

3-4 携帯電話基地局周辺の電磁界測定

渡辺聡一 浜田リラ

小型3軸等方性電界プローブ及びアンテナとスペクトラムアナライザによる比較的簡易な測定システムを用いた携帯電話基地局周辺の電界強度測定の不確かさ要因として、空間変動と時間変動について評価した。次に、これらの簡易な測定システムによる基地局周辺電界強度と国際標準規格に準拠した制御チャネル測定に基づく理論的な最大電界強度とを比較した。その結果、簡易測定システムによる測定値は理論的な最大電界強度から12dBの範囲で一致すること、先に検討した空間変動及び時間変動も考慮した場合の、総合不確かさは22dB程度であることが示された。多くの場合、基地局からの電波強度は電波防護指針よりも30dB以上低いため、簡易測定システムによる電波防護指針への適合性評価が可能であることが示唆された。

1 まえがき

過度に強い電波に人体がさらされた場合には、人体の健康に好ましくない影響が生じる可能性があり、これを防止するために、我が国では電波防護指針[1]が策定されている。電波防護指針では10MHzよりも低い周波数帯では体内に誘導された電界(電流密度)により神経が刺激される影響(刺激作用)が考慮され、100kHzよりも高い周波数帯では体内に吸収された電波のエネルギーによる体温上昇等による熱的な影響が考慮されている(100kHzから10MHzでは刺激作用と熱作用の両者を考慮する必要がある)。

本稿で対象とする携帯電話等では700MHz帯から3.5GHz帯の電波が使用されている。この周波数帯では熱作用を防止するための指針値が策定されている。熱作用は人体全身で吸収された電波のエネルギーによる熱的ストレスによる影響と人体の局所に吸収された電波のエネルギーによる局所的な加熱による影響が問題となる。本稿で対象としている携帯電話基地局からの電波への人体ばく露では、比較的遠方からの電波に人体全身が曝されるため、全身加熱による影響を防止するための指針値への適合性を確認する必要がある。

携帯電話基地局等の固定無線設備からの電波への人体ばく露における電波防護指針への適合性評価方法については、我が国では郵政省電気技術審議会答申[2]及び郵政省告示[3]として規定されている。また、国際標準規格として携帯電話基地局周辺の電磁界評価方法を定めたIEC規格[4]も策定されている。

国際標準規格においては、近年の携帯電話システムの進展に対して、再現性を確保しつつ、想定しうる最大強度の電波への人体ばく露量を評価する手法が規定

されている。特に、携帯電話基地局からの電波強度は、通信状況により変動することが知られており、短時間の測定では、最大の電波強度を測定できない可能性がある。そのため、国際標準規格では、通信状況によらず一定強度で送信される制御信号の強度を測定することで、最大の電波強度を算出する手法を用いている。しかし、制御信号の測定や、制御信号強度から最大の電波強度を算出するために必要な情報は、基本的に通信事業者しか知りえないものであり、第三者による客観的な評価による適合性評価手法が求められている。

また、基地局からの電波は空間的にも大きく変動することが知られている。電波防護指針への適合性を確認する際に、人体が占める空間における電磁界強度の平均を用いることができるが、空間平均の評価方法(評価ポイント)が各国で異なっており、国際標準規格においても各国で規定されている空間平均評価ポイントが列記されているだけであり、国際的に整合している状況ではない。

そこで、本研究では小型3軸等方性電界プローブやアンテナとスペクトラムアナライザ等の、比較的簡易な測定システムによる適合性評価の可能性について検討を行った。これらの測定装置を用いて、基地局周辺の電界強度を測定した際の時間変動や空間変動を評価し、不確かさ要因についての検討を行った。さらに、電波防護指針値に対して十分に大きなマージンがある場合において、短時間かつ簡便な手順で電波防護指針の適合性評価が可能であるかどうかを検証した。

2 基地局電磁界測定における平均空間の検討

2.1 方法

総務省による基地局周辺電磁界測定調査報告書 [5] から測定データを取得し、空間平均のための測定点数の違いの影響を検討した。本調査における測定方法を以下に述べる。

2.1.1 測定装置

測定用アンテナとして広帯域ホーンアンテナ (ダブルリジッドガイドアンテナ: EMCO 3115) を用いた。同アンテナは繊維強化プラスチック製のポールに固定され、スペクトラムアナライザ (アンリツ MS2721 A) に接続した。これら測定システムは樹脂製の台車に搭載された。測定装置概要 [5] を図 1 に示す。

スペクトラムアナライザの分解能帯域幅 (RBW) 等は測定対象信号 (変調方式) に応じて、以下のように設定した。

PDC

Personal Digital Cellular (PDC) 方式は我が国における第二世代携帯電話システムに用いられていた通信方式であり、2012年にサービス終了 (第三世代携帯電話システムに移行) している。PDC 方式は Time Division Multiple Access (TDMA) 変調方式を採用しており、我が国での 1 チャンネルあたりの帯域幅は 25 kHz (フルレート方式) である。そのため、スペクトラムアナライザの RBW は 30 kHz とし、測定対象の基地局で送信されている各周波数帯 (800 MHz 帯または 2 GHz 帯) における全てのチャンネルを含む周波数範囲のスペクトラム強度を測定した。なお、基地局からの下り信号 (ダウンリンク) はトラフィック状態により信号強度が変動するため、本測定においてはトラフィック状態の影響を受けない、制御チャンネルを測定した。

W-CDMA

Wideband Code Division Multiple Access (W-CDMA) 方式は我が国における第三世代携帯電話システムに用いられている通信方式であり、我が国では 5 MHz の帯域幅が用いられている。一方、本測定で用いているスペクトラムアナライザの RBW は 10 Hz ~ 3 MHz であり、W-CDMA 信号の帯域幅をカバーすることができない。そのため、信号帯域幅にわたる周波数範囲を一定の RBW 設定 (10 ~ 300 kHz の間で適宜設定) で掃引し、信号帯域幅にわたり積算した数値を測定電界強度とした。W-CDMA 信号は制御チャンネルも帯域幅中に拡散されるため、専用のデコーダを搭載していないスペクトラムアナライザでは、トラフィック状態の影響を受けない制御チャンネルのみを抽出した測定は不可能である。そのため、1 分間にわたりマックスホールドした値を用いた。

2.1.2 測定サイト

郊外 5 箇所、市街地 5 箇所の基地局を選定し、選定された基地局の主ビーム方向に沿って、一定間隔で測定を行った。この際、測定アンテナは地面から 1.5 m の高さに固定した。そして、1.5 m 高の測定で最大の電界強度が測定された地点において、大地上 10 cm から 200 cm までを 10 cm 間隔で測定を行った。測定場所の概要 [5] を図 2 に示す。

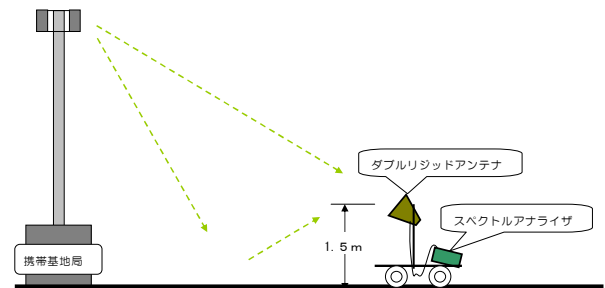


図 2 測定場所の概要 ([5] より転載)

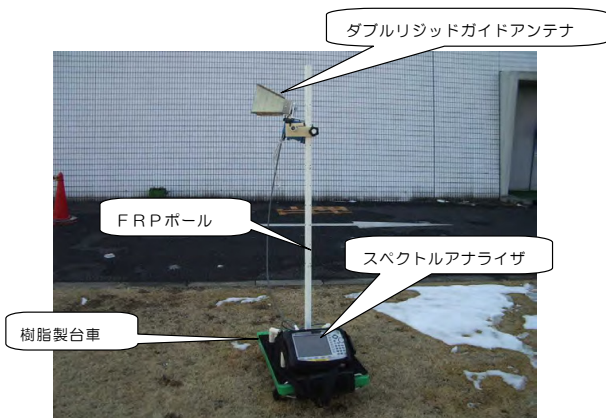


図 1 測定装置の概要 ([5] より転載)

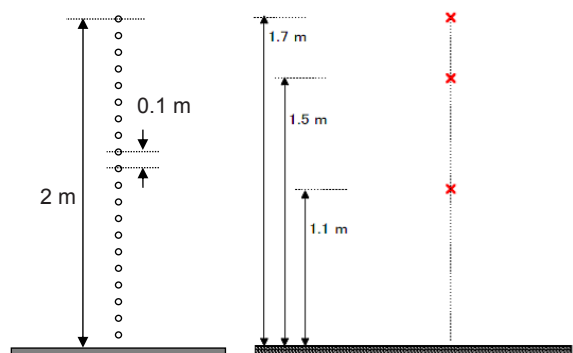


図 3 空間平均ポイント (左: 20 ポイント (総務省告示 300 号)、右: 3 ポイント (CENELEC 規格等))

2.1.3 空間平均ポイント

空間平均を行うポイントとして、郵政省告示 300 号 [3] で規定されている 20 点と CENELEC 規格 [6] 等で規定されている 3 点について比較検討を行う。いずれの測定ポイントも、大地に直立した成人の空間平均を評価するための評価ポイントとして、規定されている。各評価ポイントを図 3 に示す。

2.2 測定結果

図 4 に郊外 5 箇所及び市街地 5 箇所における基地局周辺電界強度二乗値 (800 MHz 帯) の空間平均値を示す。測定箇所により、測定結果は 2 桁 (20 dB) 以上大きく変動することが示されている。一方で、測定箇所の変動に比べて、空間平均ポイント (20 点及び 3 点) の違いによる測定値の差は小さいことが示されている。

図 5 に異なる空間平均ポイントでの空間平均電界強度二乗値の偏差 (20 ポイントを基準) を示す。郊外の 5 箇所については、3 点ポイントの空間平均値は 20 ポイントの空間平均値と同程度以上であり、最大で 60 % の過大評価であることが示されている。一方、市街地の 4 箇所 (urban A ~ D) については、3 点空間平均値は 20 点空間平均値に対して過大評価 (24 ~

56 %) であったが、1 箇所 (urban E) は大きく過小評価 (-40 %) であった。

図 6 に郊外 2 箇所及び市街地 4 箇所における基地局周辺電界強度二乗値 (2 GHz 帯) の空間平均値を示す。測定箇所により、測定結果は 1 桁 (10 dB) 程度変動することが示されている。一方で、測定箇所の変動に比べて、空間平均ポイント (20 点及び 3 点) の違いによる測定値の差は小さいことが示されている。これらの傾向は 800 MHz 帯での結果 (図 4) と同様である。

