

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 先進技術研究所）

- 第1回作業班報告内容の振り返り
- 基地局Ad-hocからの提案内容
- 検討詳細
 - 第3回作業班報告資料の訂正
 - 検討モデル
 - 傾向確認①：数値解析／電界強度分布
 - 傾向確認②：数値解析／電力束密度の誘電率依存性
 - 傾向確認③：数値解析／アンテナ指向性
 - 課題①：算出式の係数の検討
 - 課題②：空間的平均値及び最大値の算出範囲の検討
- まとめ

※「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。

課題：電波の強度を適切に評価可能な適合確認方法の確保**①：計算法を用いた電波の強度の評価における適切な算出式の確保**

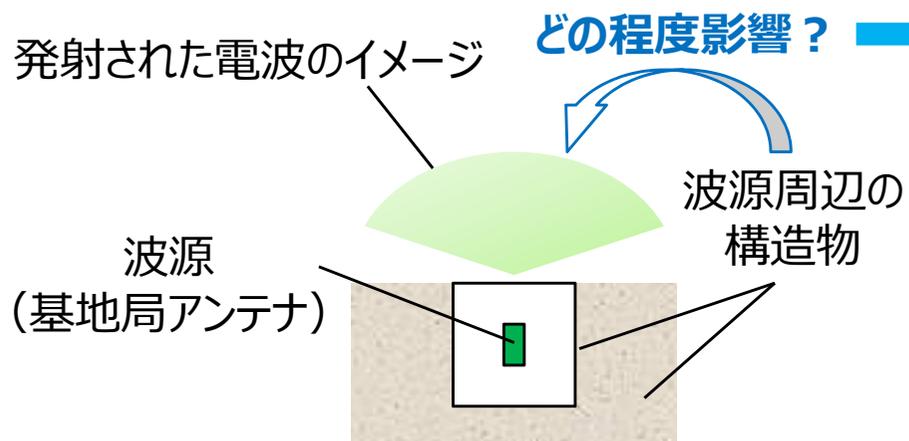
- 従来算出式を地中埋設型基地局に適用した場合、電波の強度を過小評価してしまう可能性がある
 - 従来算出式では想定されていない、**波源周辺の反射**が考えられるため

②：人体の占める空間における電波の強度の適切な算出法の確保

- 従来算出法を地中埋設型基地局に適用した場合、比較的身長の高い人が占める空間の電波の強度の最大値及び平均値を過小評価してしまう可能性がある
 - 従来基地局とは異なり、**地表に近いほど電波の強度が強い状況**が考えられるため

■ 方針

- 従来算出式をベースとし、波源周辺の電波反射による電波の強度の上昇分を反映した係数を追加した新たな算出式を策定



地中埋設型基地局の波源周辺の状況イメージ

「係数」として反映

$$S = A \frac{PGD_{\theta}K}{40\pi R^2}$$

- S [mW/cm²] : 電力密度
- P [W] : アンテナ入力
- G : アンテナ絶対利得
- D_θ : 指向性減衰量
- K : 大地面等の反射係数
- R [m] : 波源と評価地点との距離
- A : 係数**

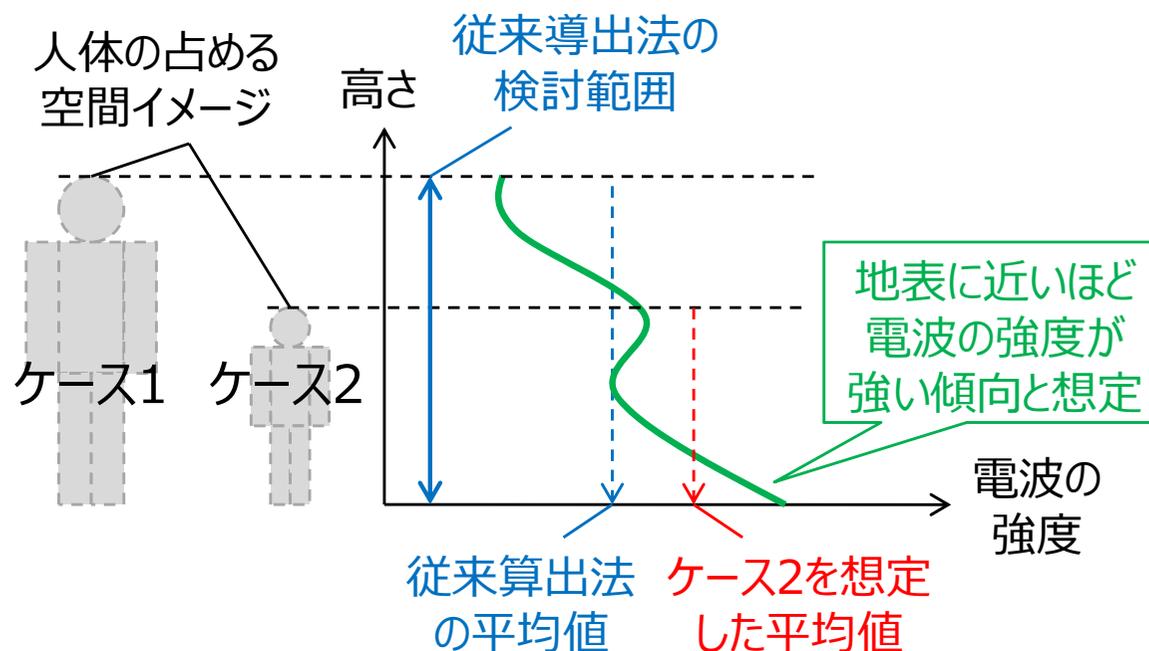
検討中の算出式

■ 検討状況

- 係数の導出のため、各方法で評価した電波の強度を比較中 (0.7~3.5GHz帯)
 - 従来算出式による計算値、測定値、数値解析値 (電磁界シミュレーション)
 - ↳ 様々な周波数や波源周辺状況の考慮に有効

■ 方針

- 従来算出法をベースとし、地表に近いほど電波の強度が強い場合でも、人体の占める空間における電波の強度を評価可能な算出法を新たに策定



地中埋設型基地局周辺の電波の強度の分布イメージ

■ 検討状況

- 算出法の検討のため、高さ方向における様々な範囲で電波の強度の最大値と平均値を導出し、比較中
 - 課題①で評価した電波の強度の分布に基づく検討

- 第1回作業班で示した通り、従来算出式をベースとし、波源周辺の電波反射による電波の強度の上昇分を反映した係数を追加した新たな算出式を提案する。
- 数値解析に基づく電磁界強度の比較より、係数として、最大6dB程度を提案する。
- ただし、提案算出式は、以下の条件を満たす地中埋設型基地局にのみ適用可能なものとする。
 - ハンドホール及びハンドホール蓋の大きさが、H1-6相当からH1-9相当の間のものであること。
 - ハンドホールの材質が、コンクリート相当のものであること。
 - ハンドホール蓋の材質が、FRP相当のものであること。

- 電磁界強度の空間的平均値及び最大値の算出範囲として、比較的身長
の低い方を想定した算出範囲の設定を提案する
 - 最短で高さ0.7 mの範囲（一般に歩行可能となる1歳児の平均身長
を参照）
 - なお、周波数に応じた取り扱いについては、作業班でご議論頂きたい

(参考) 電力束密度分布の数値解析値から得られた結果

- 周波数1 GHz超
 - 従来の高さ範囲2mのままでもよい
- 周波数1 GHz以下
 - 比較的低い身長の方を想定した算出範囲が必要

- 第3回作業班資料にてARIBより報告した数値解析データについては、破棄扱いとし、本報告資料計算の数値解析データに基づき、議論させて頂きたい。

- 理由
 - 第3回作業班にて報告した数値解析データについては、吸収境界の位置の設定が適切でなかったため。

- 第3回作業班にて報告した数値解析データについて
 - 地面の中に、正しい解析条件では存在しない反射波が存在した。
 - 上記の反射波の影響で、空間の電界分布にも若干影響した。
 - 対象は、電界強度が比較的弱い位置

検討モデル (1) 概要

- 周波数、検討モデル、方法は、下表の通り
- 数値解析では、モデルを構成する物質の誘電率の実部を変化させながら検討を実施

周波数	典型モデルを用いた検討 (ARIB、docomoで実施)		実基地局を用いた検討 (1.5&3.5GHzはdocomo、1.7GHz帯は KDDIで実施)		
	数値解析*1	基本算出式*2	測定*2, *3	数値解析*1	基本算出式*2
700 MHz帯	○	○			
800 MHz帯	○	○			
1.5 GHz帯	○	○	○	○	○
1.7 GHz帯	○	○	○		○
2 GHz帯	○	○			
3.5 GHz帯	○	○	○	○	○
4.5 GHz帯	○	○			

*1 FDTD法のソフトウェアXFDTD (Remcom社)を用いた計算

*2 平成11年郵政省 (現 総務省) 告示第300号参照、自由空間想定

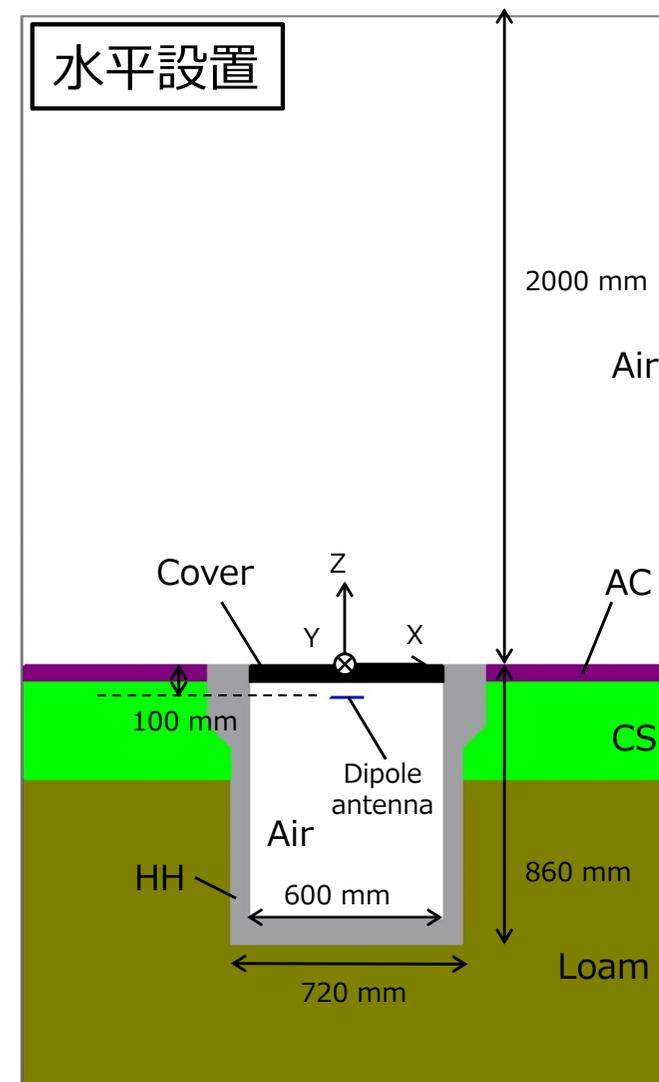
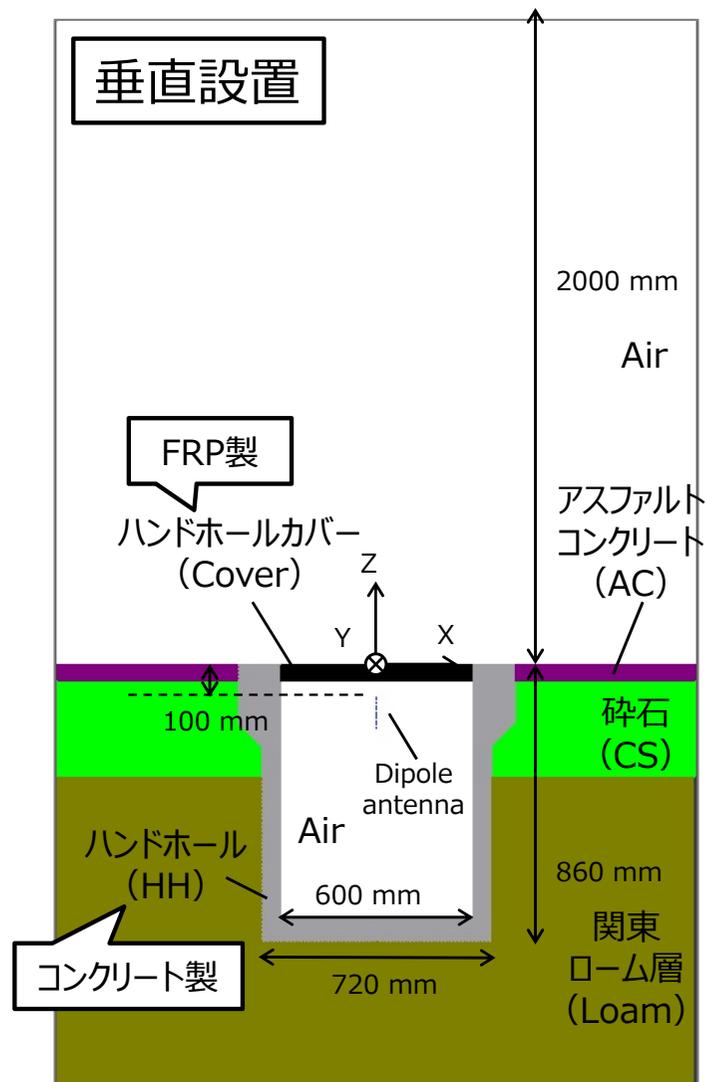
*3 IEC 62232: 2017参照

