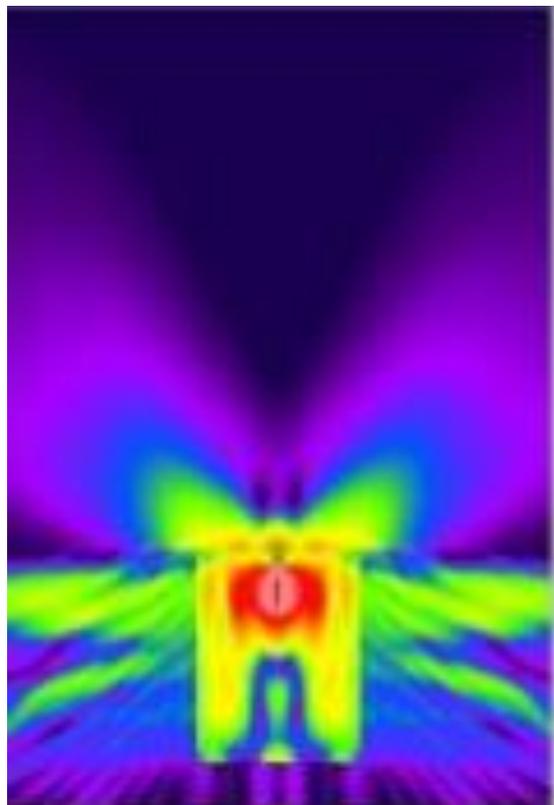
| | |
|---------------|---|
| 数値解析ソフト | XFDTD ver. 7.8 (Remcom社) |
| 各誘電体内のメッシュサイズ | 各誘電体内波長に対して 0.7~2GHz帯：1/15以下 3.5~3.7GHz帯：1/12以下 4.5GHz帯：1/10以下 |
| 境界 | PML (Perfect Matched Layer) 7層の吸収条件 |
| 収束条件 | Direct convergence=-40dB |



H₁₋₆, AC+CS+Loamの数値解析モデル

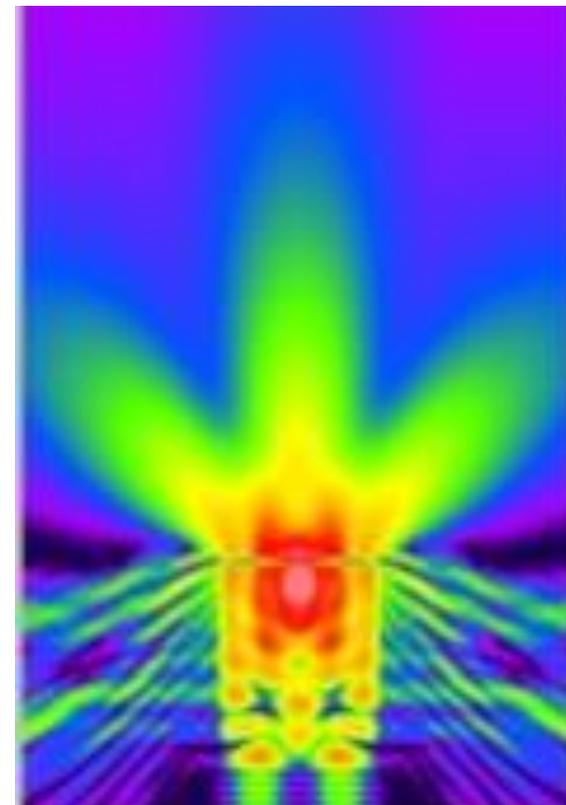
- ※ H₁₋₉は、H₁₋₆より30cm深いモデル
- ※ AC+Loam+Loamは、CS→Loam
- ※ Loam+Loam+Loamは、AC及びCS→Loam

第4回作業班資料より抜粋

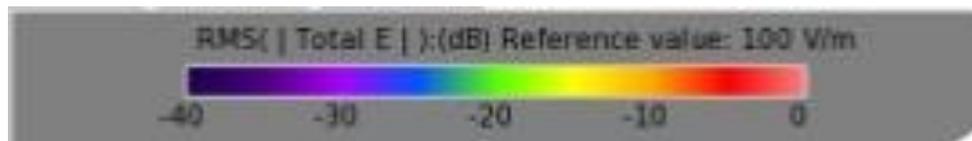


H₁₋₆、1.5GHz帯、垂直偏波、XZ面

誘電率は通常想定
(HH=8, Loam=10)



H₁₋₆、1.5GHz帯、水平偏波、YZ面



■ 拡張不確かさの導出

各要素の標準不確かさ

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

x_i : あるパラメータの*i*番目の値の場合の電力束密度の比
 n : あるパラメータの変化させた値の数
 x_{avg} : あるパラメータを変化させた場合の電力束密度の比の平均値
 s : あるパラメータを変化させた場合の電力束密度の比の標本標準偏差
 u : あるパラメータを変化させた場合の電力束密度の比の標準不確かさ

合成標準不確かさ

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

c_j : *j*番目のパラメータに対する感度係数 (この場合は1)
 u_j : *j*番目のパラメータに対する標準不確かさ
 m : 不確かさ要素として考慮したパラメータの数
 u_c : 合成標準不確かさ
 k : 包含係数
 U : 拡張不確かさ

拡張不確かさ

$U = k u_c$
**拡張不確かさ ($k=2$)
 の範囲に真の値が存在
 する可能性が約95%**

垂直偏波の拡張不確かさの導出

| 不確かさの要素 | 単位 | c_j | u_j | $c_j^2 u_j^2$ |
|---|----|-------|-----------|---------------|
| 直接収束 (-40dB to -60dB) | dB | 1 | 0.00173 | 2.98.E-06 |
| 波長に対するセルの最小数 (10.00 to 10.50) | dB | 1 | 0.250 | 6.26.E-02 |
| PMLの層数 (7 to 28) | dB | 1 | 0.0000707 | 4.99.E-09 |
| 地下モデル端までの水平距離 (1000mm to 1100mm、起点は波源) | dB | 1 | 0.000283 | 8.02.E-08 |
| 地下モデル端までの垂直距離 (740mm to 840mm、起点はHH下端) | dB | 1 | 0.0815 | 6.64.E-03 |
| 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 |

**垂直偏波の拡張不確かさは、
 ± 0.526 dB**
 ➤ 垂直偏波の方が水平偏波
 より大きい値であった