図 7 に異なる空間平均ポイントでの空間平均電界強度二乗値の偏差 (20 ポイントを基準) を示す。郊外については、3 点空間平均値は 20 点空間平均値と同程度以上であり、最大で 32 % の過大評価であることが示されている。一方、市街地については、3 点空間平均値は 20 点空間平均値に対して -38 ~ 42 % の範囲で変動した。

2.3 考察

2.3.1 空間平均値の比較

電波防護指針 [1] への適合性評価においては、全身加熱の影響の指標である全身平均 SAR で示された基礎指針値に対応する電磁界強度指針値の空間平均値を

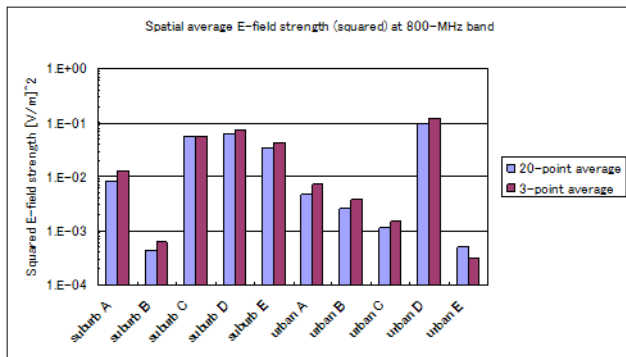


図 4 郊外 5 箇所及び市街地 5 箇所における基地局周辺電界強度二乗値 (800 MHz 帯) の空間平均値

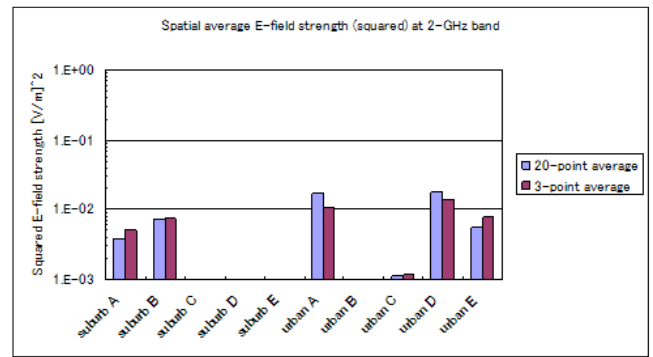


図 6 郊外 2 箇所及び市街地 4 箇所における基地局周辺電界強度二乗値 (2 GHz 帯) の空間平均値

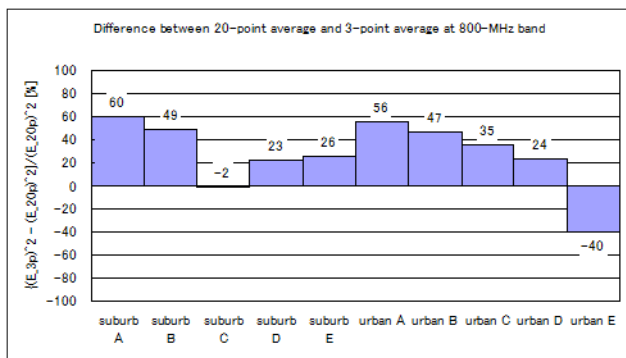


図 5 郊外 5 箇所及び市街地 5 箇所における基地局周辺電界強度二乗値 (800 MHz 帯) の空間平均値の比較 (20 点平均値に対する 3 点平均値の偏差)

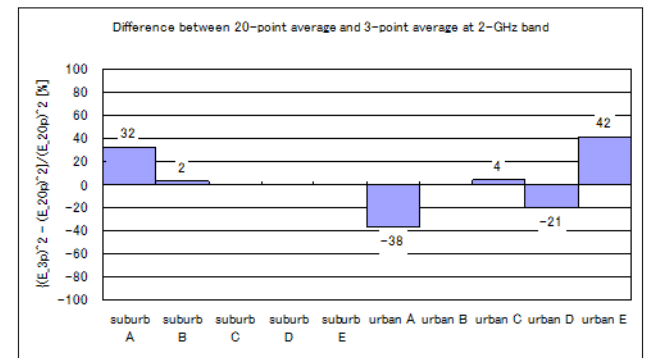


図 7 郊外 2 箇所及び市街地 4 箇所における基地局周辺電界強度二乗値 (2 GHz 帯) の空間平均値の比較 (20 点平均値に対する 3 点平均値の偏差)

用いた評価が適用できる。これは全身平均 SAR 値が全身にわたり平均された入射電磁界強度と関連しているとの前提に基づいており、郵政省告示 300 号 [3] で規定されている 20 点の平均ポイントは、人体全身の身長方向にわたり 10 cm 間隔で平均したものである。平均ポイントの最高点は 200 cm となり、日本人の平均身長を大きく上回るが、これは高所のアンテナから伝播する電波の垂直方向の強度分布が高所でより高強度となる特性を考慮しているためである。また、10 cm の間隔はおおむね 300 MHz 以上の周波数における電波の空間変動(定在波分布等)を考慮して規定されている。

以上より、理想的には電磁界強度測定値の空間平均を行う場合には、人体全身に相当する空間内について、電界強度の変動よりも十分に細かな間隔で測定をする必要がある。我が国の評価方法では 10 cm 間隔で 20 点の平均値をとることとしているが、欧州規格 [6] 等では 3 点の平均値をとることとしている。3 点平均値の場合、評価ポイントが少数であるため、測定時間を短縮できるという利点があるが、3 点平均値が全身平均値を適切に代表しているかどうかを確認する必要がある。

本調査研究では、郊外 5 箇所と市街地 5 箇所の携帯電話基地局について電界強度測定を実施し、20 点平均値と 3 点平均値を比較した。その結果、郊外ではおおむね 3 点平均値は 20 点平均値よりも過大評価となり、電波防護指針の適合性評価の観点からは妥当である可能性が示された。一方で、市街地では 3 点平均値は 20 点平均値に対して最大で 40 % の過小評価となることが示されており、3 点平均値を基地局周辺電界強度測定に適用することの妥当性については、慎重な検討が必要であることが示された。

各測定箇所における電界強度の高さ方向の分布を図 8、9 に示す。800 MHz 帯(図 8)において 3 点平均値が過小評価となる市街地の測定箇所(urban E)では、150 cm より高所では電界強度が大きく減少している

ことが示されている。一方、2 GHz 帯(図 9)において 3 点平均値が過小評価となる市街地の測定箇所(urban A と urban D)では、大地面付近の低所でも高所に比べて電界強度が同程度以上であることが示されている。いずれも、市街地での測定結果であることから、周囲の反射体等の影響により、局所的に高所の電界強度が減少し、逆に低所の電界強度が増強された場合には、3 点平均値では全身平均値(20 点平均値)に対して過小評価となることが示唆されている。なお、本測定結果では 800 MHz 帯(図 8)では高所の電界強度が減少し、2 GHz 帯(図 9)では低所の電界強度が増大しているが、この傾向が周波数の違いによるものかどうかは不明であり、今後、更なる測定例を取得するとともに、各周波数帯における電波伝搬特性についての理論検討が必要であろう。

2.3.2 不確かさ

本測定における不確かさ要因を下記に挙げる。

- アンテナ
 - アンテナ係数
 - 最大指向方向
 - 設置位置
- スペクトラムアナライザ
 - RBW
 - マックスホールド(平均時間)
- 基地局からの出力変動
 - 出力制御
 - トラフィック変動
- その他
 - 走査装置
 - フェージング
 - 周囲反射
 - 天候(気温・湿度)

以上のうち、20 点平均値と 3 点平均値の比較結果に影響を与えない系統的な不確かさとして、アンテナ係数・設置位置・RBW・出力制御・天候が挙げられる。これら以外の不確かさ要因を考慮したうえで、前節で

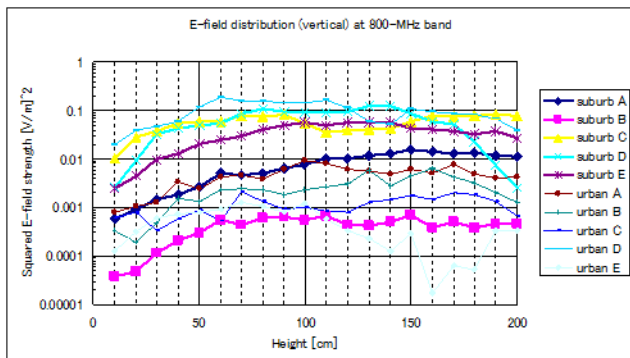


図 8 各測定箇所における電界強度二乗値の垂直方向空間分布(800 MHz 帯)

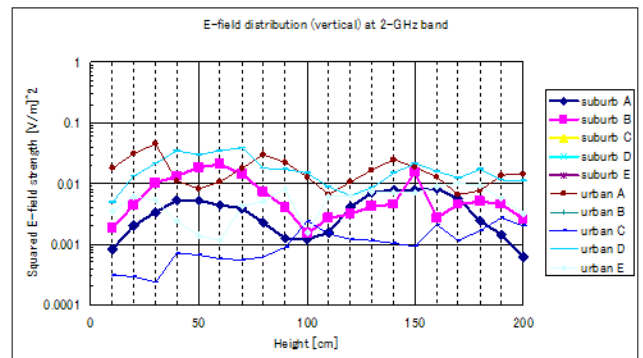


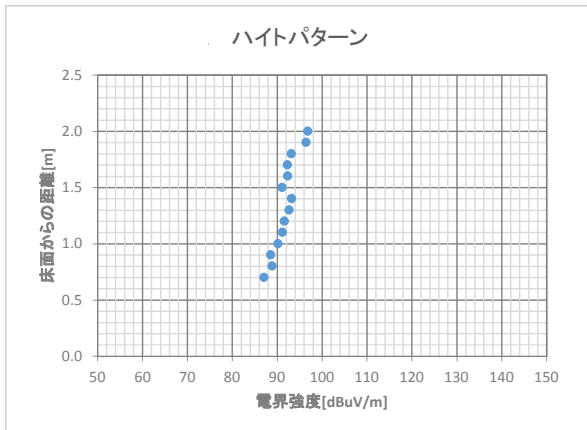
図 9 各測定箇所における電界強度二乗値の垂直方向空間分布(2 GHz 帯)

考察している空間平均値の妥当性について判断をする必要がある。

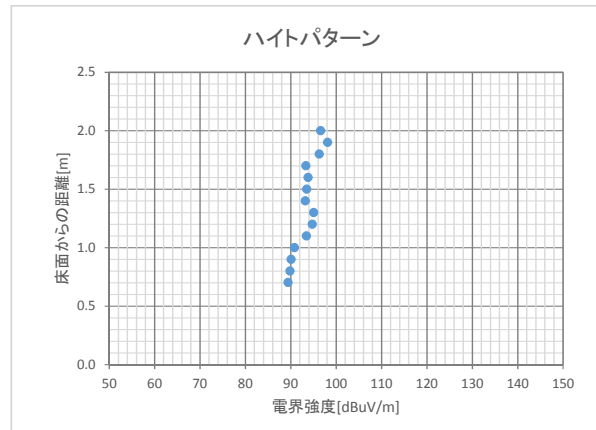
なお、IECの技術報告[7]では、電界強度測定の変換不確かさ(k=2)として3~5dB程度であることが例示されている。20点平均値と3点平均値の比較結果の不確かさはより小さくなるものと考えられるが、本調査研究で示された過小評価(最大40%(2.5dB))に匹敵する可能性があり、その場合には過小評価では