検討モデル（2） 典型モデル、構成

- 典型モデルの構成は、下表の通り
- 設置位置は、電磁界強度指針が適用可能で、人体とアンテナ間距離が最も短くなる条件

項目1	項目2	値	備考
アンテナ	種類	半波長ダイポールアンテナ	
	本数	1	NブランチMIMO構成の基地局の場合、アンテナ1本の場合の電力束密度をN倍すればよい
	実効放射電力	1 W	
	設置方向	垂直設置 水平設置	想定使用形態は、垂直設置
	設置位置	アンテナ上端が地面から深さ0.1m	
ハンドホール (以下、HH)	規格	H1-6、H1-9	
	素材	コンクリート	
HH蓋 (以下、Cover)	素材	FRP	
HH周辺の道路	規格	乗入れ舗装アスコン35型	
	構成	アスファルトコンクリート (以下、AC) 砕石 (以下、CS) 関東ローム層 (以下、Loam)	

- H1-6の数値解析モデル例は、下図の通り
 - H1-9は、H-6と比べて深さが30cm深い形状



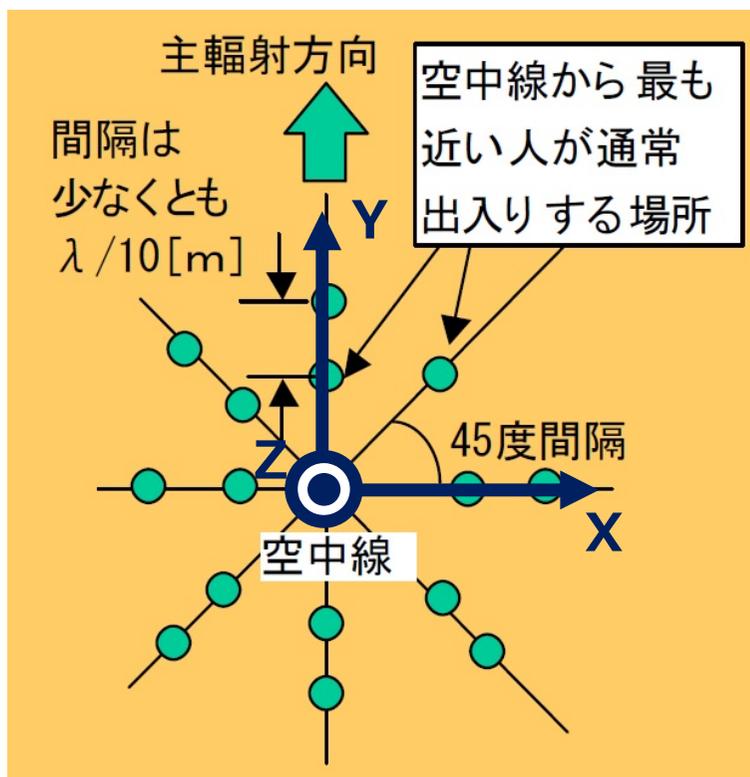
- 数値解析における誘電率は、下表の通り
- 地中埋設型基地局を想定し、以下の場合を考慮
 - 水分含有量による電磁界への影響を考慮するため、HH（ハンドホール）とLoam（関東ローム層）について、誘電率を変化させながら数値解析
 - 参考として、ハンドホール内の強い反射の可能性を考慮するため、HHをPEC（完全導体）とした場合を考慮して数値解析
- 比較のため、自由空間にアンテナを設置した場合の数値解析も実施

構成物	複素比誘電率の実部*1				
	地中埋設型基地局想定				自由空間想定
	乾燥想定	通常想定	湿潤想定	強反射想定 (参考)	-
HH	4, 6	6, 8	8, 12, 20	PEC	1
Loam	2, 5	5, 10	10, 20, 40	2, 5, 10, 20	1
Cover	4			4	1
AC	5			5	1
CS	7			7	1

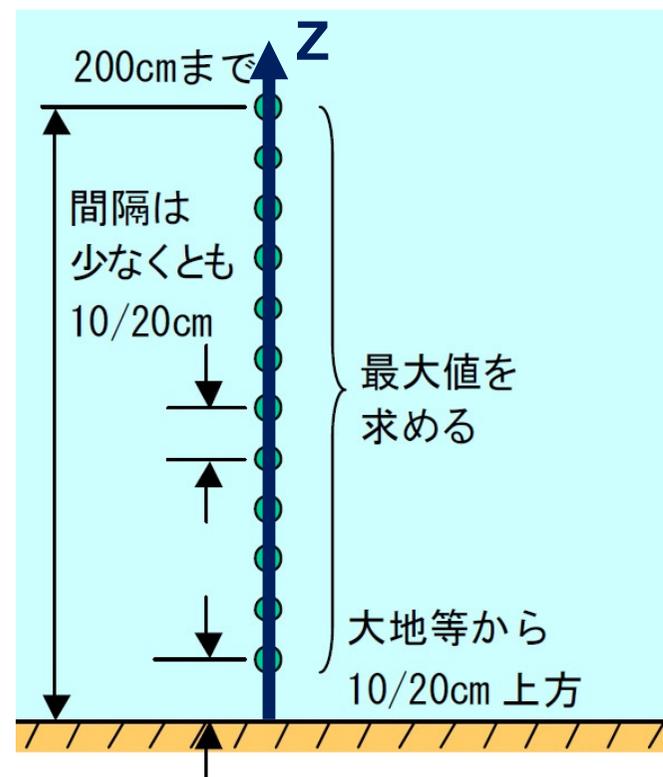
*1 虚部は全て0とした。物質内で電波が減衰しないような電波防護観点でのワーストケース想定のため。

検討モデル (5) 典型モデル、数値解析、電磁界分布の評価範囲

- 上面図
 - アンテナ真上を中心とし、放射状の評価地点
- 横断面図
 - 水平面上の各評価地点において、地面から高さ0.1m~2.0mの範囲で、0.1m間隔の評価地点



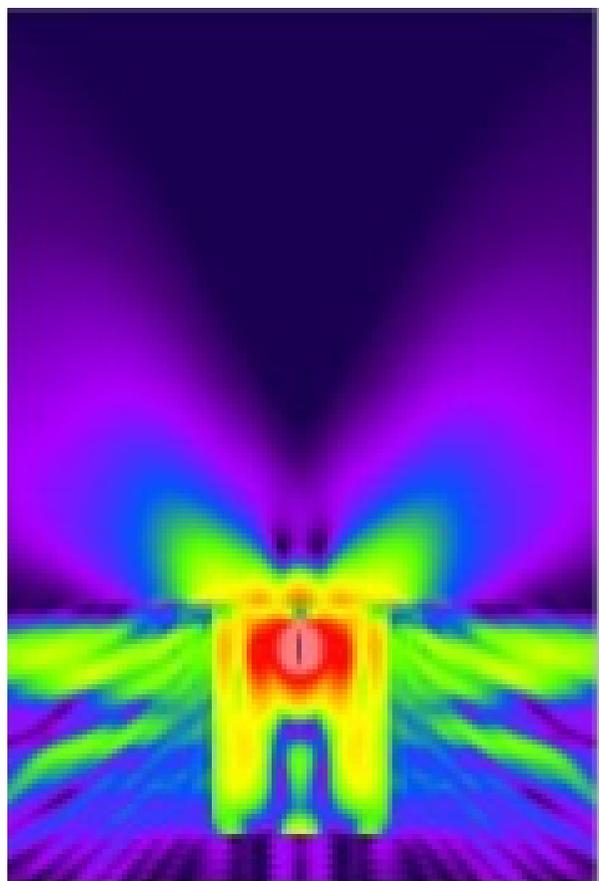
上面図



横断面図

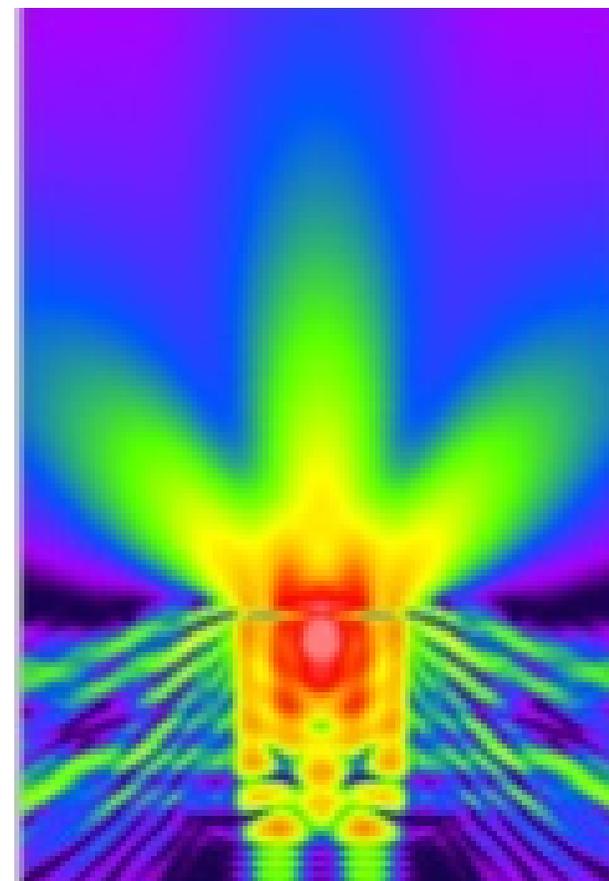
総務省, “電波防護のための基準への適合確認の手引き”
より抜粋

- アンテナ垂直設置、水平設置のいずれにおいても、アンテナ真上方向の電界は、周波数や誘電率が高くなるほど強くなる傾向にある（H1-9も同様）



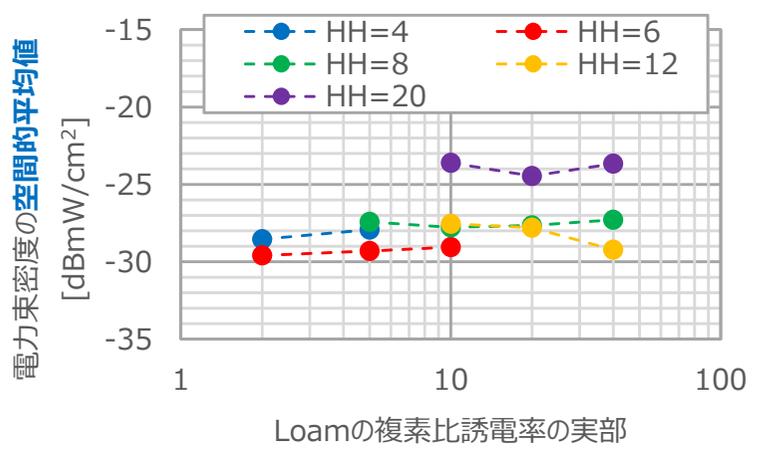
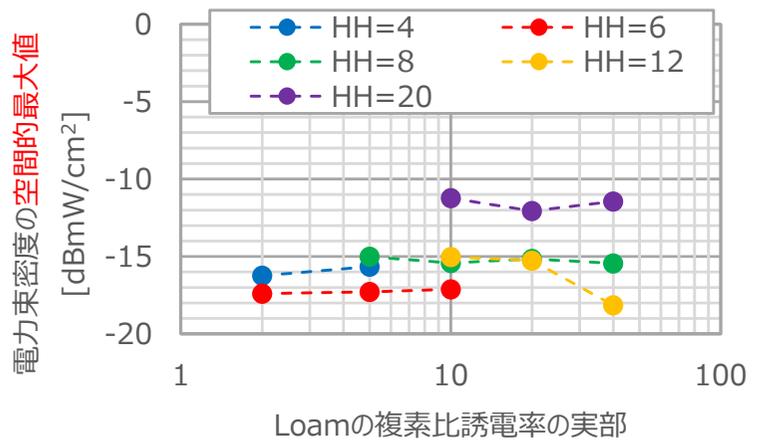
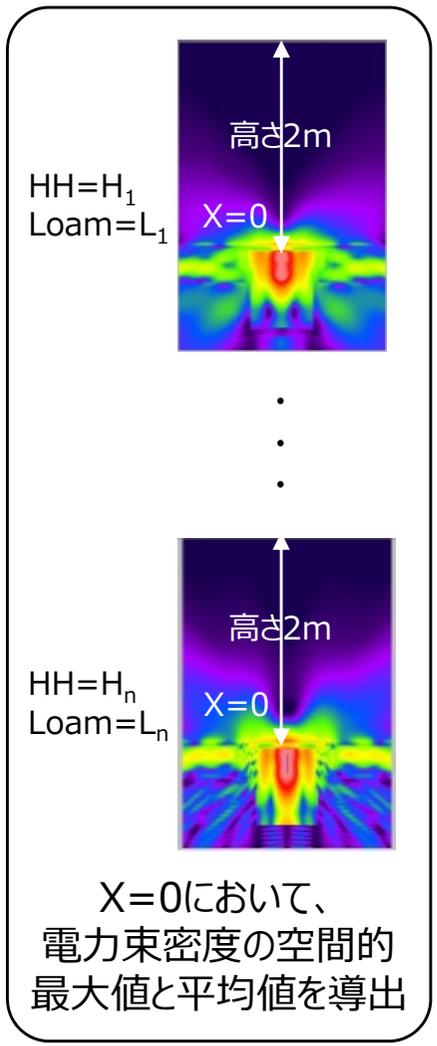
H1-6、1.5GHz帯、垂直設置、XZ面

