

基地局等評価方法に関する 先行研究と評価事例

IEC TC106 MT3 Expert
ITU-T SG5 WP1 Q3/5 Delegate
石岡 諒汰
(株式会社NTTドコモ)

はじめに

- 基地局から発射される電波の人体ばく露量の評価方法が、国際電気標準会議（IEC）が発行するIEC 62232に規定されている。
- IEC 62232の最新版で規定されている測定内容のうち、今回の作業班審議の各検討項目に関連する先行研究と、IEC TR 62669で報告されている評価事例を概説する。

各検討項目に関連する先行研究及び評価事例

表 本作業班の各検討項目に関連する先行研究及び評価事例

検討項目	関連する先行研究等
① 局所SAR*1・全身平均SARによる電波ばく露量評価法	<ul style="list-style-type: none">・ファントムの妥当性・日本人モデルとの比較・同時発射時の評価方法・計算方法の妥当性・評価事例
② Actual maximum transmitted power or EIRP*2（以下、AMTP/AMEIRP）を考慮した電波ばく露量評価法	<ul style="list-style-type: none">・監視制御機能・評価事例
③ 通信トラヒック変動下における最大電波ばく露量評価法	<ul style="list-style-type: none">・外挿方法の妥当性・変調方式による影響・評価事例

*1: SAR: Specific absorption rate（比吸収率）の略。

*2: EIRP: Equivalent isotropically radiated power（等価等方放射電力）の略。

① 局所SAR・全身平均SARによる電波ばく露量評価法

- 測定に使用する人体ファントムの妥当性

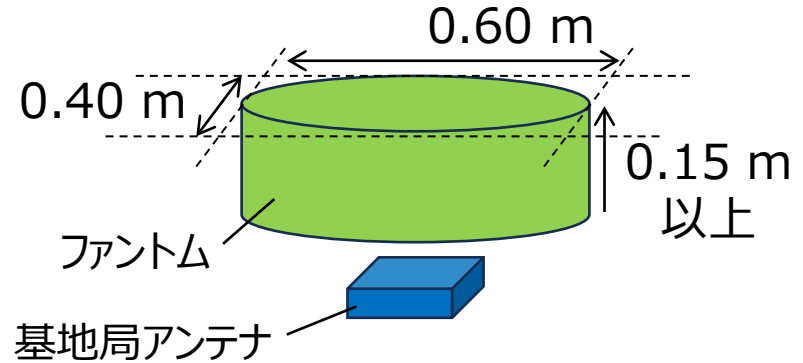
- IEC 62232では、下記 3 種類のファントムを規定している。
 - 楕円ファントム (IEC/IEEE 62209-1528で規定)
 - 大箱ファントム [1]
 - 小箱ファントム [2]
- 文献[1]によると、欧米やアジアの成人の身長や体重のデータを用いて、人口95%をカバーする現実的で、かつ保守的な単純な直方体モデルで近似。数値シミュレーションにより、解剖学的な成人モデル (Duke, Ella) に対して、保守的な結果が得られることを示している。
- また、文献[2]では、[1]と同様の方法で4歳以上の子どもを想定したファントムの直方体モデルを提案。数値シミュレーションにより、解剖学的な幼児モデル (Roberta) に比べて、保守的な結果が得られることを示している。

[1] M. -C. Gosselin *et al.*, "Estimation Formulas for the Specific Absorption Rate in Humans Exposed to Base-Station Antennas," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 53, no. 4, pp. 909-922, Nov. 2011.

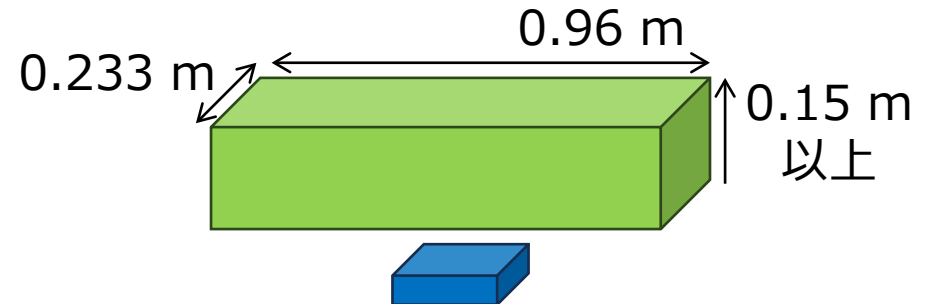
[2] B. Thors *et al.*, "Product compliance assessments of low power radio base stations with respect to whole-body radiofrequency exposure limits," *2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Gothenburg, Sweden, 2013, pp. 1762-1766.