なく同程度であると判断するべきかもしれない。

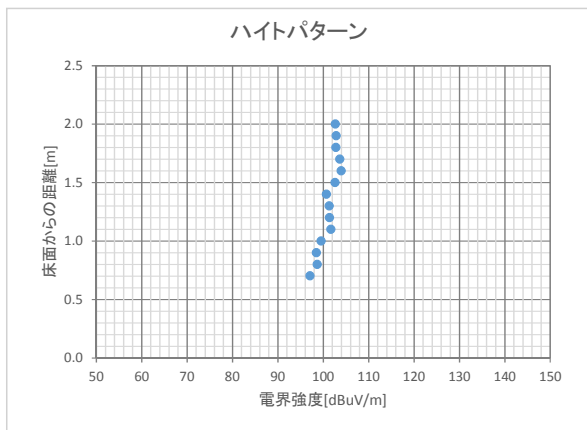
800 MHzと2 GHzにおける電波防護指針値(電界強度指針値)の二乗値は $2.0 \times 10^4 (\text{V/m})^2$ と $3.8 \times 10^4 (\text{V/m})^2$ であり、本調査研究における測定結果($\sim 10^1 (\text{V/m})^2$)に対して5桁(50 dB)以上のマージンがある。したがって、許容値に対して十分なマージンがある場合には、3点平均値はより多くの平均ポイントによる空間平均値に対して、ほぼ同等の評価結果を与



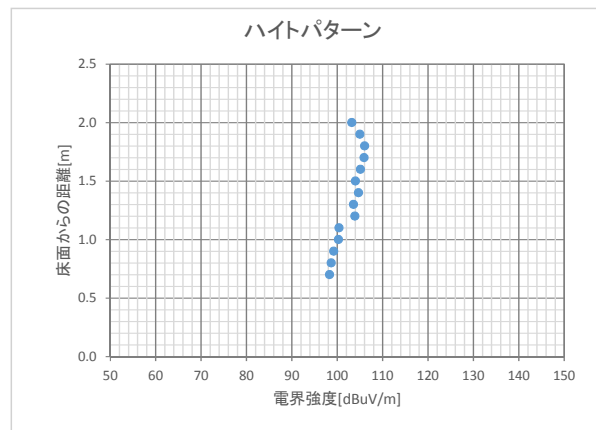
(a) 800-MHz W-CDMA



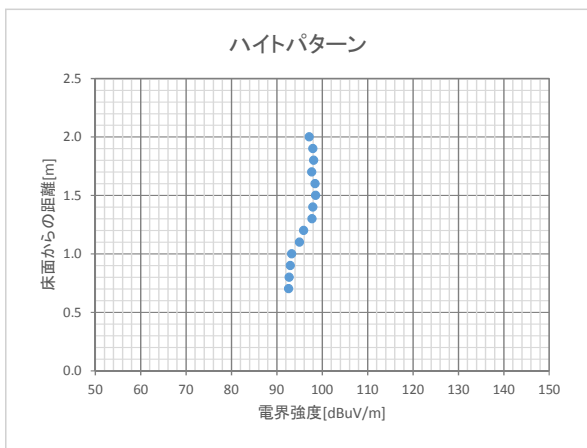
(b) 800-MHz LTE



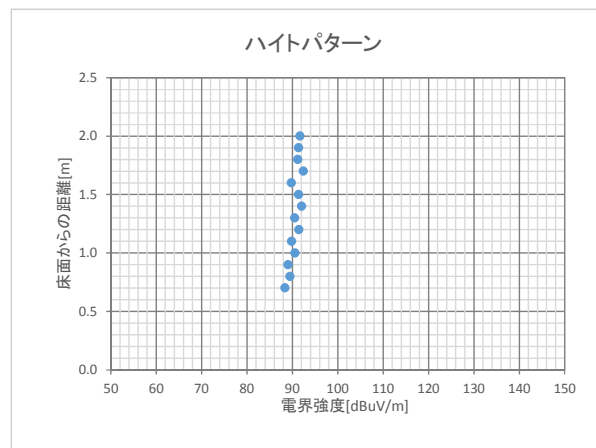
(c) 1.5-GHz LTE



(d) 1.7-GHz LTE



(e) 2-GHz LTE



(f) 2-GHz W-CDMA

図10 第3世代携帯電話(W-CDMA)および第4世代携帯電話(LTE)の基地局周辺電界強度測定の高さ特性(屋内測定)

えると結論できる可能性がある。これについては別節（小型3軸等方性電界プローブ等を用いた簡易評価についての検討）において、改めて検討する。

2.3.3 国際規格における空間平均値の規定

携帯電話基地局等の固定無線局周辺の電磁界測定方法に関する国際規格として、IEC 62232 [4] 及び ITU 勧告 K.61 [8] がある。両規格において、我が国で用いられている 20 点の空間平均方法が他の空間平均方法（3 点、6 点、9 点）とともに採用されている。しかし、いずれの規格においても、空間平均について十分な検討を行っているとはいえず、各国の規制当局が採用している空間平均手法を列挙している状況である。

基地局は携帯電話端末と異なり、各国のみで運用・監理されるため、評価方法に違いがあることで、製品の輸出等に影響を及ぼすことはない。しかし、電波の健康影響についての国際的な関心の高まりを受け、国ごとに異なる空間平均方法を用いることは、国際的に同一の仕様で運用される携帯電話システムのリスク管理として必ずしも適切な状況とはいえない。

したがって、各国の状況を踏まえつつ、客観的な知見に基づき適切な空間平均ポイントの国際的な整合性を確保するために、空間平均に関する評価検討を国際的な枠組みで実施していくことが望まれる。

なお、ITU 勧告 [8] の策定においては、勧告案を審議していた ITU-T/SG5 会合において、本調査研究で検討した評価データを寄書し、20 点平均値の妥当性を明らかにし、我が国で採用されている空間平均法を反映させたことを付記しておく。

2.3.4 本調査研究結果の他の携帯電話システムへの応用

本調査研究では第2世代携帯電話システム（PDC）と第3世代携帯電話システム（W-CDMA）について検討している。2016年時点で我が国では第2世代携帯電話システムのサービスは終了しているが、本評価結果は欧州等においてPDCと同じくTDMA変調方式を採用しているGSM携帯電話システムの評価の参考

になるかもしれない。ただし、空間平均値のための平均ポイントは変調方式よりも周波数の影響を強く受けるものと思われる。

2009年より商用サービスが開始されている第3.5世代／第4世代携帯電話システム（4G/LTE）では、下り信号についてはOFDM変調方式が採用されている。さらに、異なる周波数帯を同時使用するCA（Carrier Aggregation）や同じ周波数帯を上りと下りで共用するTD-LTE方式等のサービスが開始されており、第3世代携帯電話システムと比べて、基地局からの電波の時間的・空間的変動は大きく異なるものと思われる。したがって、今後、第4世代携帯電話システムの基地局周辺電磁界強度の空間分布についての詳細な検討が必要になるものと考えられる。

なお、以降の節（小型3軸等方性電界プローブ等を用いた簡易評価についての検討）において、屋内におけるW-CDMA及びLTE信号のハイトパターン測定を実施しているため、その結果を図10に示す。周波数及び変調方式に関して明確な傾向は示されていないものの、約10dB程度の変動があることが示されている。ただし、図8、9には、図10では測定していない床面に近い領域での測定値が上方での測定値に対して急激に減衰する傾向が示されている。したがって、今後、最新携帯電話システムの携帯電話基地局に対して、床面に低い領域や屋外を対象とした測定が必要であろう。

3 基地局周辺電磁界における平均時間の検討

3.1 方法

3.1.1 小型3軸等方性電界プローブ

小型3軸等方性電界プローブ（NARDA社SRM-3000）を用いて、第三世代携帯電話（W-CDMA）基地局からの電界強度を測定した。分解能帯域幅を100kHzに設定し、信号帯域幅（5MHz）にわたり積

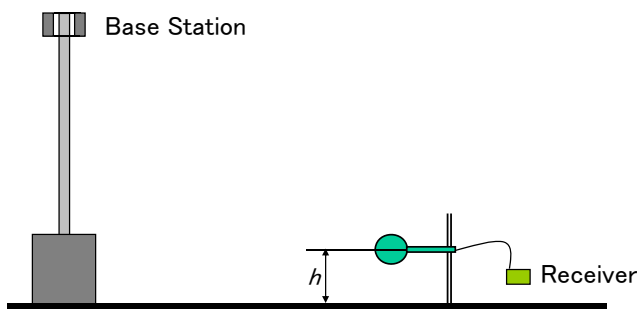


図11 電界プローブによる基地局周辺電界強度測定の概要

表 1 W-CDMA 基地局周辺電界強度の時間平均値

Time	10 s	20 s	30 s	40 s	50 s	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	6 min	1 h	24 h
Number of measurements	62	115	172	230	280	334	654	976	1299	1660	1940	174	1429
Average E-field [dB]	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.4	-0.3	-0.1	-0.1	-0.0	0	-4.0	-4.2

分した数値を測定値とした。800 MHz 帯及び 2 GHz 帯の W-CDMA 信号の中心周波数を含む 50 MHz の周波数スパンを設定した。その他の設定は Auto とした。

電界プローブは非金属製のポールに固定され、地上から 1.5 m の位置に設置された。概要を図 11 に示す。

3.1.2 広帯域アンテナ 3 軸電界測定システム

前節の小型 3 軸電界プローブに加えて、広帯域アンテナ (コニカルホーンアンテナ) を回転させる機構を備えた、3 軸電界測定システム (ARCS 社製 Field Nose) を用いて、基地局からの電界強度を測定した。本システムはコニカルホーンアンテナを 54 度傾けて、120 度刻みで回転させることで、3 軸等方性の電界強度測定を行うものである。

アンテナはシステム底面から約 0.5 m 程度の位置に設置されている。アンテナはドームに格納されており、屋外での長時間測定も可能な仕様となっている。図 12 に本システムの概要を示す。

測定において、小型 3 軸等方性電界プローブと同様に、RBW を 100 kHz に設定し、5 MHz の W-CDMA 信号帯域幅にわたり積分した数値を測定値とした。

3.1.3 測定サイト

測定場所は W-CDMA 信号を発射する東京近郊の携帯電話基地局の周辺 (見通し方向) とした。異なる基地局 2 箇所について 1 日 (測定サイト 1) または 1 週間 (測定サイト 2) にわたり長期測定を実施した。