誘電率は通常想定
(HH=8, Loam=10)

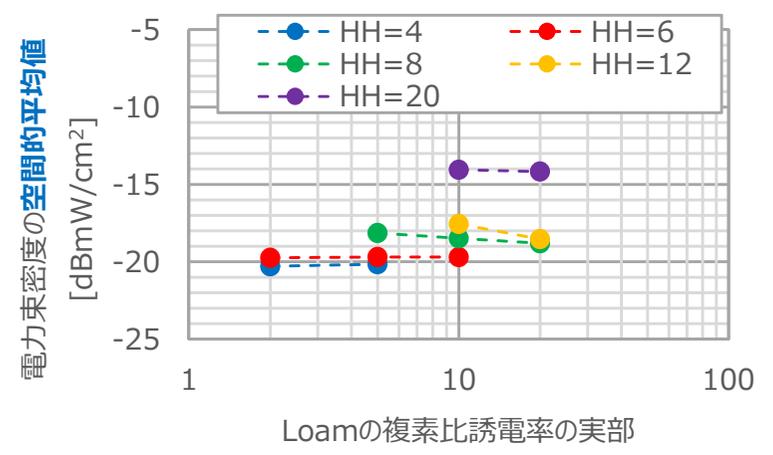
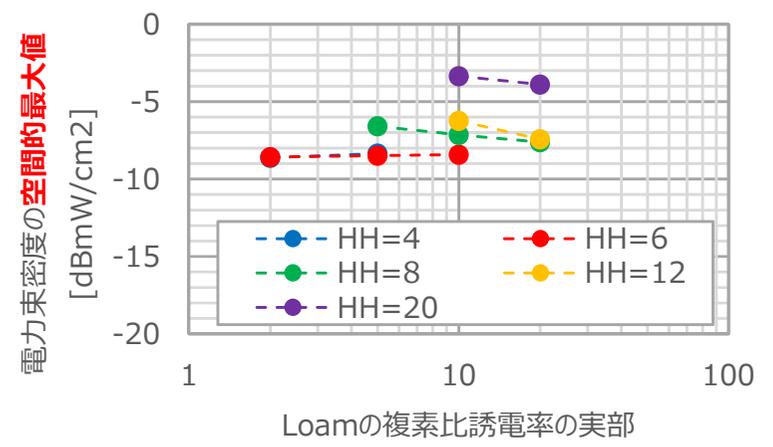


H1-6、1.5GHz帯、水平設置、YZ面

- 電界強度分布の、HHとLoamの誘電率への依存性を比較すると、よりアンテナに近い構造体であるHHの誘電率への依存度が高い（H1-9も同様）
 - 自由空間中の指向方向である真横方向からの反射影響が考えられ、HH側壁表面の反射寄与が推定される

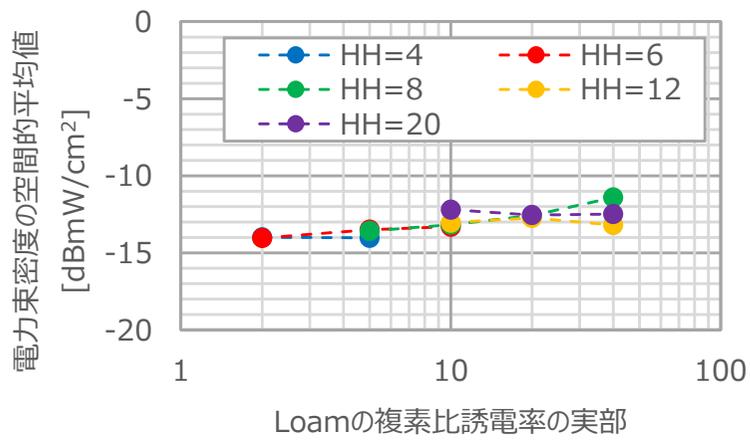
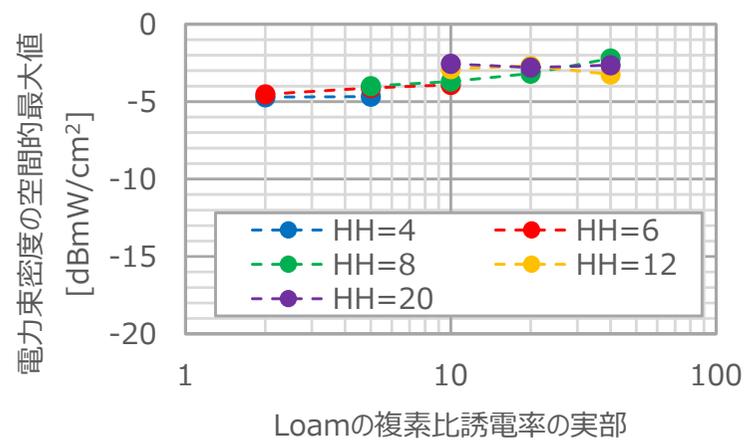
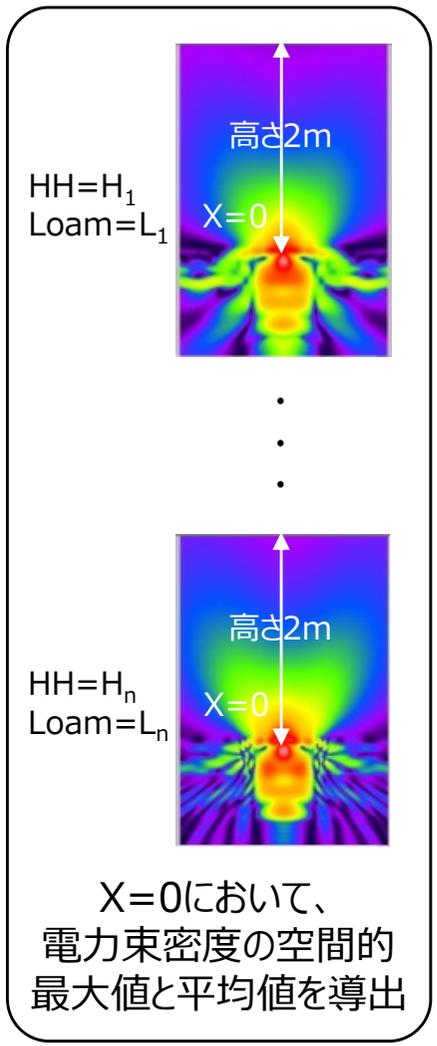


H1-6、垂直設置、700MHz帯

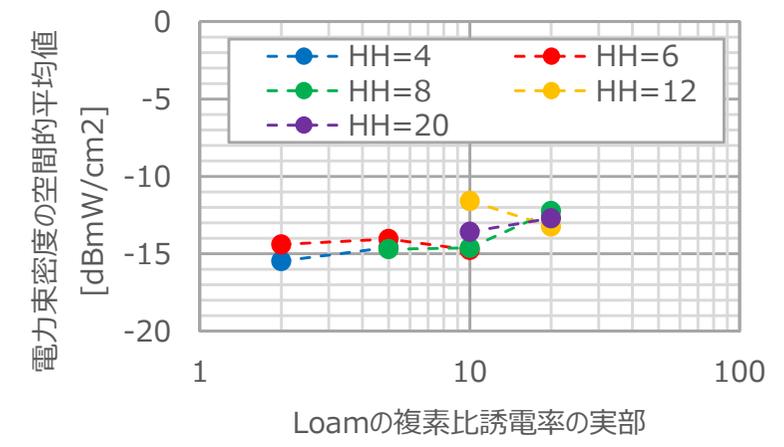
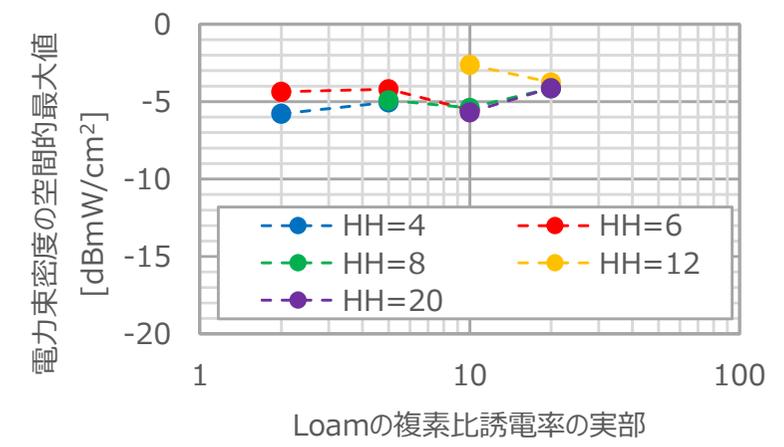


H1-6、垂直設置、4.5GHz帯

- 垂直設置に比べると、HHの誘電率への依存性が低くなり、Loamの誘電率への依存性が確認できる（H1-9も同様）
 - 自由空間中の指向方向である真下方向からの反射影響が考えられ、HH底部表面のみならず、Loam層表面の反射寄与が推定される



H1-6、水平設置、700MHz帯



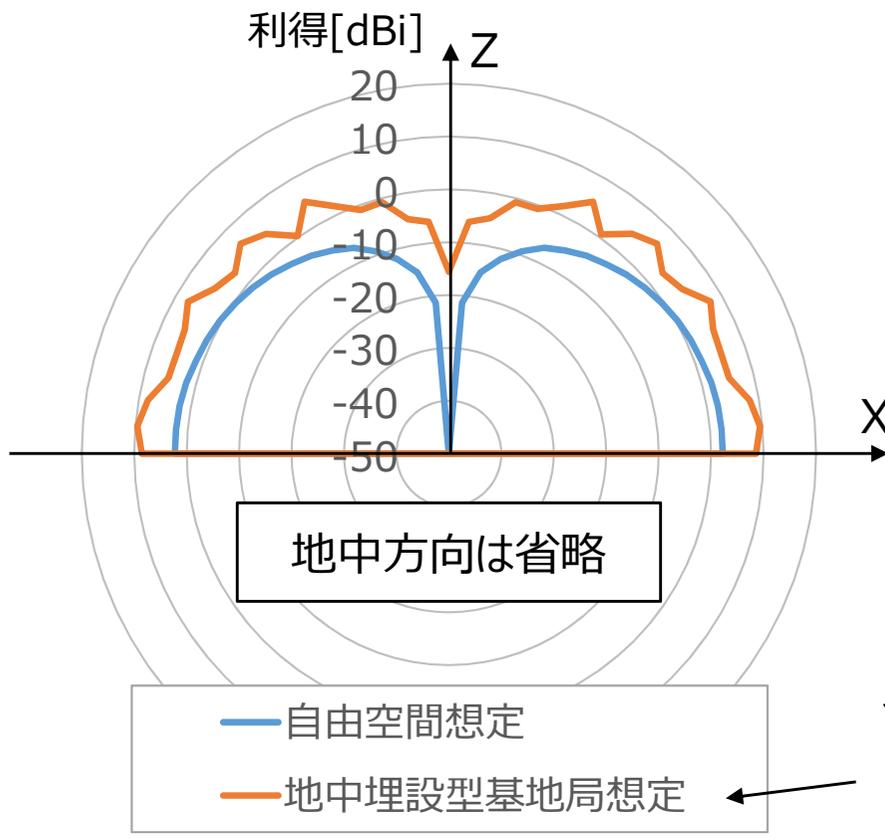
H1-6、水平設置、4.5GHz帯

- アンテナ真上方向の電力束密度の空間的最大値及び平均値
 - アンテナ垂直設置
 - HHの誘電率への依存性が確認できる
 - HHの誘電率が大きいほど強い傾向にある
 - アンテナ水平設置
 - HHの誘電率への依存性は、垂直設置に比べて小さい
 - Loamの誘電率への依存性が確認できる
 - Loamの誘電率が大きいほど強い傾向にある
 - HH底面層を通過した電波のLoam層上面での反射と推定