(再掲) 局所SAR・全身平均SAR測定に用いるファントム

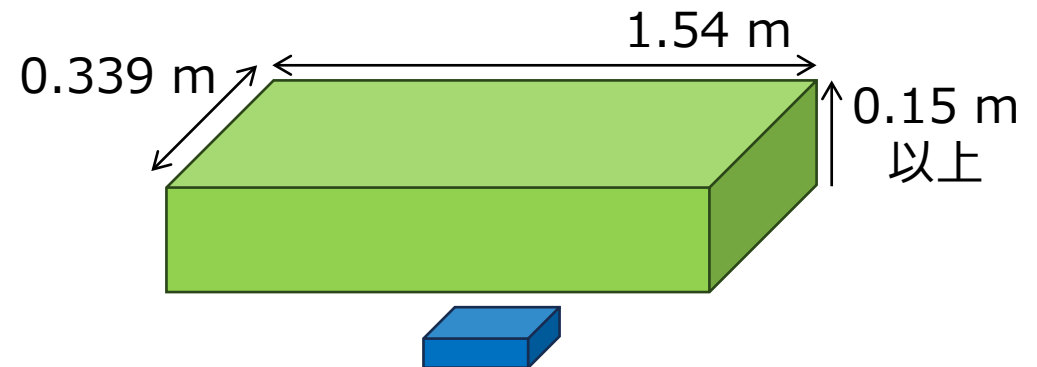
Elliptical phantom
(楕円ファントム)



Small box-shaped phantom
(小箱ファントム)



Large box-shaped phantom
(大箱ファントム)



① 局所SAR・全身平均SARによる電波ばく露量評価法

- 日本人モデルでの有効性

- 文献[3]では、700MHz帯及び3.5GHz帯において、大箱及び小箱ファントムを使用して得られた全身平均SARの測定及び数値シミュレーション結果が、日本人の解剖学的な成人モデル（Taro）を用いた数値シミュレーション結果に対して保守的な結果が得られることを報告している。
- さらに、文献[3]では、IEC62232で規定されている全身平均SARの計算方法についても、日本人の解剖学的な成人モデルを用いた全身平均SARの数値シミュレーション結果に対して保守的な結果が得られたことも報告している。

[3] T. Iyama et al., "Whole-body average SAR measurement using flat phantoms for radio base station antennas and its applicability to adult and child human models," *Annals of Telecommunications*, vol. 74, pp. 93–102 (2019).

① 局所SAR・全身平均SARによる電波ばく露量評価法

- 同時発射時の評価方法

- IEC 62232では、複数周波数で同時送信可能な基地局においても、携帯電話端末と同様、総合照射比（TER）による評価を求めている。
- 複数のアンテナから関連した信号を発射するMIMO*¹基地局においては、文献[4]において、各アンテナ間の距離が、波長の半分（ $\lambda/2$ ）よりも大きい場合、基地局アンテナ近傍（5cm未満）での局所SARの分布はほとんど重複せず、各アンテナを非相関波源（Uncorrelated）として扱うことができることを報告している。
- これを踏まえ、IEC 62232では、MIMO基地局において、各アンテナの間隔が $\lambda/2$ よりも大きく、かつ評価距離が5cm未満の場合は、同時発射時のSAR測定として、下記より選択することができるとしている。
 - 各アンテナから単独で発射したときの局所SARの最大値を選択
 - もしくは、全アンテナから同時に発射したときの局所SARを選択

*1: Multiple-input multiple-outputの略。

[4] F. Ghasemifard *et. al*, "Assessment of Combined SAR for Low Power Radio Base Stations with Multiple Antennas," 2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Dusseldorf, Germany, 2021.

① 局所SAR・全身平均SARによる電波ばく露量評価法

- 計算方法の妥当性

- IEC 62232では、基地局アンテナの仕様（周波数、電力、ビーム幅、人体との距離等）から全身平均SAR及び局所SARを算出するための、算出式が規定されている。
- 文献[1]において、解剖学的な人体モデルを用いた数値シミュレーションの結果と比較しており、距離20cm以上において成人モデル（Duke、Ella）に対して、全身平均SAR及び局所SARともに保守的な結果が得られたことが報告されている。一方、20cm未満では一部保守的な結果が得られなかったことから、IEC 62232:2025では、本算出式が使用可能な距離は波源から20cm以上離れた場所としている。