1 週間測定 (測定サイト 2) の場合、6 分間までの平均時間においては小型 3 軸等方性電界プローブの場合

は 10 秒間隔で、広帯域アンテナ 3 軸電界測定システムの場合には 20 秒間隔で、測定値を取得した。また、同測定サイトで 1 時間以上の平均時間においては 12 分間隔で、測定値を取得した。

なお、次節以降で示す結果の図中では 1 日から 7 日間について、各 1 日ごとの時間平均値を示していることに注意されたい。例えば、3 rd day は 3 日間の時間平均値ではなく、3 日目の 1 日間 (24 時間) の時間平均値を示している。

3.2 測定結果

3.2.1 測定サイト 1 (小型 3 軸等方性電界プローブによる 1 日間測定)

小型 3 軸等方性電界プローブ (図 11) により、基地局からの W-CDMA 信号を 24 時間測定し、測定開始から各時刻までの時間にわたり平均した電界強度値を表 1 に示す。なお、測定値は電波防護指針で規定されている 6 分間平均値で規格化してある。また、1 時間及び 24 時間の平均値については、測定数が膨大となるため、適当に間引いた測定値を平均している。表中には、各平均時間で用いた測定値の個数も記載している。

10 秒から 6 分間にわたり平均時間を変化させた場合の時間平均値の変動は 0.4 dB 以下であり、前節で示されている測定場所や測定高さ等の空間的な変動に

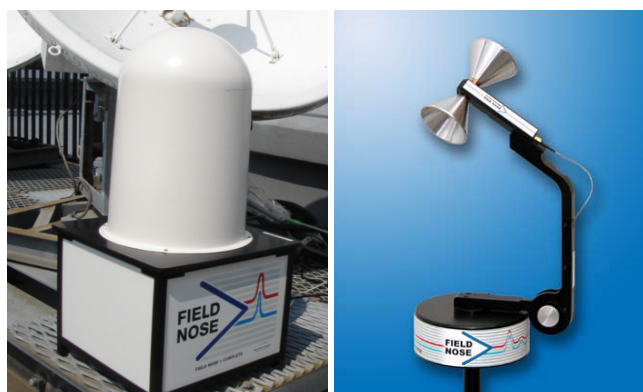


図 12 広帯域アンテナ 3 軸電界測定システム (左) とシステム内のコニカルホーンアンテナ (右)

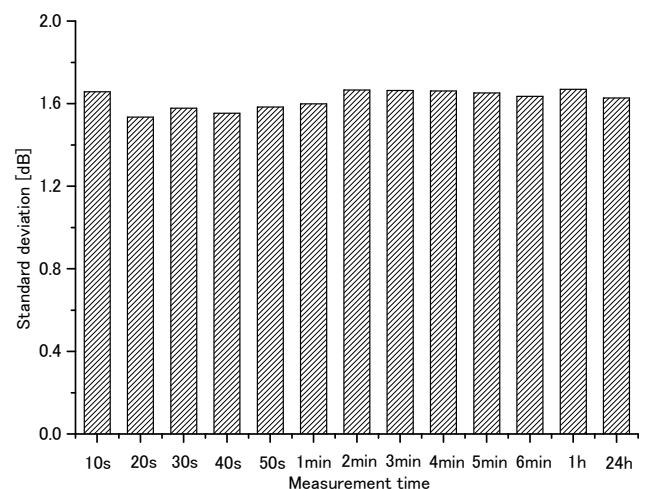


図 13 W-CDMA 基地局周辺電界強度の平均時間における測定値の相対標準偏差

比べて非常に小さいことが示されている。一方で、1時間または24時間にわたり平均した場合の値は6分間平均値よりも-4 dB程度減少している。

図13に表1の各平均時間における測定値の相対標準偏差を示す。10秒から24時間までのいずれの場合でも約1.6 dB程度の標準偏差となっていることが示されている。

3.2.2 測定サイト2 (小型3軸等方性電界プローブ及び広帯域アンテナ3軸電界測定システムによる1週間測定)

図14にW-CDMA基地局周辺電界強度の時間平均値を示す。広帯域アンテナ3軸電界測定システムの測定結果では、時間平均値が3分よりも短くなると、6分間平均値に比べて値が増大し、20秒では6分間平均値よりも約3 dB程度大きくなることが示された。一方で、より平均時間が長い場合では6分間平均値から1 dB以内であった。

小型3軸等方性電界プローブの測定結果では10秒から6分間の平均時間において、時間平均値は0.5 dB以内で一致した。一方で、1日以上平均時間では初日の6分間平均値に比べて2 dB以上減少する場合も示された。

図15に図14の平均時間における測定値の相対標準偏差を示す。広帯域アンテナ3軸電界測定システムによる測定値の標準偏差は、小型3軸等方性電界プローブによる測定値の標準偏差に比べて、約0.5 dB程度小さいことが示されている。また、前節の結果に比べて、小型3軸等方性電界プローブの測定値の標準偏差は約1 dB程度大きいことが示されている。さらに、いずれの測定システムにおいても、10秒から6分間の平均時間における標準偏差に対し、1時間以上の平均時間における標準偏差は0.5 dB程度増大していることが示されている。

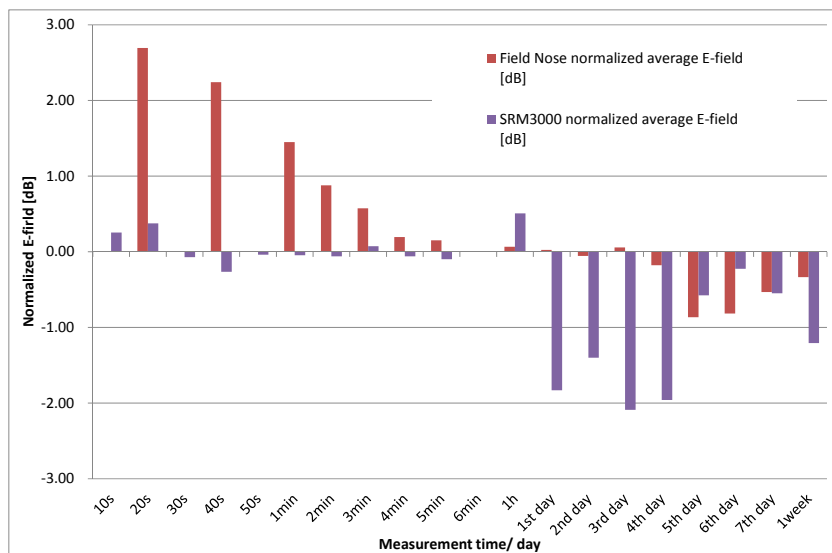


図14 W-CDMA基地局周辺電界強度の時間平均値(10秒から1週間)(赤:広帯域3軸電界測定システムによる測定値、紫:小型3軸等方性電界プローブによる測定値)(6分間平均値で規格化)

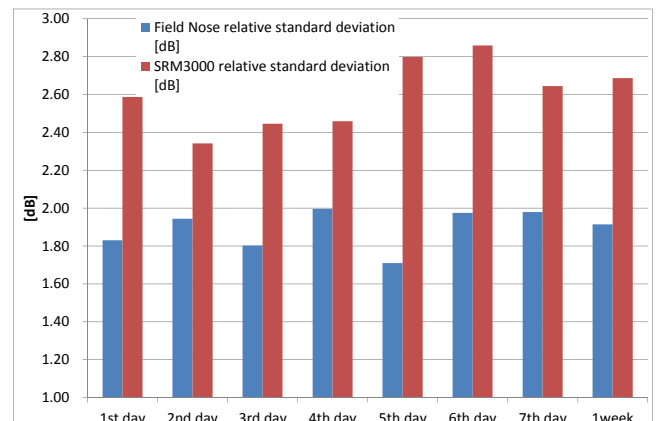
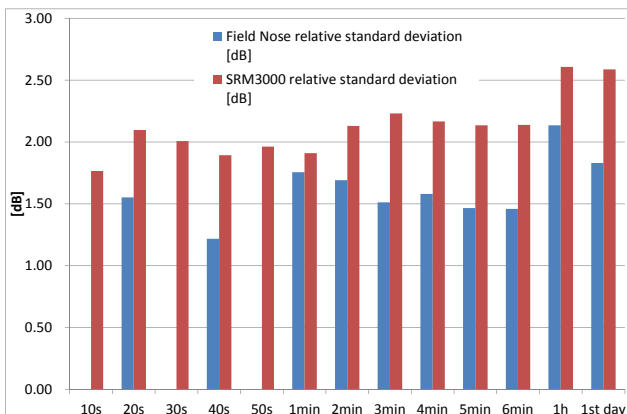


図15 W-CDMA基地局周辺電界強度の平均時間における測定値の相対標準偏差(左:10秒から1日間、右:1日から1週間)(青:広帯域3軸電界測定システムによる測定値、赤:小型3軸等方性電界プローブによる測定値)

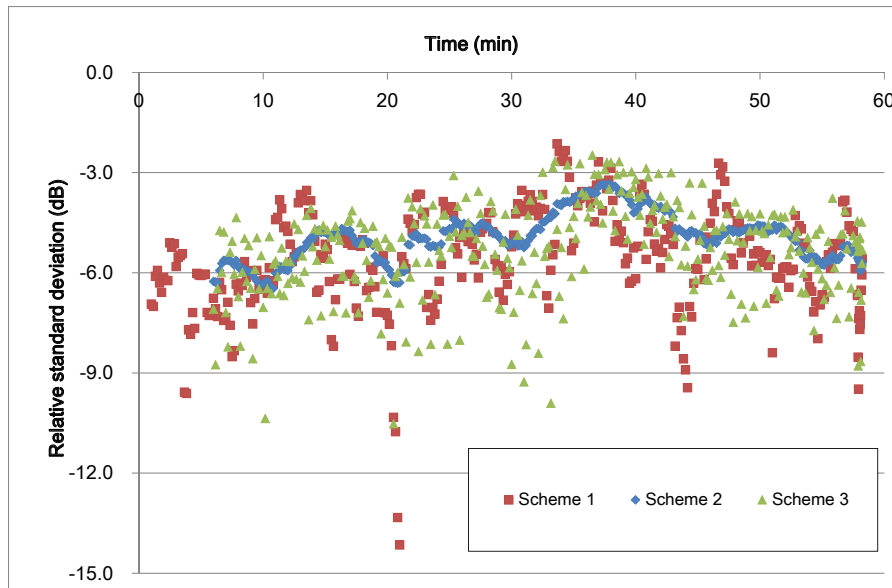


図 16 小型 3 軸等方電界プローブによる基地局周辺電界強度測定において、異なるサンプリング間隔・サンプル数による標準偏差の時間変動。(Scheme 1: 10 秒間隔で 7 サンプル (1 分間)、Scheme 2: 10 秒間隔で 37 サンプル (6 分間)、Scheme 3: 1 分間隔で 7 サンプル (6 分間))