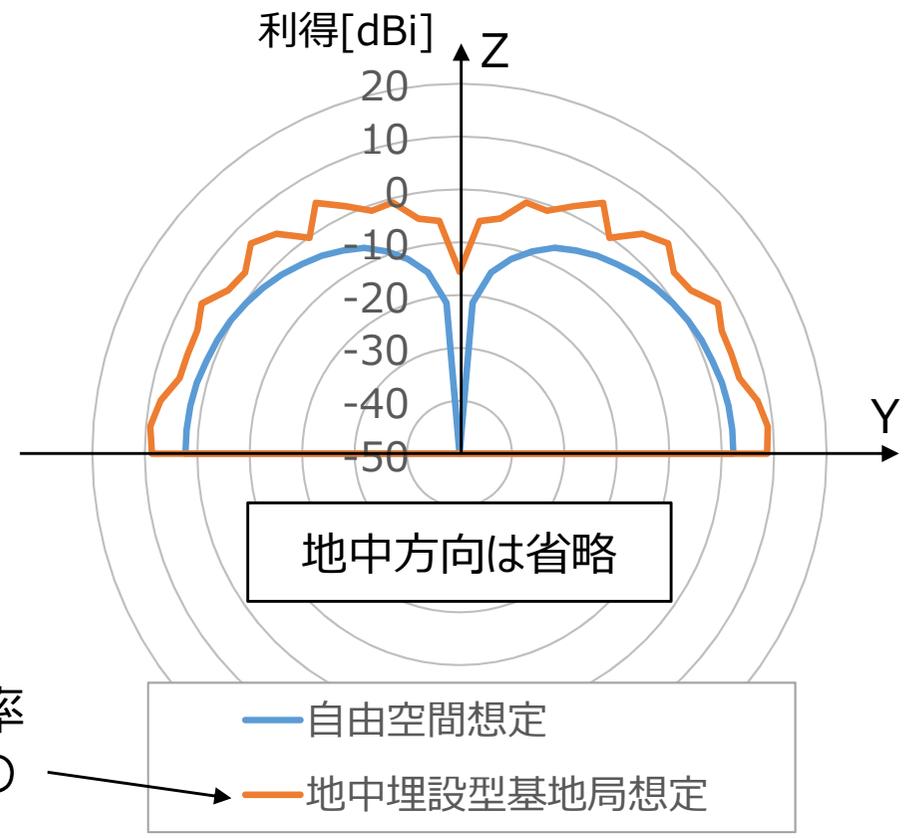


- **保守的な評価を効率的に実施するためには、HH、Loamのいずれも誘電率が高い検討モデルに絞った検討も可能と考えられる**
- **実際のHHのように通過損（複素比誘電率の虚部あり）を考慮すれば、HHの外側の構造物の誘電率が電界強度分布に影響しない可能性あり**

- 地中に設置したアンテナ指向性は、空中に設置した場合の指向性に係数をかけたような傾向にある
- H1-9もH1-6と同様の傾向



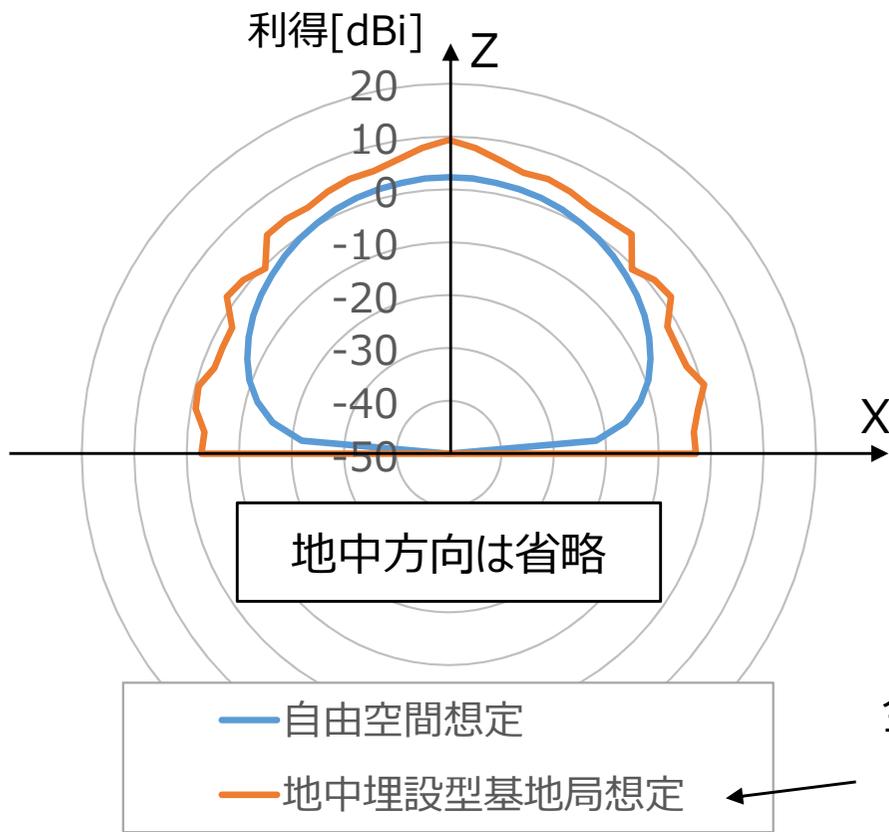
H1-6、垂直設置、1.5GHz帯、XZ面



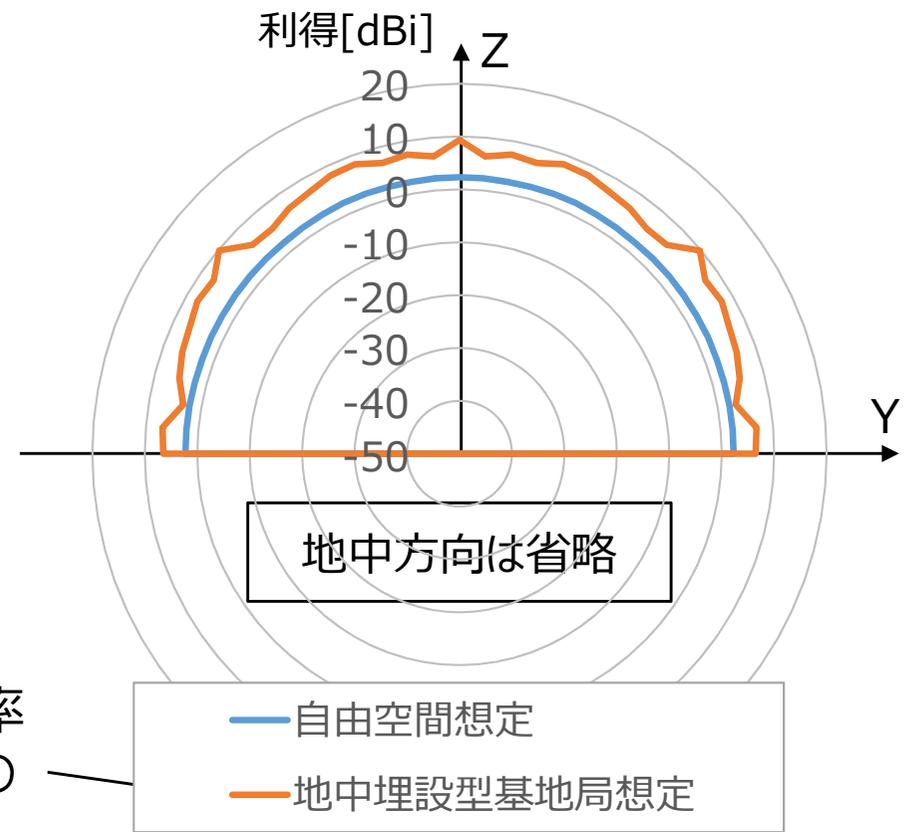
H1-6、垂直設置、1.5GHz帯、YZ面

全誘電率
条件での
最大値

- 水平設置の場合も、垂直設置と同様の傾向



H1-6、水平設置、1.5GHz帯、XZ面



H1-6、水平設置、1.5GHz帯、YZ面

全誘電率
条件での
最大値

- 地中に設置したアンテナ指向性は、空中に設置した場合の指向性に係数を乗じた傾向にある
- ただし、今回検討対象以外のハンドホールの素材や形状での傾向は不明



- **地中埋設型基地局向けの新たな算出式は、既に提案したような従来算出式をベースとし、波源周辺の電波反射による電波の強度の上昇分を反映した係数を追加した式が妥当**
- **ただし、その適用範囲は、検討済条件に限ることが適切**

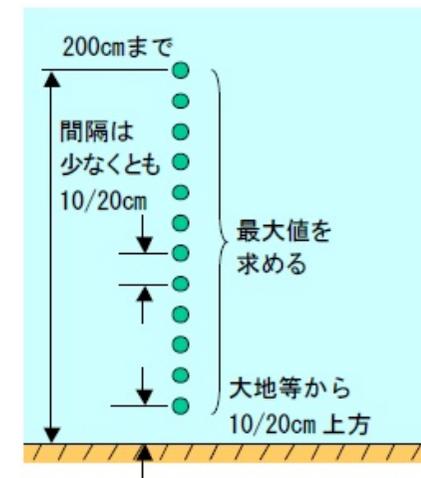
- 計算に基づく適合確認の手順の①及び④に沿って、各算出式及び数値解析で求めた電力束密度を比較し、地中埋設型基地局向けの算出式の係数を求める。

適合確認の手順

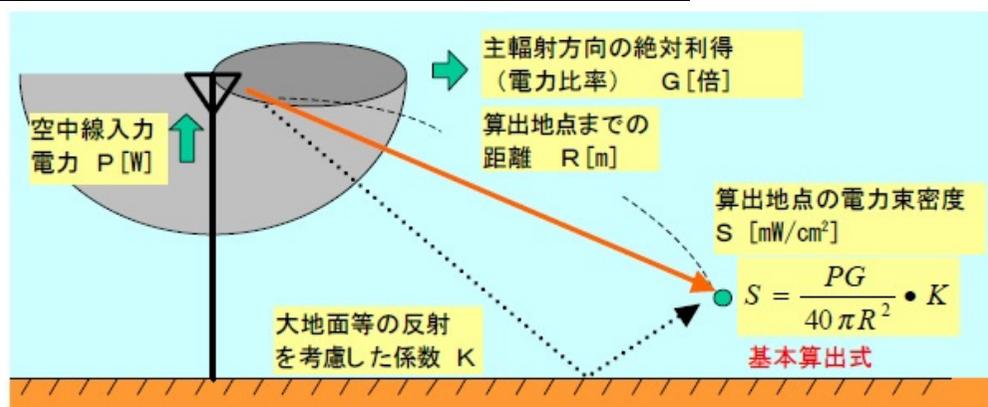


①の補足

- 空間の最大値を求める
- 求めた値と、通常の基準値を比較する
- 最大値が、基準値以下で適合

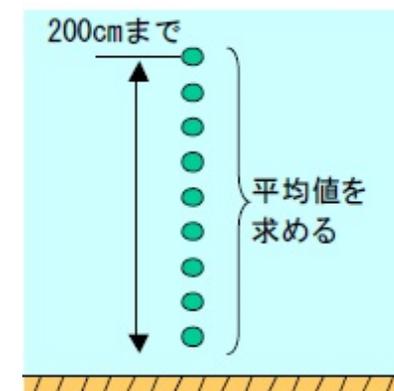


①及び④で使用する基本算出式



④の補足

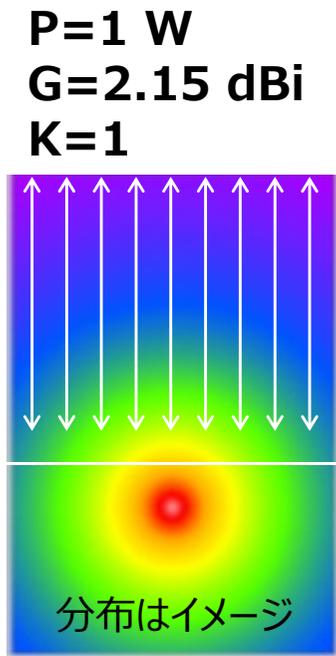
- 空間の最大値及び平均値を求める
- 求めた値と、不均一ばく露を想定した基準値を比較する
- 最大値、平均値の両方が、それぞれの基準値（参考2）以下で適合