表 局所SAR・全身平均SAR計算法の概要（再掲）

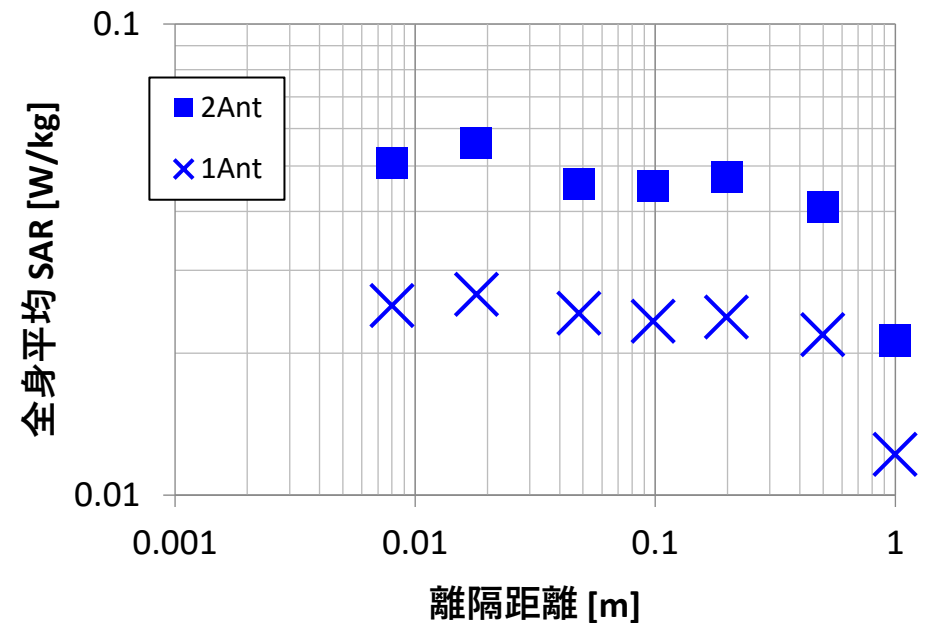
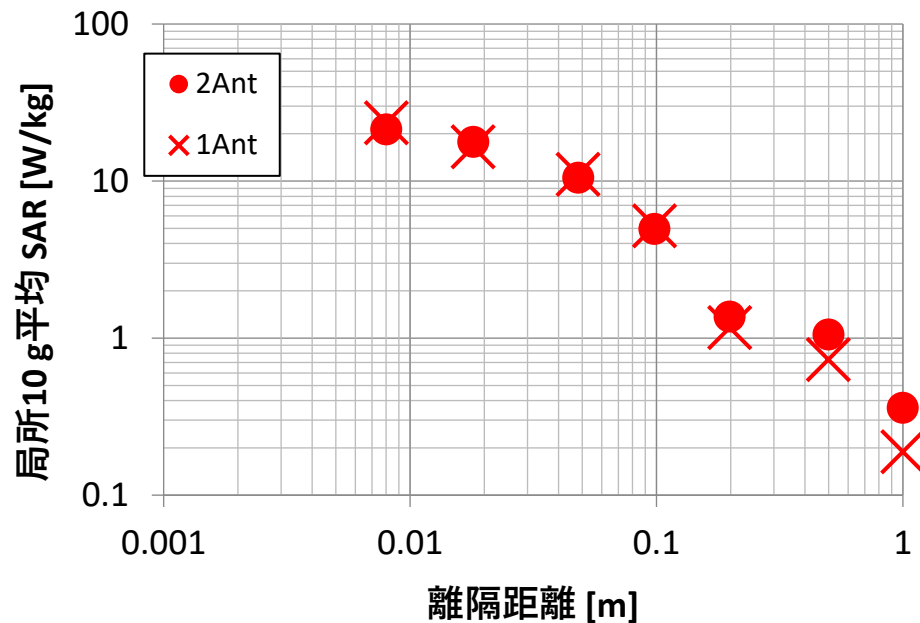
計算法	ばく露の種類	評価指標	周波数	適用可能な方向	適用可能な距離	評価対象
基本 (算出式)	局所	局所SAR	300 MHz ～5 GHz	Front	A mより大きな距離 Aは、0.2と $\lambda/2\pi$ の大きい方 距離はアンテナエレメントからの値	一般ばく露 職業ばく露
			600 MHz ～2.7 GHz	Back Axial	制約なし 距離はアンテナ背面プレートからの値	一般ばく露 職業ばく露
	全身	全身平均SAR	300 MHz ～5 GHz	Front	制約なし 距離はアンテナエレメントからの値	一般ばく露 職業ばく露

[1] M. -C. Gosselin *et al.*, "Estimation Formulas for the Specific Absorption Rate in Humans Exposed to Base-Station Antennas," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 53, no. 4, pp. 909-922, Nov. 2011.