3.3 考察

3.3.1 短時間における時間平均

小型 3 軸等方性電界プローブによる測定では、サイト 1 とサイト 2 の 2 箇所の基地局のいずれの場合においても、電波防護指針で規定されている 6 分間の平均時間よりも短い平均時間 (10 秒～) でも、測定電界強度の時間平均値は 6 分間平均値と 0.5 dB 以内で一致した。一方で、サイト 2 での広帯域アンテナ 3 軸電界測定システムでは平均時間が短くなると測定値が増大した (20 秒の平均時間では 6 分間平均値に対して 3 dB 程度増大)。

これは、それぞれの測定システムにおける測定データ処理の違いによるものと考えられる。小型 3 軸等方性電界プローブの場合、データ取得 (プローブ読み取り装置から PC へのデータ転送) の時間間隔は 10 秒としたが、測定装置内部では測定値の読み取りは高速に行われ、PC へ転送される測定値はある時間幅で積分 (平滑化) されているものと考えられる。一方で、広帯域アンテナ 3 軸電界測定システムによる測定では、PC に転送されるデータは転送時の瞬時値に相当する値であると考えられる。したがって、平均時間が短くなると取得データ数が少なくなるため、短い平均時間の場合の測定値は 6 分間平均値から大きく異なるものと思われる (平均時間 20 秒の場合には、1 データのみの測定値)。なお、本研究の広帯域アンテナ 3 軸電界測定システムによる測定では平均時間が短くなると測定値が増大する傾向も認められるが、測定サイト 1 箇所のみでの測定結果であるため、一般的な傾向であるかどうかについては、更なる検討が必要であろう。

W-CDMA 信号波形はランダムに変動しており、その変動速度は、本調査研究で検討している平均時間よりも十分に高速である。したがって、本調査検討で検討している時間平均は、より高速にランダムに変動している信号波形のサンプリング数の影響を検討することと等価である可能性がある。そのため、小型 3 軸等方性電界プローブのデータ取得間隔と平均時間 (平均値算出のためのサンプル数) を変化させた場合の標準偏差 (平均値算出に用いたサンプルの標準偏差) を評価した結果を図 16 に示す。

図 16 において、サンプル数が同じで平均時間 (データ取得時間間隔) が異なる Scheme 1 (10 秒間隔 & 7 サンプル) と Scheme 3 (1 分間隔 & 7 サンプル) は、ほぼ同様の標準偏差であることが示されている。一方で、Scheme 2 (10 秒間隔 & 37 サンプル) は Scheme 1 及び Scheme 3 とは異なる (時間変動が小さい) 標準偏差であることが示されている。

したがって、W-CDMA 基地局周辺の電磁界測定においては、平均時間よりも時間平均値を算出するためのデータ取得間隔とサンプル数が重要な要因であるものと考えられる。

3.3.2 長時間における時間平均

両測定サイトともに、6 分間よりも長い時間で平均した場合、6 分間で平均した場合に比べて、より大きく値が変動することが示された。この原因として、測定システムのドリフト等の測定誤差と携帯電話基地局の通信トラフィック変動等による出力レベルの変動が考えられる。そこで、サイト 2 における、小型 3 軸等方性電界プローブによる電界強度測定値の時間的変動

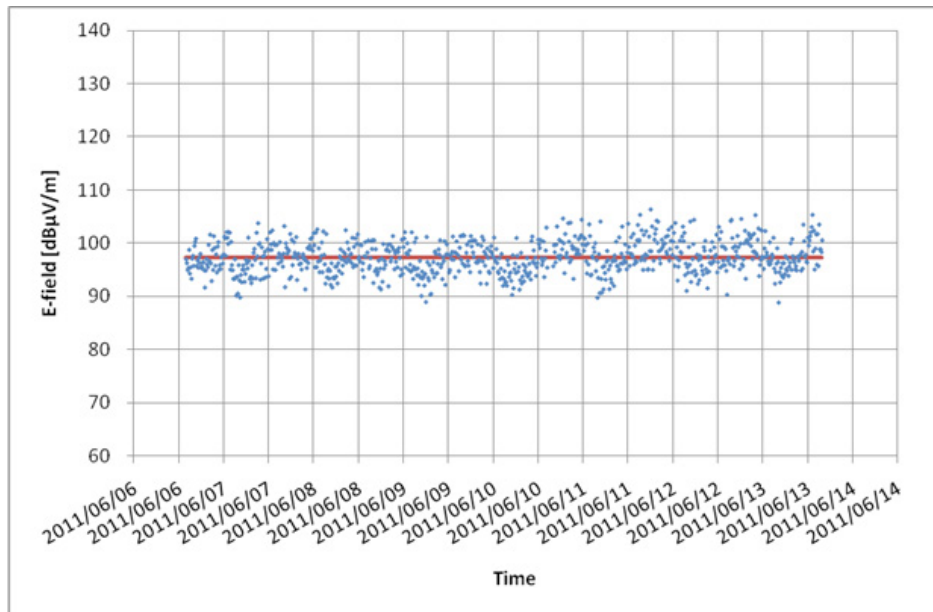


図 17 小型 3 軸等方性電界プローブによる W-CDMA 基地局周辺電界強度測定値の時間変動

を図 17 に示す。

図 17 において、明確な (10 ~ 20 dB 程度) の日周変動が確認できる。したがって、長時間の時間平均値の大きな変動は、通信トラフィック変動等による基地局の出力レベル変動が主要な要因であると考えられる。なお、図 17 の測定サイト・測定時期においては週末 (2011 /6 /11 -12) の変動が平日より若干大きくなっている傾向がみとれる。ただし、本測定は東日本大震災から 3 カ月後の都内で行われたものであるため、当時の特殊な状況 (計画停電等) の影響が含まれていることに留意する必要がある。

3.3.3 国際規格における時間平均の規定

基地局周辺電磁界強度の評価に関する IEC 国際規格 [4] では、電波防護指針値との適合性評価の際には時間平均を行うことを禁じている。すなわち、制御チャネル信号等の基地局の出力制御状態に依存しない電波

強度を測定し、理論上最大の電界強度を算出し、電波防護指針値への適合性評価を行うこととしている。一方で、測定環境におけるばく露状態の把握のためのデータ取得の際には時間平均を用いることの有用性にも言及している。

個々の基地局の運用開始前に実施する電界強度評価方法についての ITU 勧告 [9] では、平均時間についての明確な規定はないが、付録において 7 箇所の基地局周辺電界強度測定データに基づき、1 分間程度の平均時間が望ましいとの記述がある。当該データは韓国 (CDMA2000) における測定例であり、本調査研究と同じ小型 3 軸等方性電界プローブでの測定結果となっている。同勧告に示されている測定結果を図 18、19 に示す。

図 18 では、本調査研究における小型 3 軸等方性電界プローブの測定結果 (表 1、図 14) と同様に、6 分間

Table V.1 – Comparison of electric field strength (in dBμV/m) for different averaging times

Time (s) \ BS No.	360	180	60	40	10
1	109.14	109.14	109.16	109.14	109.08
2	109.80	109.79	109.79	109.79	109.80
3	107.07	107.07	107.09	107.07	107.11
4	111.59	111.55	111.60	111.63	111.81
5	92.56	92.36	92.34	92.33	92.56
6	90.41	90.28	90.76	90.84	90.74
7	97.38	97.26	97.39	97.40	97.67

図 18 韓国における携帯電話基地局周辺電界強度の小型 3 軸等方性電界プローブによる測定結果 ([9] より)

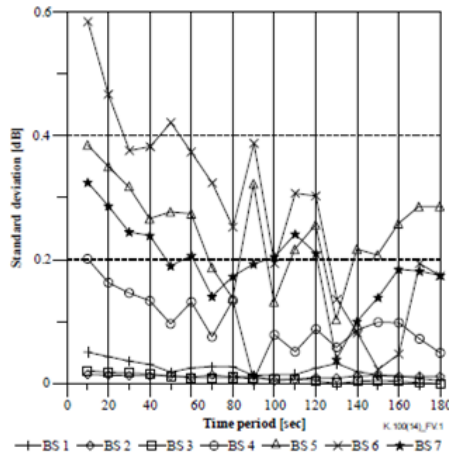


Figure V.1 – SD for different averaging times compared with that of 360 s

図 19 韓国における携帯電話基地局周辺電界強度の小型 3 軸等方性電界プローブによる測定の平均時間における標準偏差 ([9] より)

より短い時間の平均値は 6 分間平均値と非常によく一致している (0.3 dB 程度以内)。一方で、図 19 では平均時間が短い場合の標準偏差が増大しており、本調査研究における広帯域アンテナ 3 軸電界測定システムの測定結果 (図 14) と似通った傾向が示されている。しかしながら、標準偏差の絶対値は本調査研究の場合よりも 2 dB 以上小さく、最大でも 1 dB より十分に低いレベルである。これは、時間平均値を算出するための PC 等へのデータ転送手段の違いや測定対象の基地局信号の変調方式の違いが影響していることが考えられる。

いずれにせよ、測定電界強度は電波防護指針値 (約 155 dB μ V/m) に比べて数 10 dB 以上低いため、数 dB の不確かさの変動を根拠に、測定時間を増大させる平均時間の条件を規定することについては、より慎重な検討が必要であろう。

3.3.4 本調査研究結果の他の携帯電話システムへの応用

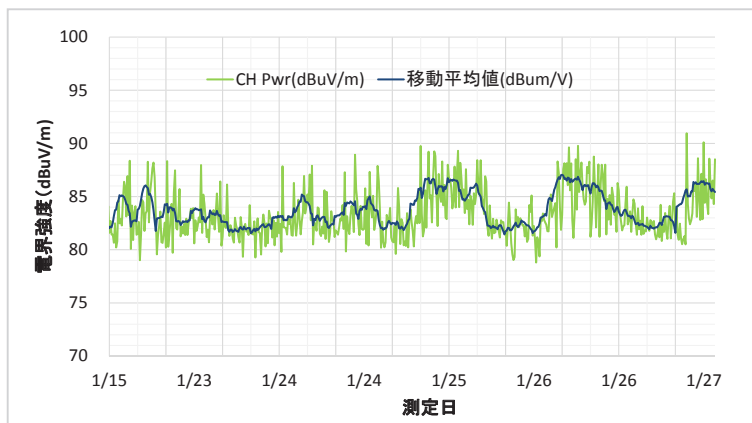
第 4 世代携帯電話基地局信号や最新無線 LAN シス

テムでは OFDM 変調方式を採用しており、本調査研究で対象とした W-CDMA とは異なる。しかしながら、時間的にランダムな信号波形の特性は共通しているため、サンプル数に依存する一般的な特性は同様であると考えられる。一方で、OFDM 変調方式では CDMA よりも瞬時ピーク値 (PAR 値) が大きくなることが知られており、時間平均値の標準偏差 (測定不確かさ) はより大きくなるものと予想される。