◆ 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、高さ範囲2.0mの空間的最大値を算出

基本算出式
自由空間

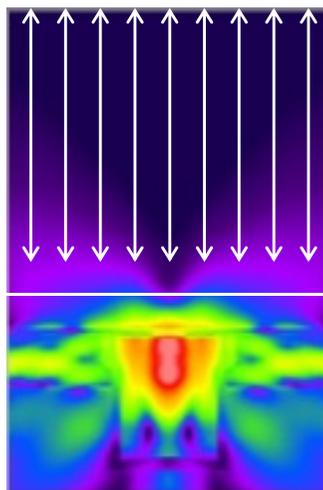


※ **空間的平均値**の導出法については、空間的最大値を空間的平均値に読み替える

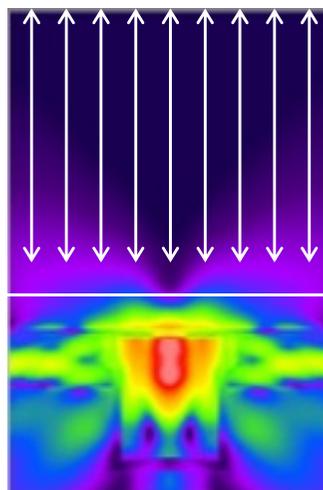
◆ Step2

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、高さ範囲2.0m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

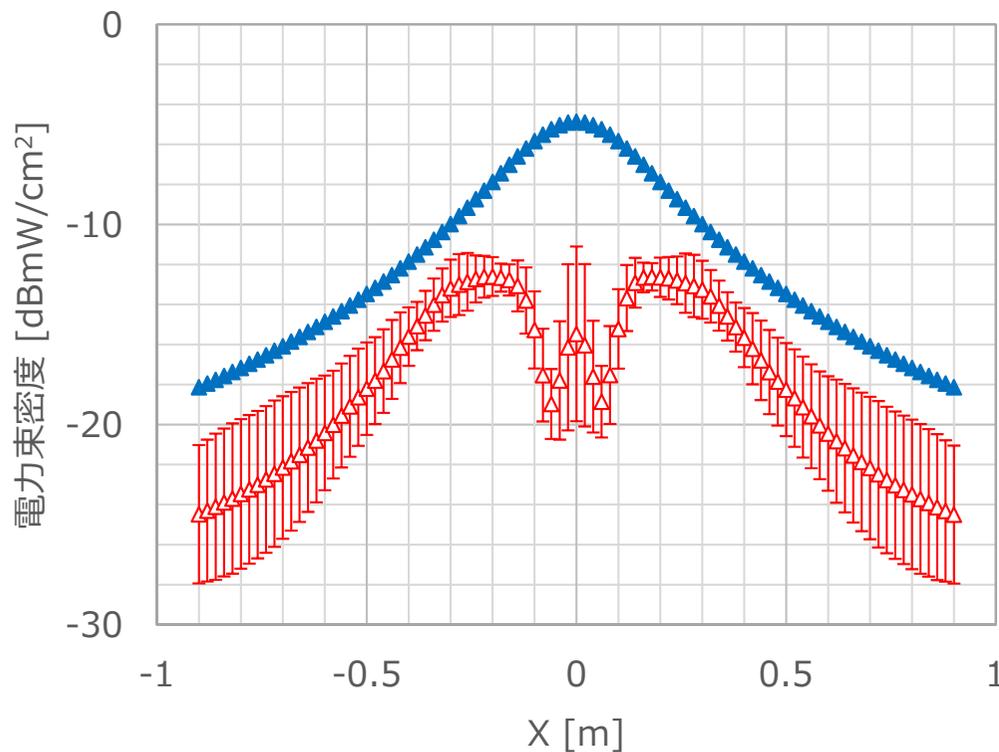
Step2で得た各水平位置における**空間的最大値**について、全誘電率条件における平均値及び95%信頼区間（2s、sは標本標準偏差）を算出

標本標準偏差

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

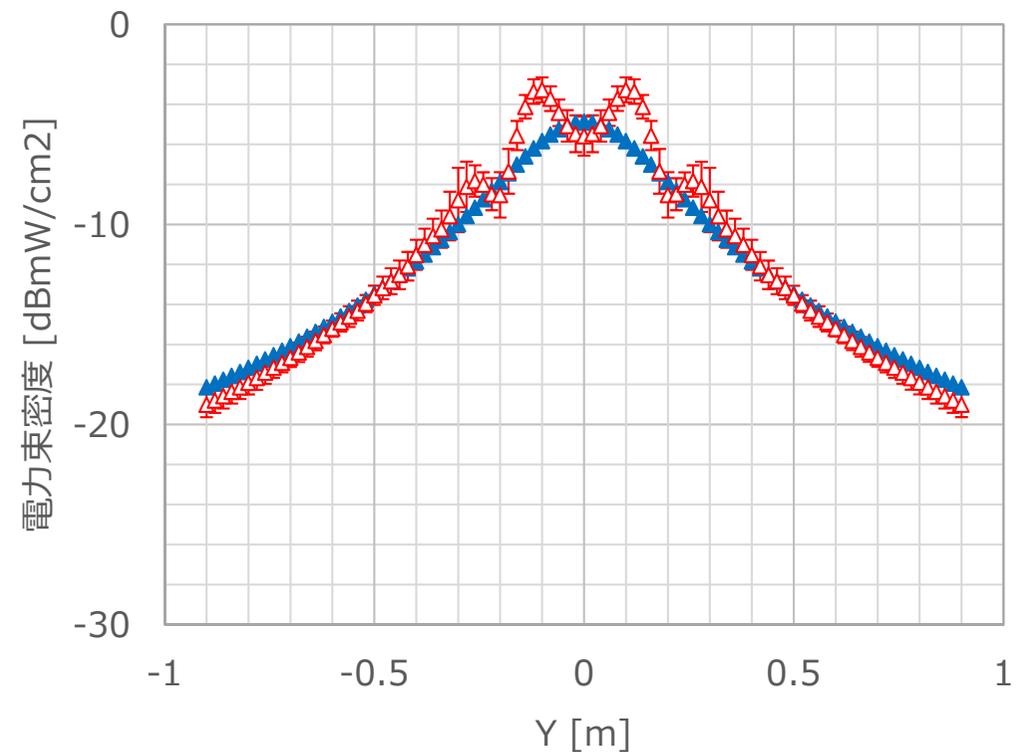
n：誘電率条件数
 x_i ：各誘電率条件の空間的最大値
 \bar{x} ：全誘電率条件の空間的最大値の平均値
 s：全誘電率条件の空間的の標本標準偏差

- 数値解析値は、ほぼ算出式で求めた値以下となるが、周波数が高くなるとアンテナ真上などの一部の位置で算出式で求めた値以上となる
- 垂直設置は、H1-9についても、傾向、全体的なレベルも同様
 - ハンドホールの深さにほぼ依存しないと推定
- 水平設置は、傾向は同様であるが、全体的なレベルは1～2dB程度低下
 - HHの底面及びLoam層上面の深さに依存すると推定



▲ 空間的最大値（基本算出式） ▲ 空間的最大値（数値解析）

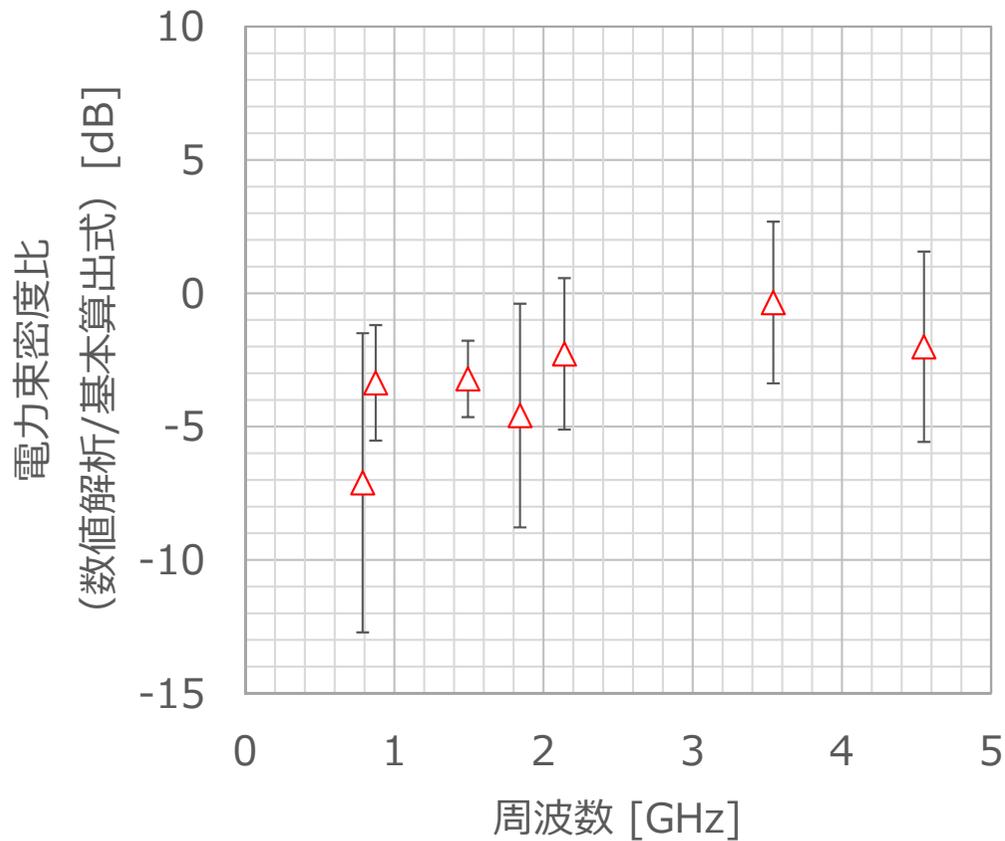
H1-6、1.5GHz帯、垂直設置、X方向



▲ 空間的最大値（基本算出式） ▲ 空間的最大値（数値解析）

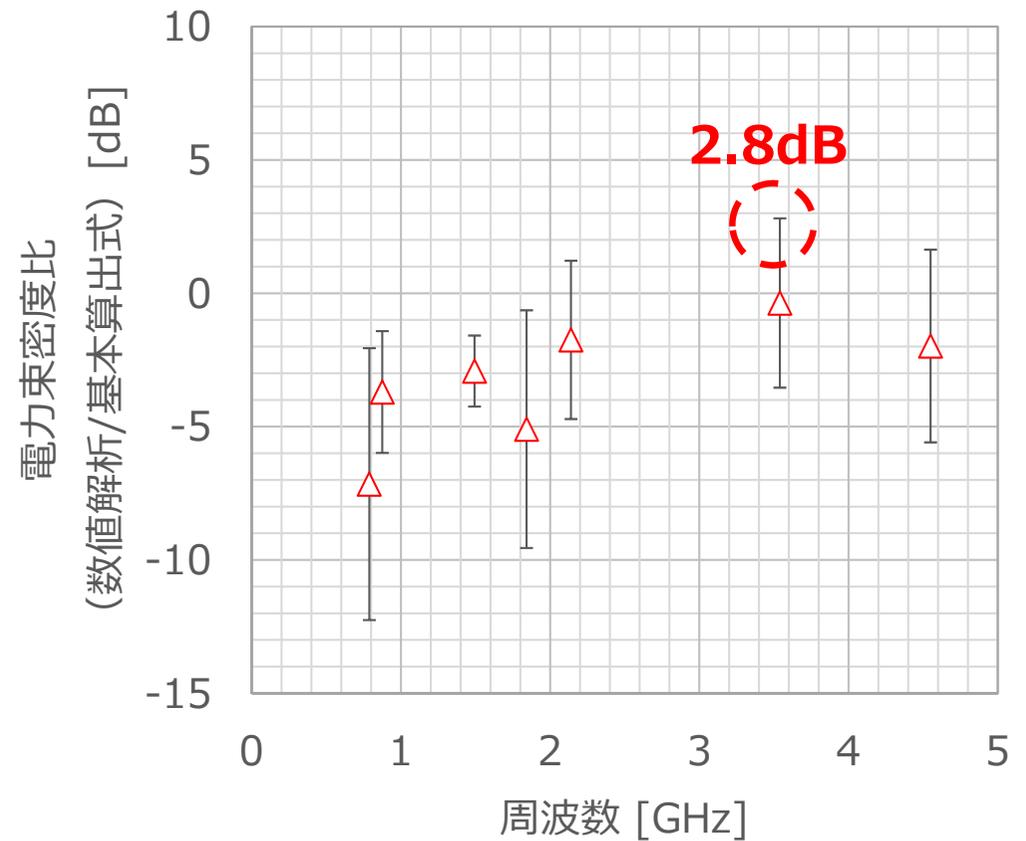
H1-6、1.5GHz帯、水平設置、Y方向

- 各周波数における電力束密度の空間的最大値について、基本算出式で得られた値に対する数値解析で得られた値の比をプロット
 - マーカーは全誘電率条件における平均値、エラーバーは95%信頼区間の値
- 最も大きな比（95%信頼区間）は、**2.8dB**