① 局所SAR・全身平均SARによる電波ばく露量評価法

- 評価事例

- IEC TR 62669において、基地局アンテナが発した電波のSARを測定した事例が報告されている。
- 6.3節の事例では、3.5GHz帯の小型MIMO基地局（2アンテナ構成）を波源とし、大箱ファントムを用いて局所SAR及び全身平均SARを測定した結果を報告している。この事例では、局所SARの基準値を2W/kg、全身平均SARの基準値を0.8W/kgとし、これらの条件を満たす離隔距離を0.2m以上としている。



② AMTP/AMEIRPを考慮した電波ばく露量評価法

- 送信電力の制御・制御機能

- IEC 62232で規格化されたAMTPを考慮した電波ばく露量評価方法では、実運用上の送信電力のモニタ及び/または制御の実装を求めている。
- 一方、IEC 62232では実運用上の送信電力の具体的なモニタ及び制御方法については規定されていないが、一例として文献[5]の手法が紹介されている。
- 文献[5]では、EIRPの瞬時値の6分間平均を算出し、この値が閾値を超えないようモニタをする。閾値を超えそうな場合は、周波数リソース（リソースブロック）を動的に制限する。シミュレーション、実験室環境及び実環境の測定において、4G及び5G基地局から発射された電波の電力密度が、事前に設定した閾値以下に制御されていることを報告している。

② AMTP/AMEIRPを考慮した電波ばく露量評価法

- 評価事例（監視・制御機能）

- IEC 62669（2026年ドラフト版）では、AMTP/AMEIRPを考慮した電波ばく露評価法の評価事例がいくつか報告されている。
- 13.2節の評価事例では、3.85 GHz帯の5G Massive MIMO基地局が発した電波を、モニタ及び制御機能をONまたはOFFにした状態でそれぞれ測定している。
- 測定の結果、モニタ及び制御機能をONにした場合、測定した電力密度が、設定した閾値以下に収まっていることを報告している。

Figure 29. Measurement setup for validation case study A 及び
Figure 31. Measured time variation of the power density using TC2 より引用

② AMTP/AMEIRPを考慮した電波ばく露量評価法 - 評価事例（電力低減係数の設定）

- IEC 62669（2026年ドラフト版）の12.2節の評価事例では、Massive MIMO基地局が発射するビーム方向を2つのセグメントに分解し、片方のセグメント（seg 1）にのみ電力低減係数を設定した場合、制御機能がどの程度発生したのかを報告している。
- 99%ileとして、電力低減係数を-6 dBに設定した場合は、制御機能の発生が1日あたり平均2秒であった。一方、電力低減係数を-8 dBに再設定した場合は、制御機能の発生が1日あたり平均17秒間発生した。基地局の構成または環境条件に大きな変更がない限り、初期に設定された電力低減係数を維持することが重要であると結論づけている。

Figure 25. Counter verification of actual EIRP control on an operational site with two segments より引用

③ 通信トラヒック変動下における最大電波ばく露量評価法 - 復調器及びスペクトラムアナライザーによる測定

- IEC62232では、通信トラヒック変動下における最大電波ばく露量の評価方法が規定されている。5G方式では、基地局が周期的に送信する参照信号（SSB *¹）の1リソースエレメントあたりの電界強度を、全リソースへ外挿する方法が記載されている。
- 参照信号の電界強度の測定方法として、復調器を用いた方法とスペクトラムアナライザーを用いた方法がそれぞれ記載されている。文献[6]において、スペクトラムアナライザーを用いた測定方法では、測定器の設定が測定結果に影響を与えることが報告されている。
- これを踏まえ、IEC 62232では、スペクトラムアナライザーの中心周波数や帯域幅だけでなく、分解能帯域幅やビデオ帯域幅等についても推奨設定を記載している。