そこで、東京近郊の LTE 方式と W-CDMA 方式の基地局 (2 箇所) からの周辺電界強度について 9 ~ 12 日間の測定を実施した結果をに示す。なお、測定には 4 で用いた広帯域アンテナとスペクトラムアナライザを用いた。測定は 12 分ごとに行っている。スペクトラムアナライザはマックスホールドの設定としており、12 分間ごとにリフレッシュしている。図中には測定データ 10 点 (120 分) の移動平均値も示す。測定サイト及び LTE 方式と W-CDMA 方式間に顕著な差異は認められず、図 17 と同様の傾向であることが示されている。

なお、偏差が 20 dB を大きく超過する場合があるが、極端に測定値が低くなる場合であり、同時刻の周辺のデータから不自然に低下していることから、測定システムのデータ取り込みの不具合が原因である可能性がある。また、10 点の移動平均値については、10 dB 以下の偏差であることから、ある程度の時間にわたりデータを平均することで、長期間の変動幅を圧縮することができることが示されている。ただし、電波防護指針では 6 分間の時間平均値が適用されるため、本検討で実施した 120 分の移動平均値の特性は、適合性評価試験に直接適用することはできないことに注意が必要である。

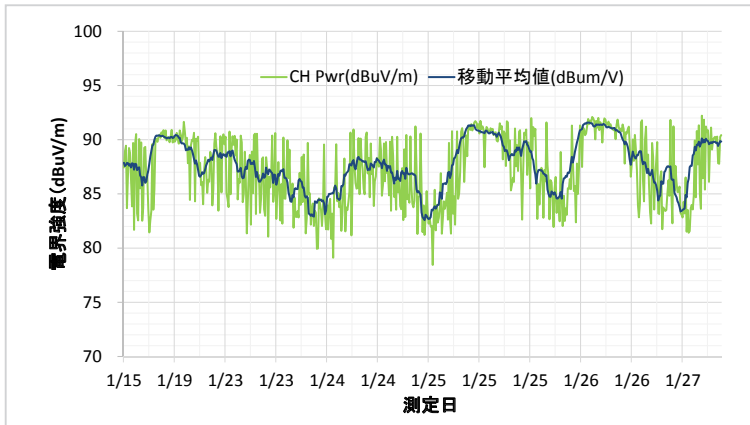
第 4 世代携帯電話システムや次世代 (5 G) 携帯電話システムでは、今後、TD-LTE 方式や CA、MIMO 等の利用の普及により、時間変動特性はより複雑化す



(1) 800 MHz 帯 CDMA

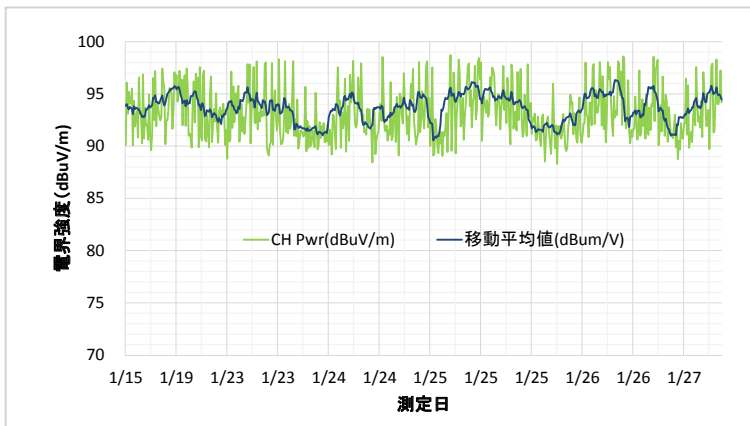
最大値	91 dB μ V/m
最小値	79 dB μ V/m
偏差	12 dB
最大値 (移動平均)	87 dB μ V/m
最小値 (移動平均)	81 dB μ V/m
偏差 (移動平均)	6 dB

3 無線機器の試験技術の研究開発



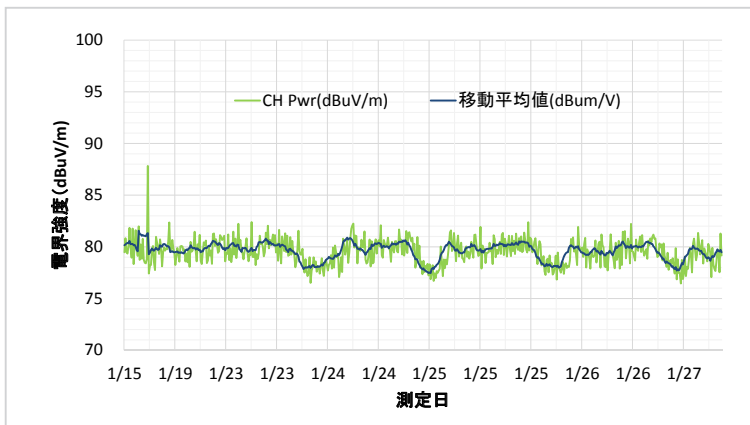
(2) 800 MHz 帯 LTE

最大値	92 dB μ V/m
最小値	78 dB μ V/m
偏差	14 dB
最大値 (移動平均)	92 dB μ V/m
最小値 (移動平均)	83 dB μ V/m
偏差 (移動平均)	9 dB



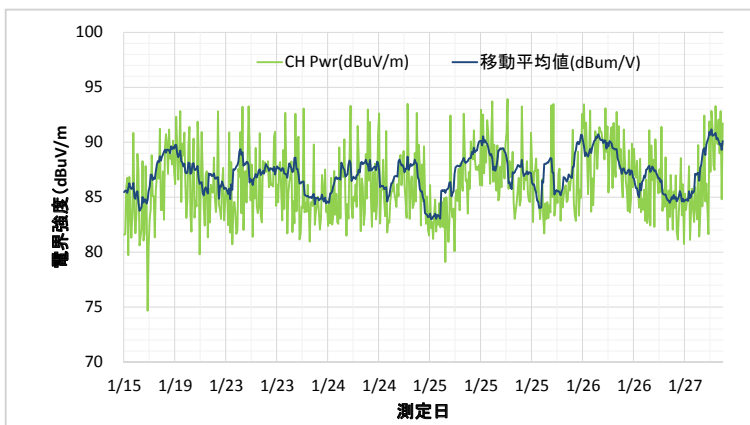
(3) 1.5 GHz 帯 LTE

最大値	99 dB μ V/m
最小値	88 dB μ V/m
偏差	10 dB
最大値 (移動平均)	96 dB μ V/m
最小値 (移動平均)	91 dB μ V/m
偏差 (移動平均)	5 dB



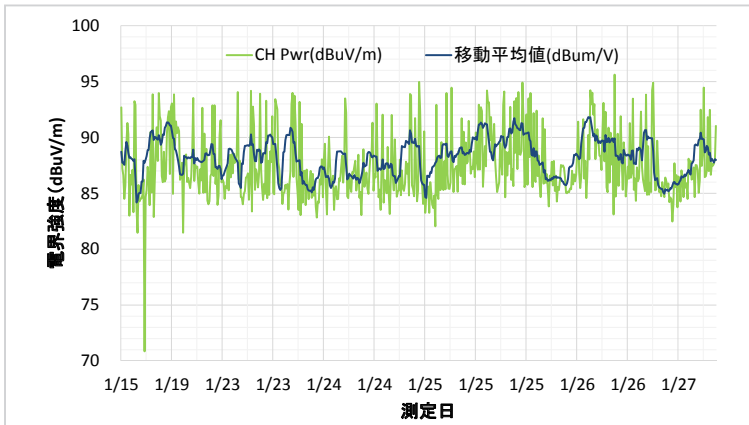
(4) 1.7 GHz 帯 LTE

最大値	88 dB μ V/m
最小値	76 dB μ V/m
偏差	11 dB
最大値 (移動平均)	82 dB μ V/m
最小値 (移動平均)	77 dB μ V/m
偏差 (移動平均)	5 dB



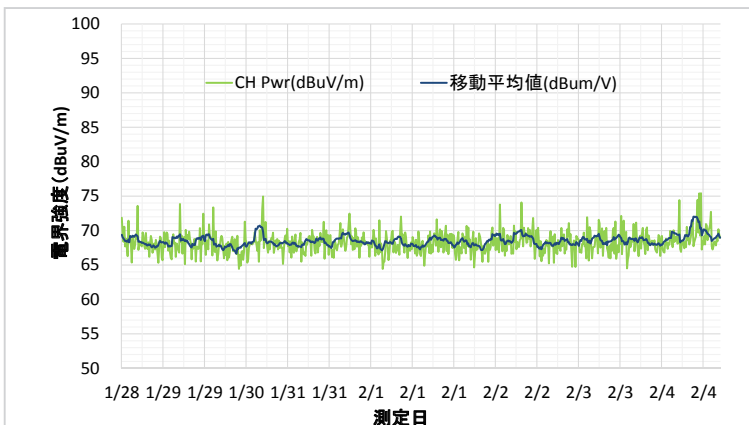
(5) 2 GHz 帯 LTE

最大値	94 dB μ V/m
最小値	75 dB μ V/m
偏差	19 dB
最大値 (移動平均)	91 dB μ V/m
最小値 (移動平均)	83 dB μ V/m
偏差 (移動平均)	8 dB



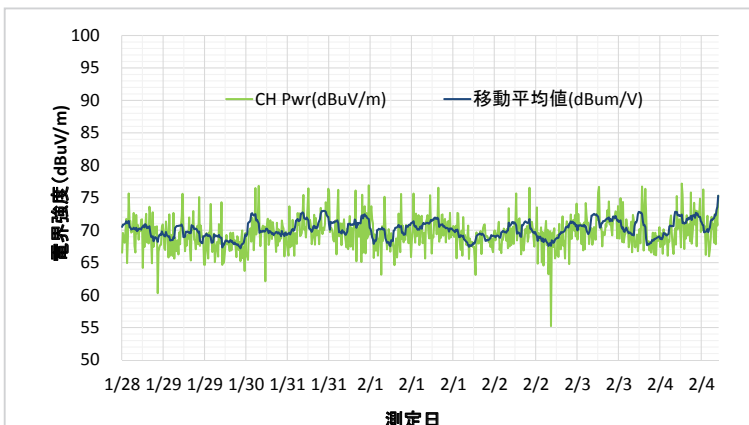
最大値	96 dB μ V/m
最小値	71 dB μ V/m
偏差	25 dB
最大値 (移動平均)	92 dB μ V/m
最小値 (移動平均)	84 dB μ V/m
偏差 (移動平均)	8 dB