△ 空間的平均値（数値解析/基本算出式）

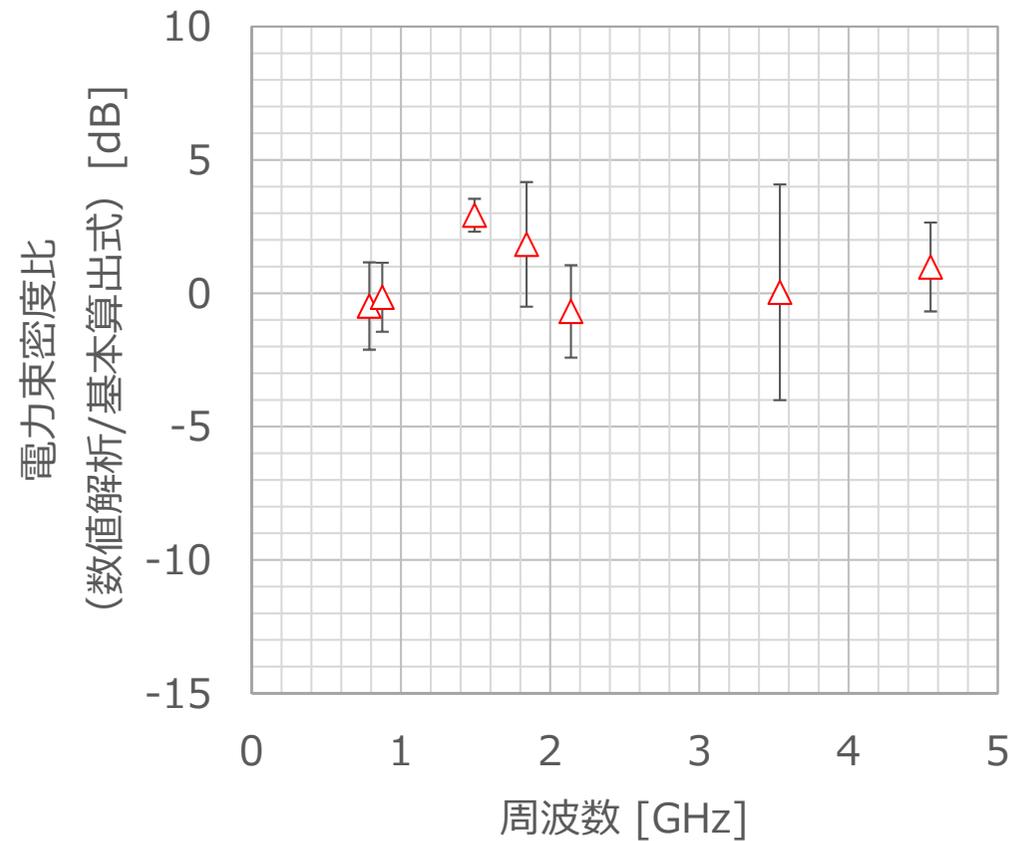
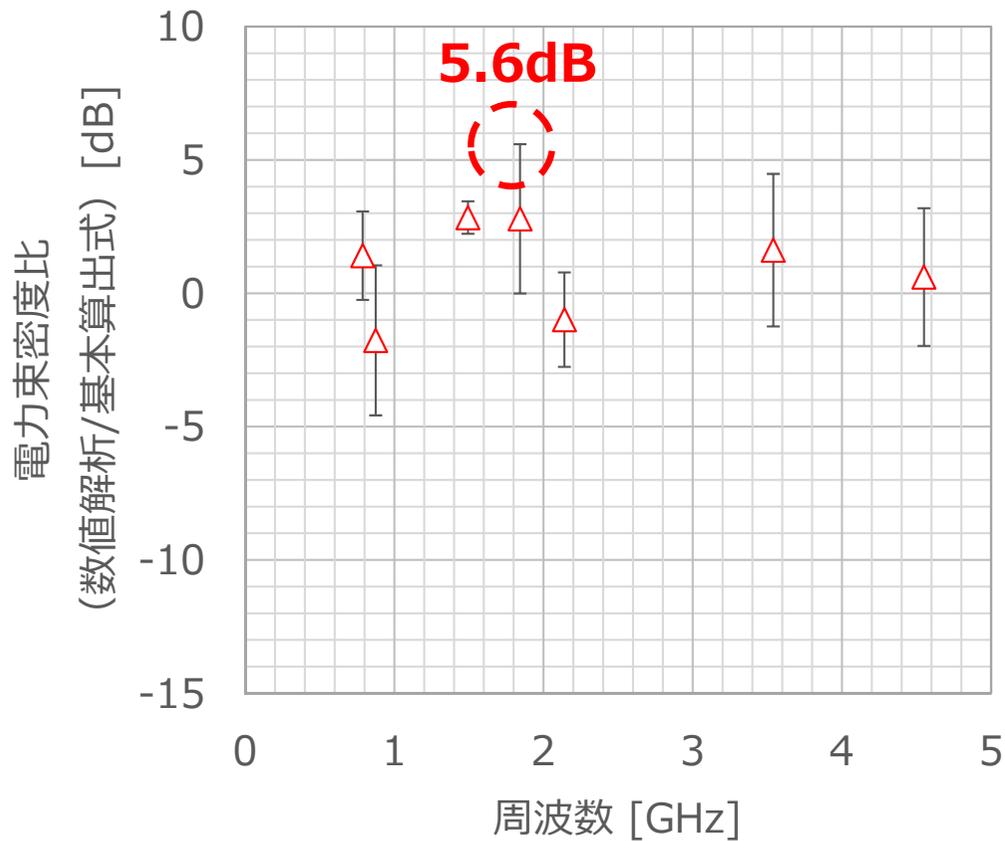
H1-6、垂直設置



△ 空間的平均値（数値解析/基本算出式）

H1-9、垂直設置

- 各周波数における電力束密度の空間的最大値について、基本算出式で得られた値に対する数値解析で得られた値の比をプロット
 - マーカーは全誘電率条件における平均値、エラーバーは95%信頼区間の値
- 最も大きな比（95%信頼区間）は、**5.6dB**



△ 空間的平均値（数値解析/基本算出式）

H1-6、水平設置、Y方向

△ 空間的平均値（数値解析/基本算出式）

H1-9、水平設置、Y方向

- 検討した誘電率の範囲における比の95%値
 - アンテナ垂直設置
 - 空間的最大値ベース：最大2.8dB
 - 空間的平均値ベース：最大0.04dB
 - アンテナ水平設置
 - 空間的最大値ベース：最大5.6dB
 - 空間的平均値ベース：最大4.3dB



電磁界強度分布の比から見積もられた算出式に適用すべき係数は、最大で6.0dB程度

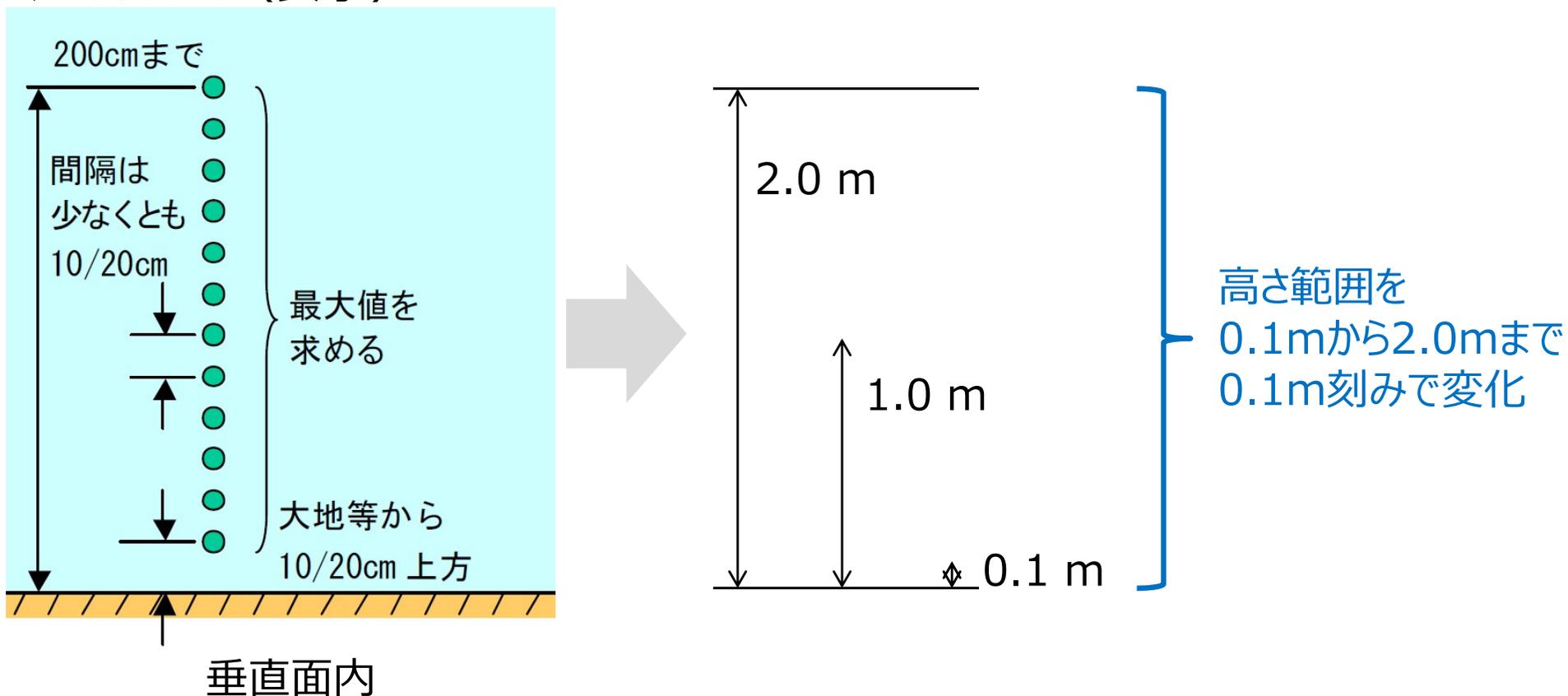
- 仮に、ハンドホールを金属とした場合の比の95%値
 - 最大10dB超



ハンドホール全体が金属製となることは現実的でないため、この値はあくまで参考値であるが、上記の係数6.0dBについては限定された条件での値と考えることが妥当と言える

課題②：値の算出範囲（1） 検討方針

- 典型モデル、数値解析で得られた電磁界分布に基づいて検討
- 空間的平均値及び最大値を算出範囲（高さ方向）を0.1 m～2.0 mまで変化
- それぞれ、基準値（参考2参照）との比を導出
- **算出範囲（高さ方向）として、0.7m～2.0mに注目して検討**
 - （参考）年齢を1歳として、1歳0～1月未満の幼児身長の中央値は、74.9cm（男子）、73.4cm（女子）*1

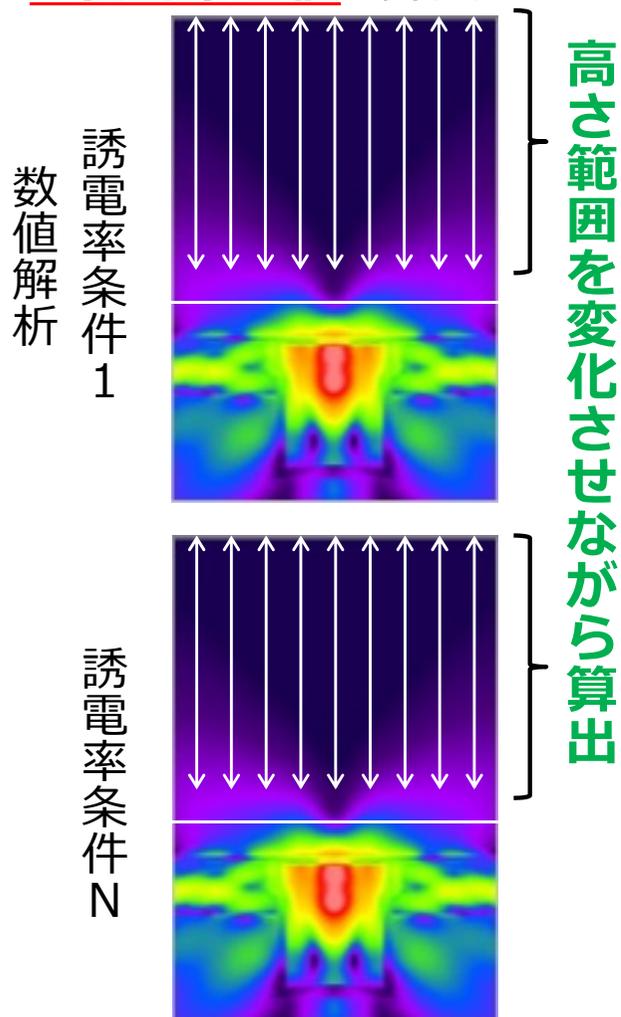


総務省, “電波防護のための基準への適合確認の手引き”より抜粋

*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>)