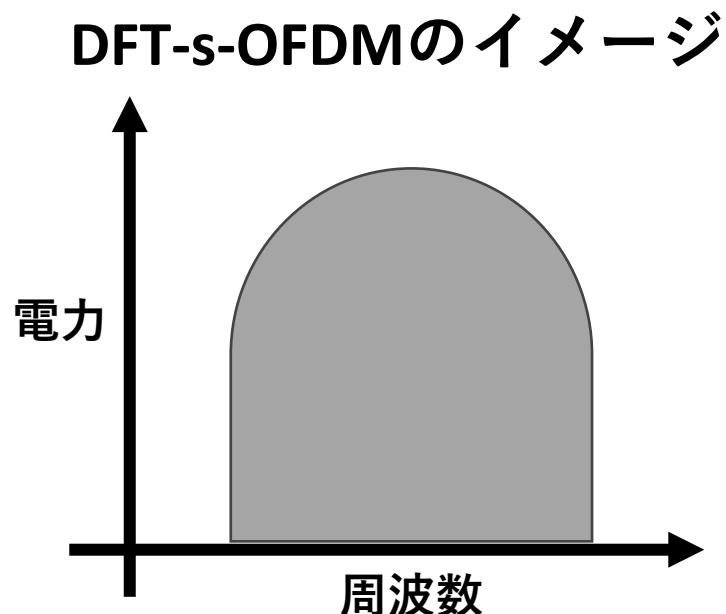
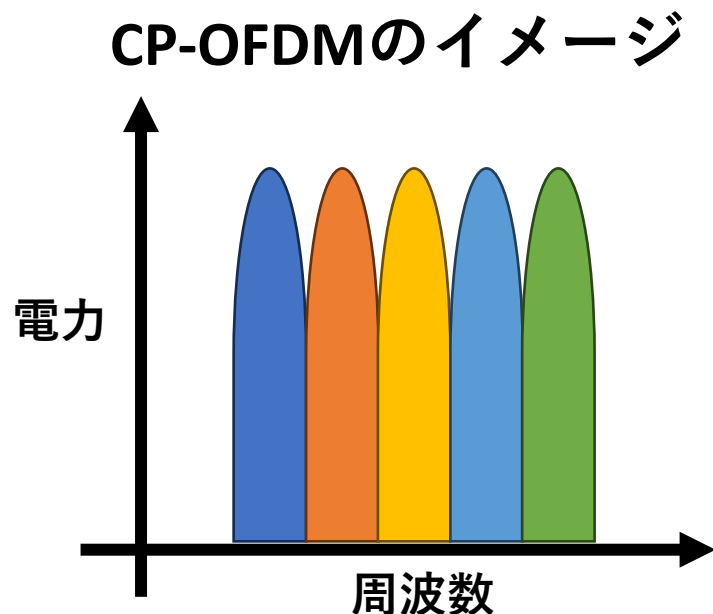
*1 SSB: Synchronization Signal Blockの略。

[6] S. Aerts *et al.*, "In-situ Measurement Methodology for the Assessment of 5G NR Massive MIMO Base Station Exposure at Sub-6 GHz Frequencies," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 184658-184667, 2019.

③ 通信トラフィック変動下における最大電波ばく露量評価法

- トラフィック信号と参照信号の違い

- 5G方式において、下り通信のトラフィック信号（PDSCH *¹）及び参照信号（SSB）はCP-OFDM *²方式を採用している。
- 弊社にてCP-OFDM方式の信号の一次変調をQPSKから256QAMへ変えながら、各変調条件におけるPAPR *³及び平均送信電力を測定した。測定の結果、一次変調方式の違いによるPAPRや平均送信電力の変化は確認されなかった。なお、上り通信で使用されるDFT-s-OFDM方式では、一次変調方式の違いによるPAPRの変化が確認された。



*1 PDSCH: Physical Downlink Shared CHannelの略。

*2 OFDM: Orthogonal Frequency-Division Multiplexing（直交周波数分割多重）の略。

*3 PAPR: Peak-to-Average Power Ratio（ピーク対平均電力比）の略。

③ 通信トラヒック変動下における最大電波ばく露量評価法 - 評価事例

- IEC 62669（2026年版ドラフト版）において、屋内のミリ波5G基地局からの電波ばく露量を外挿法により測定した事例が報告されている。
- 15.2節の評価事例では、高トラヒック環境下においてスペクトラムアナライザー（外挿無）により電界強度を測定した結果と、トラヒックがない環境下において復調器により電界強度を外挿により測定した結果をそれぞれ報告している。
- 測定の結果、基準値に比べて、スペクトラムアナライザー（トラヒック有、外挿無）の電界強度が-50.5 dB、復調器（トラヒック無、外挿有）の電界強度が-43.1 dB低い結果であったことが報告されている。外挿による評価法が、高トラヒック環境を模擬した評価結果に比べ、保守的な結果が得られたことを報告している。



表 各評価法における測定結果

測定方法	電界強度の結果 (基準値と測定値の比)
スペクトラムアナライザー (トラヒック有、外挿無)	-50.5 dB
復調器 (トラヒック無、外挿有)	-43.1 dB

まとめ

- 基地局等から発射される電波の人体ばく露量の評価方法に関する国際標準規格IEC 62232及びIEC TR 62669のうち、本作業班の検討項目に関連する先行研究及び評価事例について概説した。