(6) 2 GHz 帯 W-CDMA
(A) サイトAでの測定結果 (屋内)



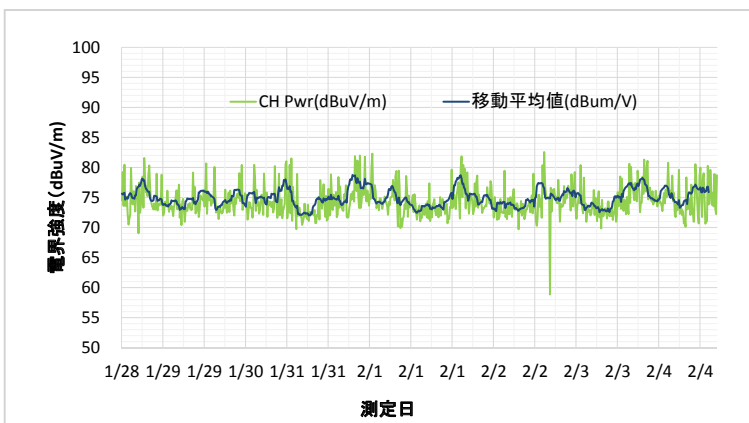
最大値	75 dB μ V/m
最小値	64 dB μ V/m
偏差	11 dB
最大値 (移動平均)	72 dB μ V/m
最小値 (移動平均)	67 dB μ V/m
偏差 (移動平均)	5 dB

(1) 800 MHz 帯 W-CDMA



最大値	77 dB μ V/m
最小値	55 dB μ V/m
偏差	22 dB
最大値 (移動平均)	75 dB μ V/m
最小値 (移動平均)	67 dB μ V/m
偏差 (移動平均)	8 dB

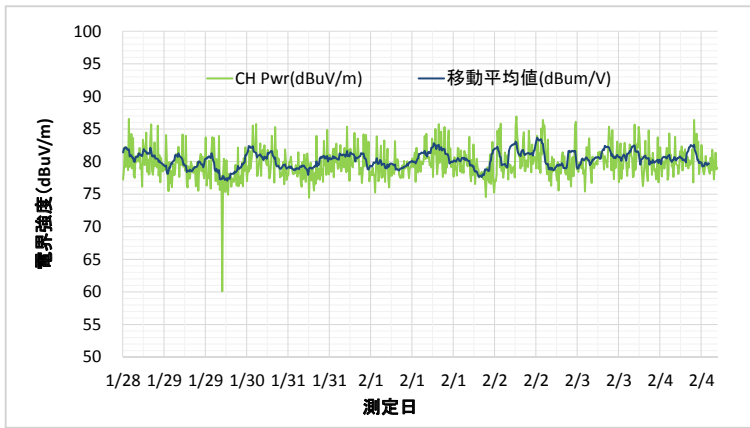
(2) 800 MHz 帯 LTE



最大値	83 dB μ V/m
最小値	59 dB μ V/m
偏差	24 dB
最大値 (移動平均)	79 dB μ V/m
最小値 (移動平均)	72 dB μ V/m
偏差 (移動平均)	7 dB

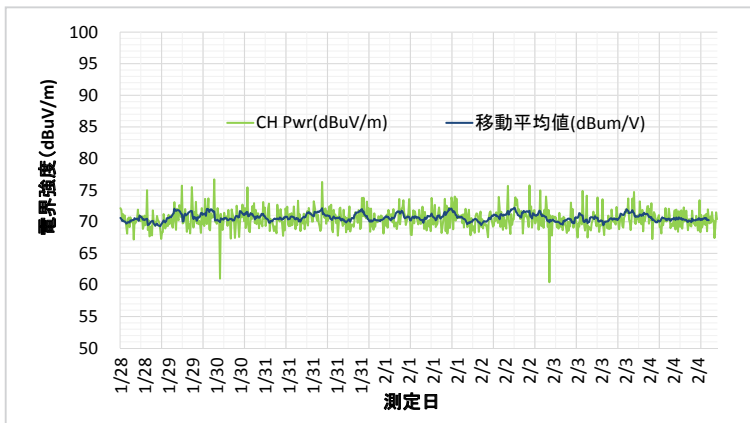
(3) 1.5 GHz 帯 LTE

3 無線機器の試験技術の研究開発



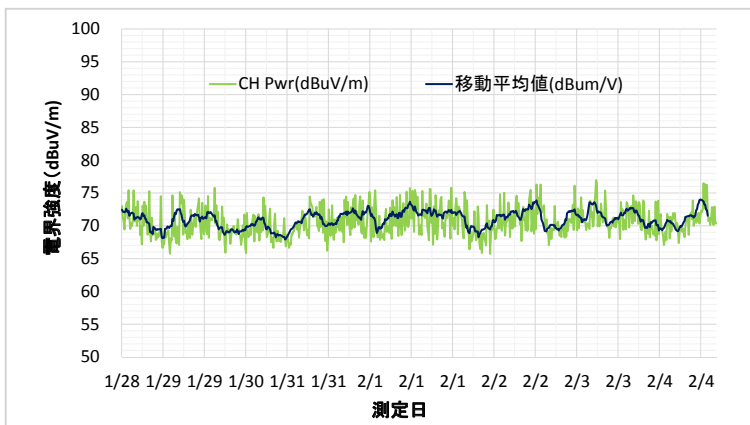
(4) 1.7 GHz 帯 LTE

最大値	87 dB μ V/m
最小値	60 dB μ V/m
偏差	27 dB
最大値 (移動平均)	84 dB μ V/m
最小値 (移動平均)	77 dB μ V/m
偏差 (移動平均)	7 dB



(5) 2 GHz 帯 LTE

最大値	77 dB μ V/m
最小値	60 dB μ V/m
偏差	16 dB
最大値 (移動平均)	72 dB μ V/m
最小値 (移動平均)	69 dB μ V/m
偏差 (移動平均)	3 dB



(6) 2 GHz 帯 W-CDMA
(B) サイト B での測定結果 (屋内)

最大値	77 dB μ V/m
最小値	66 dB μ V/m
偏差	11 dB
最大値 (移動平均)	74 dB μ V/m
最小値 (移動平均)	68 dB μ V/m
偏差 (移動平均)	6 dB

図 20 W-CDMA 方式及び LTE 方式の携帯電話基地局 (2 箇所) 周辺の電界強度の長期間測定結果。CH Pwr 値は 12 分間のマックスホールド値。移動平均値は連続する 10 点 (120 分) の測定値の平均値。測定場所はいずれも屋内

るものと予想されるため、引き続きより詳細な検討が必要であろう。

4 小型 3 軸等方性電界プローブ等を用いた簡易評価についての検討

4.1 方法

4.1.1 測定装置

小型 3 軸等方性電界プローブ (NARDA 社製 SRM-3000) 及び広帯域アンテナ (コニカルダイポールアンテナ; ARC 社製 PCD8250) にスペクトラムアナライ

ザー（アンリツ社製 MS2713 E）を接続した測定システムのそれぞれにより、電界強度測定を実施した。

いずれの測定システムにおいても、RBW 設定は 100 kHz とし、信号帯域幅にわたり積分した。また、約 20 秒間にわたりマックスホールドした。当該条件で、6 分間（18 サンプル）にわたり測定データを取得した。測定中の小型 3 軸等方性プローブと広帯域アンテナを図 21 に示す。

4.1.2 測定サイト

東京都内の第 3 世代携帯電話（W-CDMA）及び第 3.9 世代／第 4 世代携帯電話（LTE/4 G）の基地局（1 箇所）の周辺電磁界強度を測定対象とした。測定対象とした基地局で運用されている全ての周波数帯及び通信方式についてそれぞれ測定を行った（表 2）。また、屋内で測定を行った。

各サイトにおいて、電界プローブまたはアンテナを床面から 1.5 m の位置に非金属製のポールで固定して測定を行った。

4.2 結果

表 2 に示す全 6 種類の搬送周波数&変調方式の組み合わせについて、図 22 に測定結果を示す。同図には、同じ場所・日時に実施された IEC 国際規格 [4] に準拠した制御チャンネル測定に基づく最大電界強度推定値と電波防護指針の電界強度指針値（一般環境）も示す。

いずれの条件においても、6 分間にわたる測定値の変動は 3～8 dB 程度であった。これらの測定値は、IEC 国際規格準拠の制御チャンネル測定に基づく最大電

界強度に対して -12～9 dB の範囲で一致した。また、これらの測定レベル・推定レベルは電波防護指針に対しておおむね 60 dB 以上低いことが示されている。

4.3 考察

本検討結果より、市販の小型 3 軸等方性電界プローブや広帯域アンテナとスペクトラムアナライザを組み合わせた簡易な測定システムによる基地局周辺電界強度の測定結果は、電波防護指針値からのマージン（60 dB 以上）に対して、十分に小さなばらつき（10 dB 以内）で測定値を得ることができ、IEC 国際規格 [4] に準拠した制御チャンネル測定に基づく理論的な最大電界強度に対しても 12 dB 以内の範囲で一致することが示された。なお、前節において 1 週間にわたる長期のトラフィック変動は 20 dB 程度以内であることが示されており、測定日時によってはより大きな差が示される可能性があると考えられる。

また、本来であれば本調査研究で実施した簡易測定値が制御チャンネル測定に基づく最大電界強度を超過することはありえないが、最大 9 dB の過大評価となった。これは、アンテナ校正誤差等に加え、簡易評価システムではランダム性が強いデジタル変調波形に対してマックスホールドにより測定していることで、時間平均値に対して過度に高強度の測定結果を示している可能性が考えられる。しかしながら、2 GHz 帯では PAPR（Peak-to-Average Power Ratio）値がより高くなる LTE よりも W-CDMA のほうが、制御チャンネル測定に基づく最大電界強度推定値に対して簡易測定結果がより過大となる結果が示されている。したがって、簡易測定の結果が制御チャンネル測定よりも過大となることの原因についてはより詳細な検討が必要と考えられる。

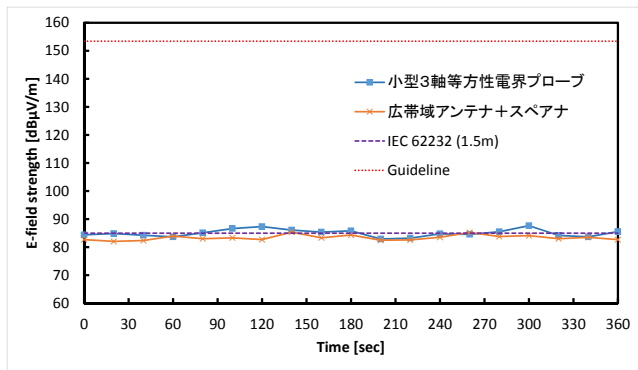
以上より、簡易測定に基づく測定では、本検討で評価された理論的な最大電界強度との差異である 12 dB に加え、測定日時（トラフィック変動）等の影響として 20 dB を見込めば十分であると考えられる。さらに、大地面からのある高さ一点での測定を行うとすると、前節までの検討から、床面からの高さの違いによる測定値の変動として 20 dB を見込めば十分であると考えられる。したがって、本検討で用いた簡易な測定システムによる短時間かつ 1 箇所の電界強度測定に見込まれる不確かさは、各不確かさ要因が独立であると仮定