◆ 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、高さ範囲0.1~2.0mの空間的最大値を算出



◆ Step2

Step2で得た各水平位置における空間的最大値について、全誘電率条件における平均値及び95%信頼区間（2s、sは標本標準偏差）を算出

標本標準偏差

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

n：誘電率条件数

x_i ：各誘電率条件の空間的最大値

\bar{x} ：全誘電率条件の空間的最大値の平均値

s：全誘電率条件の空間的の標本標準偏差

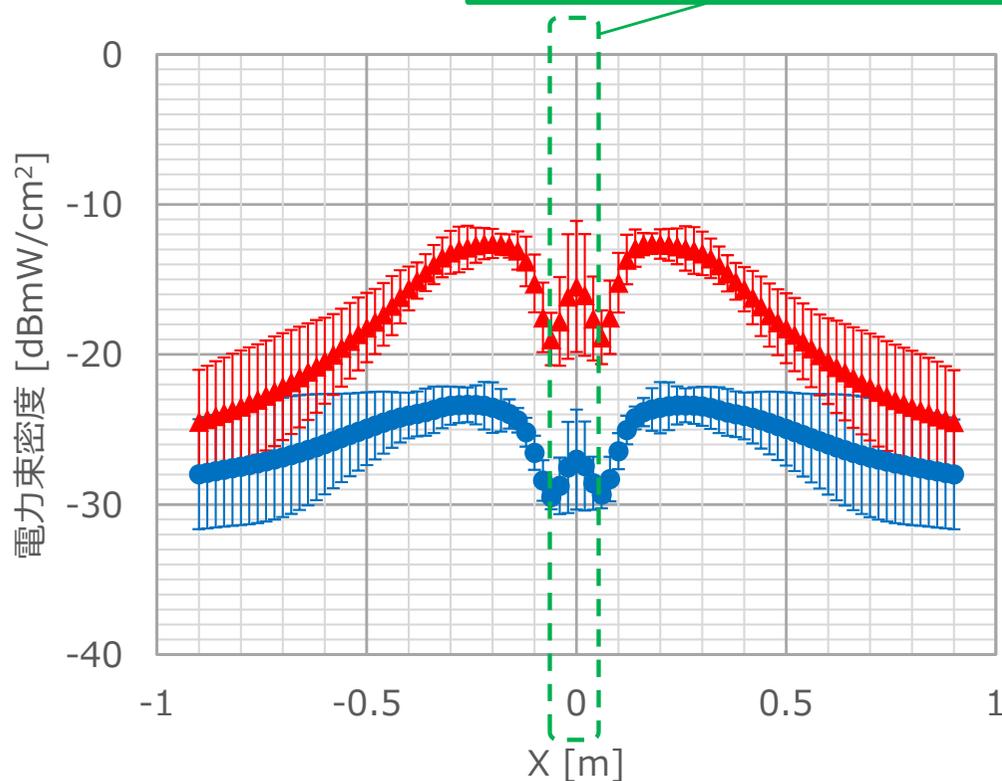
※ 空間的平均値の導出法については、空間的最大値を空間的平均値に読み替える

- 誘電率の違いによる偏差は、アンテナ垂直設置の方が大きい傾向にある
- H1-9も、H1-6と同様の傾向

次頁より、アンテナ真上の位置で高さ範囲を変化させた場合の

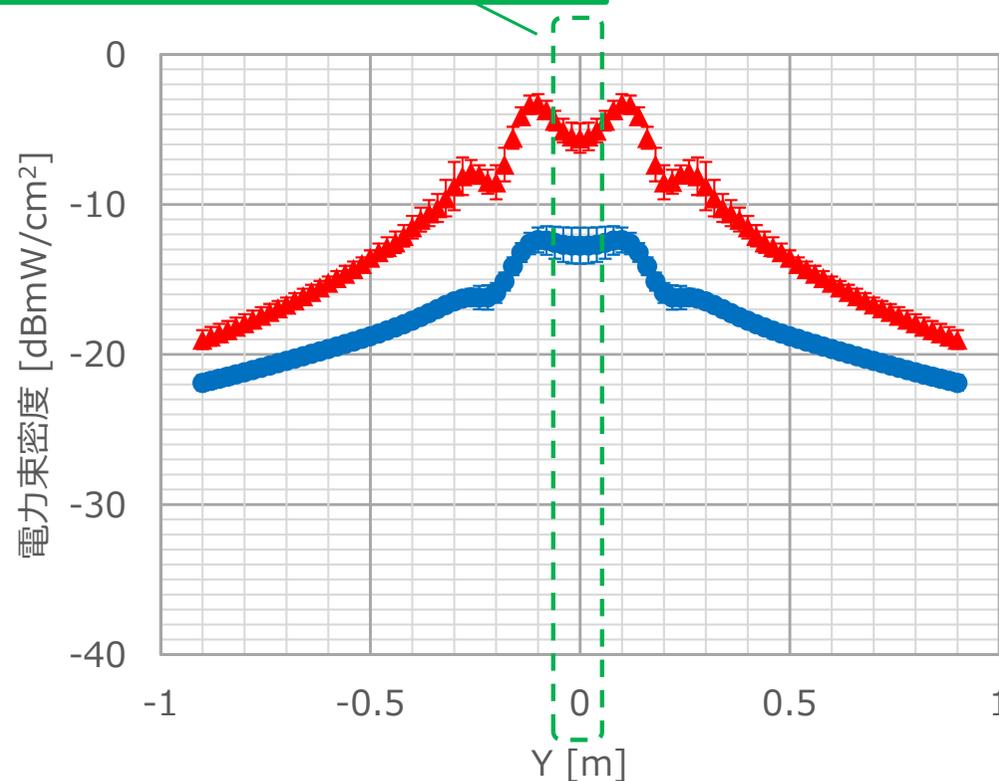
- 電力束密度の絶対値
- 電力束密度の基準値との比

を示す



● 空間的平均値 ▲ 空間的最大値

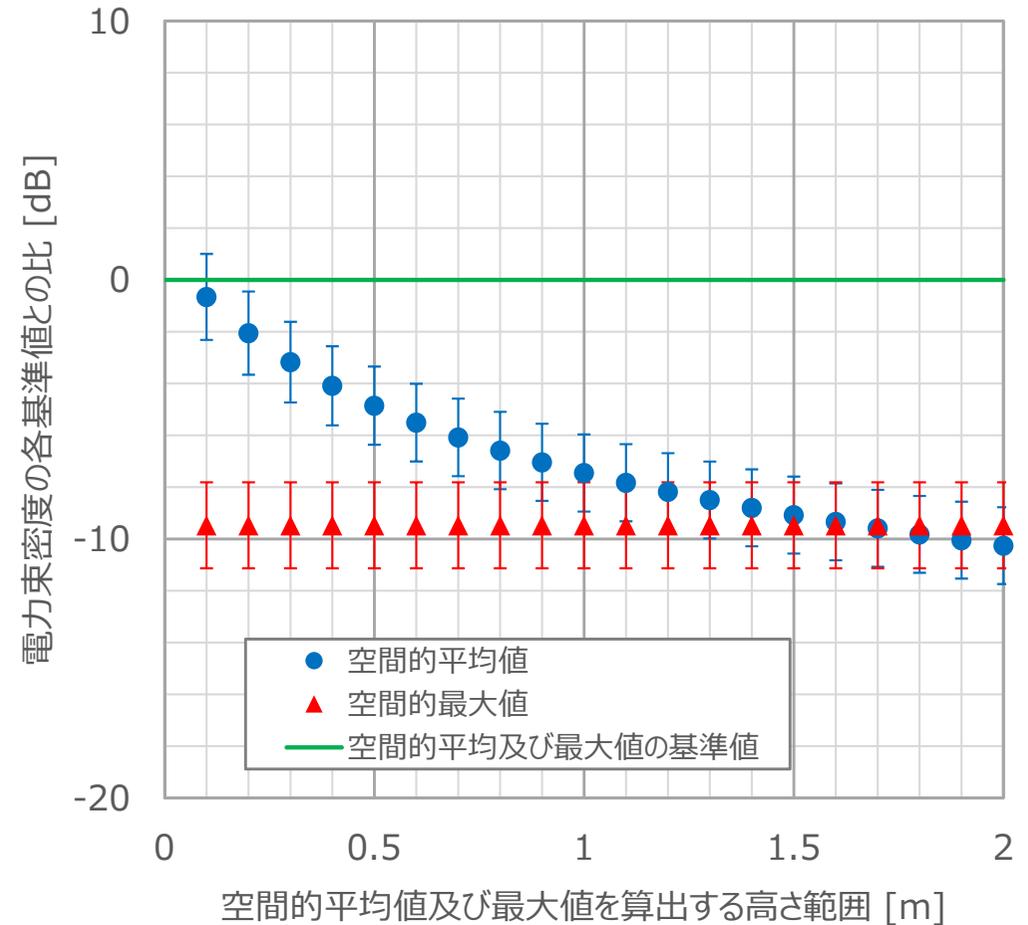
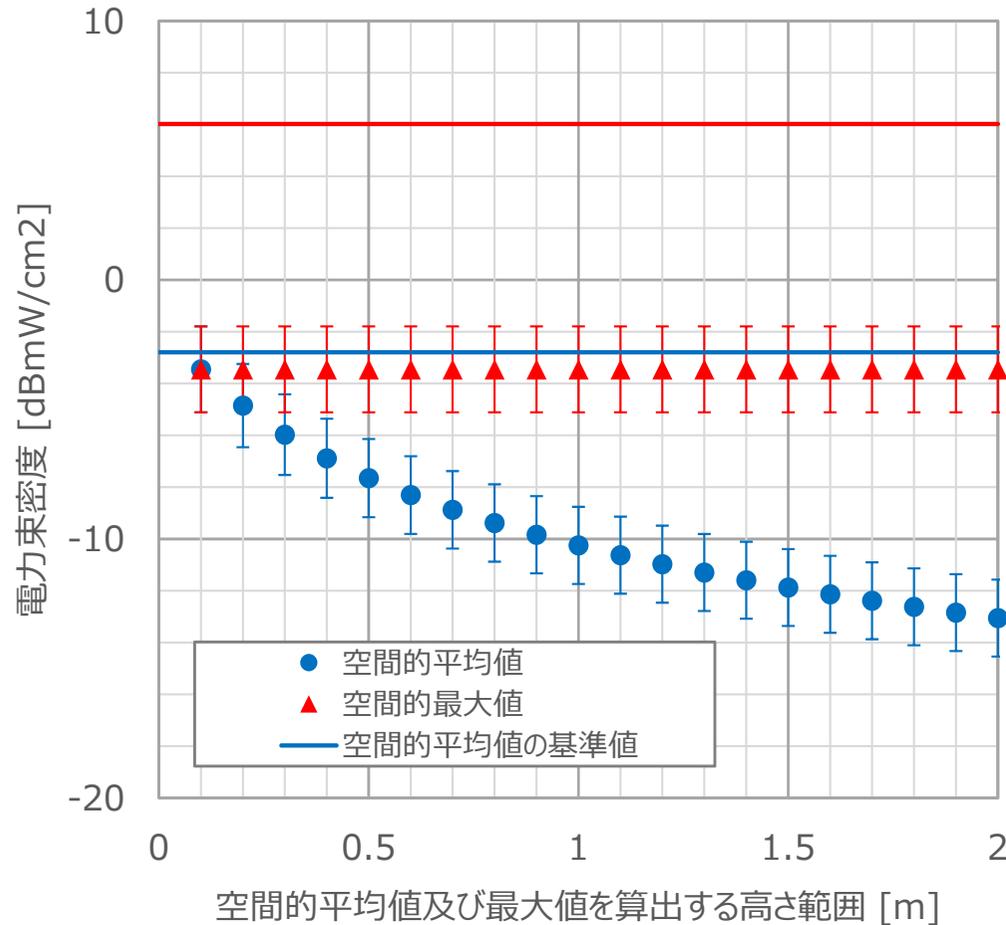
H1-6、1.5GHz帯、垂直設置、X方向