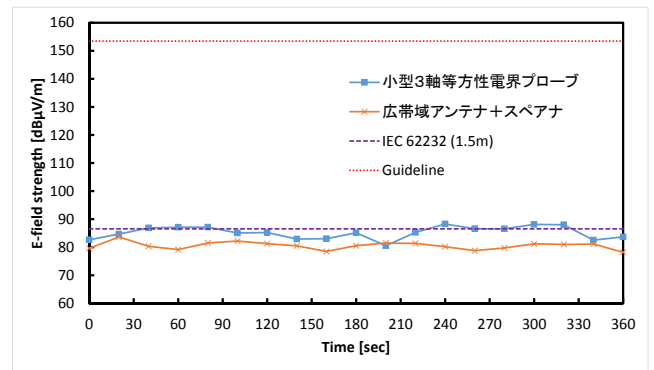
図 21 小型 3 軸等方性電界プローブ（奥）と広帯域アンテナ（手前）

表 2 測定対象の携帯電話基地局で運用されている周波数帯と変調方式

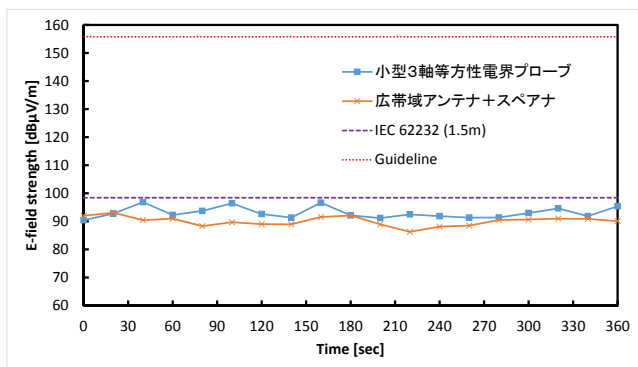
700 MHz 帯	800 MHz 帯	1.5 GHz 帯	1.7 GHz 帯	2 GHz 帯
NA	W-CDMA LTE	LTE	LTE	W-CDMA LTE



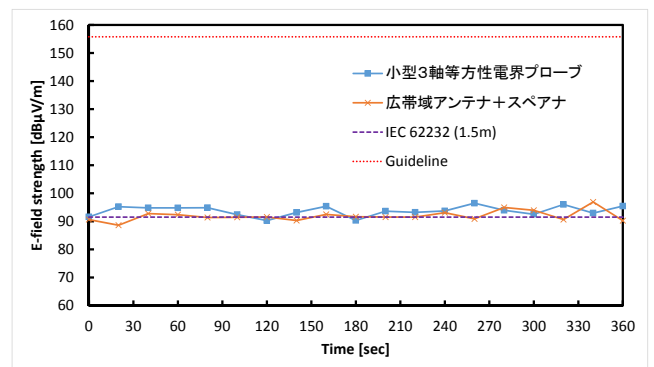
(a) 800-MHz W-CDMA



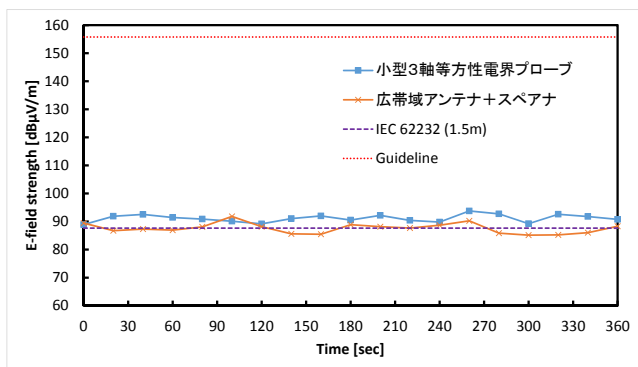
(b) 800-MHz LTE



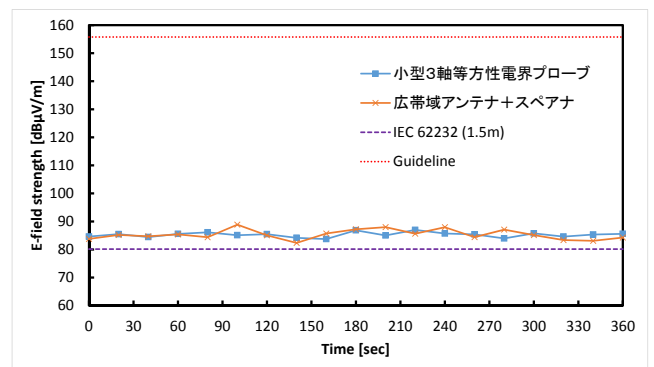
(c) 1.5-GHz LTE



(d) 1.7-GHz LTE



(e) 2-GHz LTE



(f) 2-GHz W-CDMA

図 22 第3世代及び第4世代携帯電話基地局 (W-CDMA 及び LTE) 周辺の電界強度測定結果 (青線・四角シンボル: 小型3軸等方性電界プローブ、橙線・×シンボル: 広帯域アンテナ+スペクトラムアナライザ、紫破線: IEC 国際規格 [4] 準拠による制御チャンネル測定に基づく最大電界強度値、赤点線: 電波防護指針の電界強度指針値 (一般環境))。測定場所は屋内

すると、総合不確かさは各不確かさの二乗和の平方根で得られることから、たかだか 22 dB 程度であると見込むことができる。したがって、電波防護指針値からそれ以上のマージンがある場合には、測定場所における測定対象の基地局からの電波強度が電波防護指針に適合していることを判定することが可能であると考えられる。

5 むすび

小型3軸等方性電界プローブ及びアンテナとスペク

トラムアナライザによる比較的簡易な測定システムを用いた携帯電話基地局周辺の電界強度測定の不確かさ要因として、空間変動と時間変動について評価した。

空間変動の検討では、総務省の報告書 [5] から市街地 5 箇所、郊外 5 箇所の携帯電話基地局周辺電界強度測定データに基づき、評価ポイント数による空間平均値の差異を評価した。測定には、ダブルリジッドガイドアンテナとスペクトラムアナライザを用いた。その結果、我が国で採用されている 20 ポイントでの空間平均値に対して、欧州等で採用されている 3 ポイントでの空間平均値の差異は -40 ~ 60 % の範囲であった。

空間平均のポイント数による差異の傾向について、市街地と郊外及び800 MHz帯と2 GHz帯での明確な違いは見られなかった。また、大地面からの高さ方向の変動は約20 dB以内であることが示された。

時間変動の検討では、小型3軸等方性プローブ及び広帯域アンテナ3軸電界測定システムを用いて、第3世代携帯電話(W-CDMA)基地局からの電波を24時間及び1週間にわたり測定した。その結果、小型3軸等方性電界プローブの場合、6分間の時間平均値とより短い時間平均値(10秒～)の差異は0.5 dB以内であった。一方で、広帯域アンテナ3軸電界測定システムの場合には、より短い時間平均値が増大する傾向が示されたが、測定点数が極端に少なくなる等のデータ処理に問題があるためと考察された。追加検討より、W-CDMA信号は測定装置のサンプリング間隔よりも十分に高速に変動しているため、時間平均値の変動は基本的にサンプル数に依存することが確認された。また、より長い時間間隔では10～20 dB程度の大きな変動(日周変動)がみられた。

次に市販の小型3軸等方性電界プローブや広帯域アンテナとスペクトラムアナライザを組み合わせた簡易な測定システムによる基地局周辺電界強度の防護指針適合性評価の可能性について検討した。第3世代携帯電話(W-CDMA)及び第4世代携帯電話(LTE)の基地局からの電界強度を測定し、国際標準規格[4]に準拠した制御チャネル測定に基づく理論的な最大電界強度と比較した。その結果、簡易測定システムによる測定値は理論的な最大電界強度から12 dBの範囲で一致することが示された。先に検討した空間変動及び時間変動による不確かさも考慮した場合の、総合不確かさは22 dB程度であることが示され、電波防護指針値からそれ以上のマージンがある場合には、簡易測定システムによる電波防護指針への適合性評価が可能であることが示唆された。

携帯電話システムは現在も進展し続けており、最近になり、我が国でもサービスが開始されたキャリアアグリゲーション、TD-LTE方式やMIMO方式等を運用する基地局からの電波強度の測定についての検討が必要になるものと考えられる。

謝辞

本研究を実施するにあたり、基地局測定において貴重な助言を頂いた株式会社NTTドコモの垂澤芳明氏(当時)、井山隆弘氏、東山潤司氏、大西輝夫氏と首都大学東京の多氣昌生教授に感謝する。また、本研究を実施するにあたり、測定データ取得に従事したNICTシンバ・アリ・ヤハヤ研究員(当時；現在タンザニア

通信規制庁(TCRA))に感謝する。本研究の一部は、総務省からの受託研究「電波の安全性評価技術」により実施された。

【参考文献】

- 1 郵政省電気通信技術審議会諮問第38号答申(1990年)、同諮問第98号答申(1997年)、総務省情報通信審議会諮問第2030号答申(2011年)、同諮問第2035号一部答申(2015年)、“電波防護指針,” 2015.
- 2 郵政省電気通信審議会諮問第104号答申, “電波防護指針への適合性を確認するための電波の強度の測定方法及び算出方法,” 1998.
- 3 郵政省告示第300号, “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を定める件,” 1999.
- 4 IEC62232, “Determination of RF field strength and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure,” 2011.
- 5 総務省, “携帯電話基地局周辺の電界強度測定の調査報告書,” 2006.
- 6 EN 50383, “Basic standard for the calculation and measurement of electromagnetic field strength and SAR related to human exposure from radio base stations and fixed terminal stations for wireless telecommunication systems (110MHz - 40GHz),” CENELEC, Brussel, 2002.
- 7 IEC/TR 62669, “Case studies supporting IEC 62232 - Determination of RF field strength and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure,” 2011.
- 8 ITU-T Recommendation K.61, “Guidance to measurement and numerical prediction of electromagnetic fields for compliance with human exposure limits for telecommunication installations,” 2008.
- 9 ITU-T Recommendation K.100, “Measurement of radio frequency electromagnetic fields to determine compliance with human exposure limits when a base station is put into service.”



渡辺聡一 (わたなべ そういち)

電磁波研究所
電磁環境研究室
研究マネージャー
博士(工学)
生体電磁工学

浜田リラ (はまだ りら)

電磁波研究所
電磁環境研究室
主任研究員
博士(工学)
生体電磁工学