● 空間的平均値 ▲ 空間的最大値

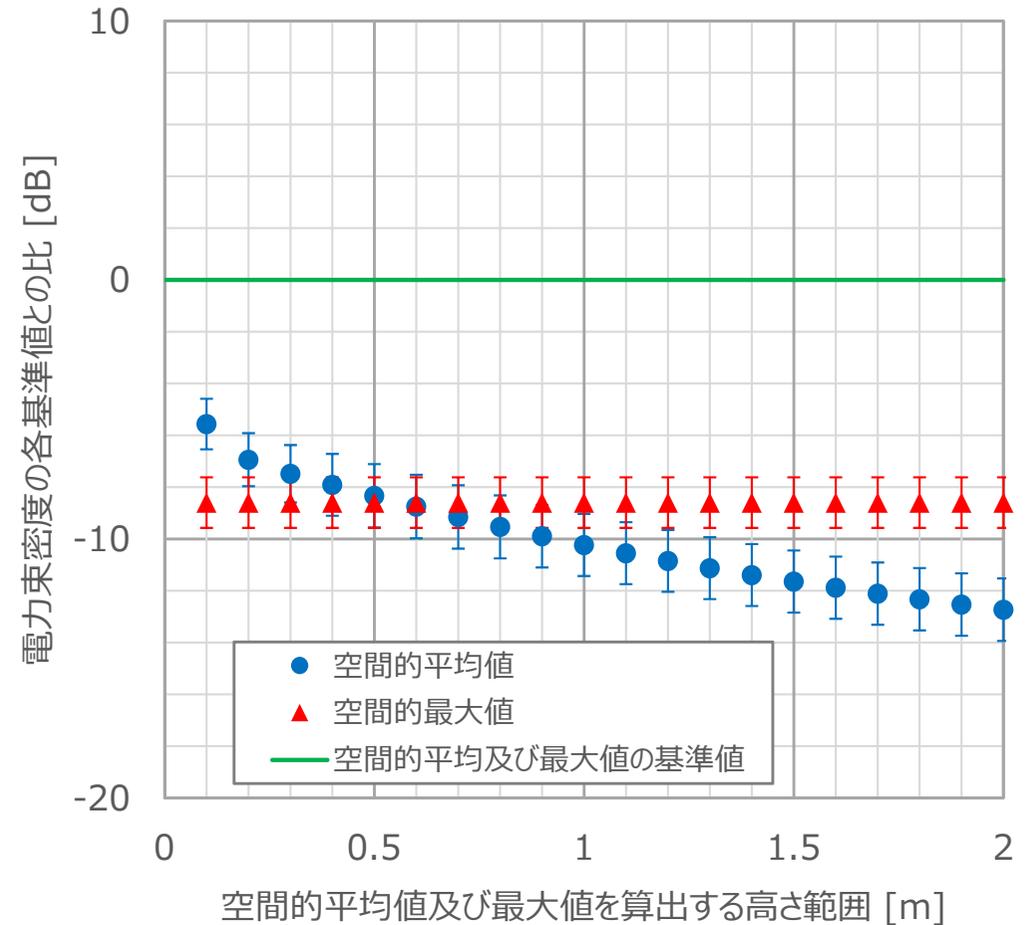
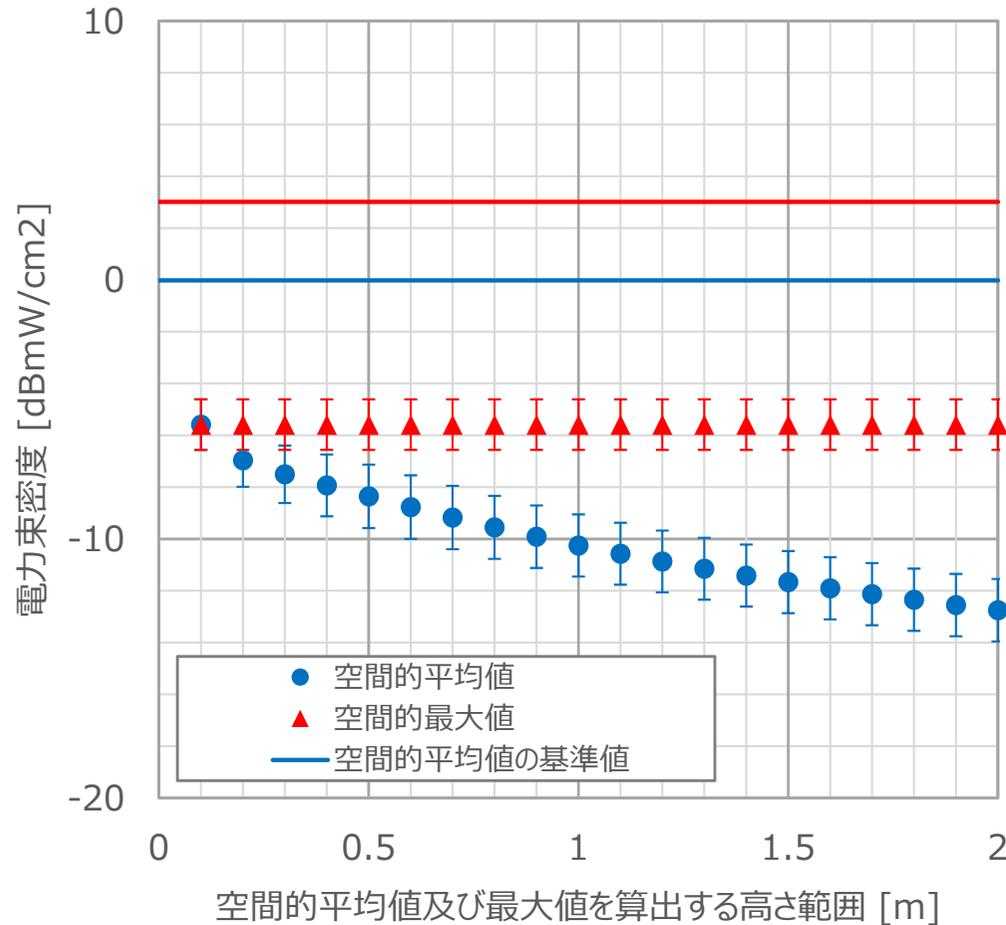
H1-6、1.5GHz帯、水平設置、Y方向

- 1GHz以下では、0.7m以上のほとんどの算出範囲において、空間的平均値の基準値との比が、空間的最大値のそれより大きく、適合性確認上重要と言える
 - **空間的平均値は算出範囲に依存するため、比較的身長が低い人を想定した算出範囲が必要な可能性を示唆**
- H1-9も、H1-6と同様の傾向、また垂直設置でも同様の傾向



H1-6、700MHz帯、水平設置、(X, Y)=(0, 0)

- 1GHz超では、0.7m以上の全ての算出範囲において、空間的最大値の基準値との比が、空間的平均値のそれより大きく、適合性確認上重要と言える
 - 上記の範囲においては、空間的最大値は算出範囲に依存しないため、従来の算出範囲で問題ない
- H1-9も、H1-6と同様の傾向、また垂直設置でも同様の傾向



H1-6、1.5GHz帯、水平設置、(X, Y)=(0, 0)

■ 算出範囲と基準値との比の結果考察

- 全体傾向
 - ・ 空間的平均値⇒算出範囲に依存
 - ・ 空間的最大値⇒算出範囲に依存しない（低い位置で最大値が得られる）
- 1GHz以下の傾向
 - ・ 比較的身長が低い人を想定した場合、空間的平均値の基準値との比が大きくなる
- 1GHz超の傾向
 - ・ 空間的最大値の基準値との比が大きくなる



- **地中埋設型基地局における電磁界強度の空間的平均値及び最大値の算出範囲は、比較的低い身長の方を想定した算出範囲を設定することが妥当と考えられる**
 - **最短で高さ0.7 mの範囲（一般に歩行可能となる1歳児の平均身長を参照）**
 - なお、周波数に応じた取り扱いについては、作業班でご議論頂きたい

- 基地局Ad-hocにおける地中埋設型基地局ばく露評価法に係る検討状況を示した
 - 第1回作業班で示した課題①及び②に対して、ARIBからの提案内容を示した
 - 第3回作業班で示した数値解析値については、吸収境界を適切に設定した値に改めた

参考1：基地局Ad-hoc検討スケジュール

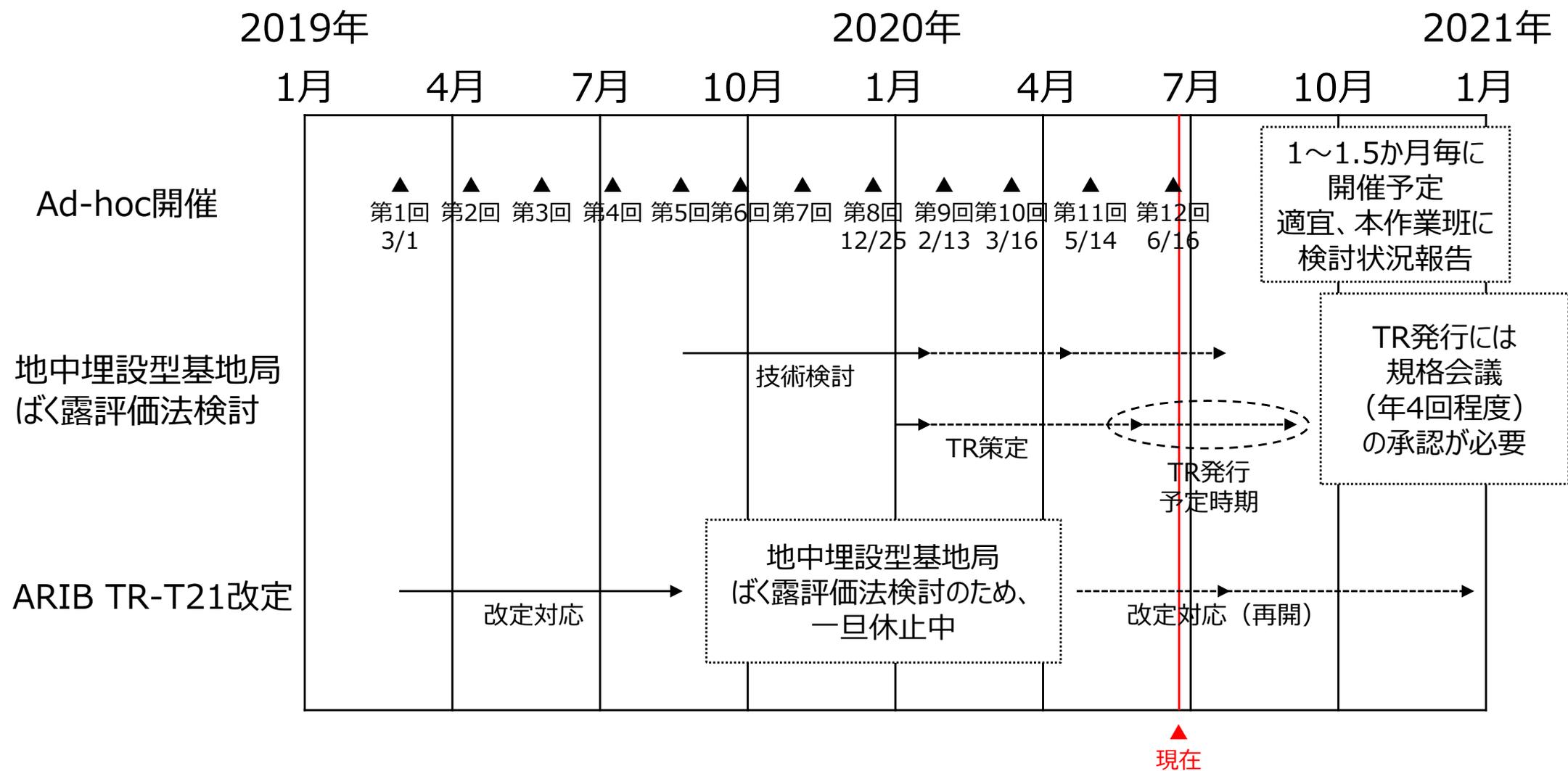


表1

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を超え3MHz以下	275	$2.18f^{-1}$		
3MHzを超え30MHz以下	$824f^{-1}$	$2.18f^{-1}$		
30MHzを超え300MHz以下	27.5	0.0728	0.2	
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。

平成29年総務省告示第309号より抜粋