

ISM 機器の FCC 規則 — 47 CFR 18 の概要

株式会社 e・オータマ 佐藤智典

2024 年 9 月 30 日

目次

1	概要	1
1.1	ISM 機器	1
1.2	使用の条件	2
1.3	除外	2
2	適合手続き	2
2.1	適合性の確認	3
2.2	記録	3
2.3	機器へのマーキング	4
2.4	ユーザーへの情報	4
3	ISM 周波数	5
4	放射エミッション	5
4.1	構成	5
4.2	テスト・サイト	7
4.3	アンテナ	8
4.4	測定距離	9
5	伝導エミッション	9
5.1	構成	10
5.1.1	超音波機器	10
5.2	LISN	10
6	周波数測定	10
7	電磁界の人体への影響	10
8	補足	12
8.1	外挿による電磁界強度の推定の例	12
8.1.1	外挿の方法の例	13
8.1.2	外挿による推定の限界	13
8.2	参考: 電磁界の減衰	14
8.2.1	大地面での反射の影響 (≥ 30 MHz)	15
8.2.2	近傍界となることの影響 (≤ 30 MHz)	15
8.3	人体の無線周波電磁界への曝露の制限	17
8.3.1	曝露評価の免除	18
9	参考資料	20



ISM 機器の応用の例 — 誘導加熱を用いた単結晶引き上げ

1 概要

アメリカ (USA) では無線スペクトラムは FCC (連邦通信委員会) が管理しており、その ISM 機器に関する規則は CFR^[1] (Code of Federal Regulations) の Title 47 Part 18 (47 CFR 18) で定められている。本稿ではこの 47 CFR 18 の概要を述べる。なお、本稿はその内容全てをカバーするものではなく、また正確であるとも限らないので、正確な情報は CFR そのもの^[1] や関連する公式な文書を参照されたい。

1.1 ISM 機器

ここでは、ISM 機器^{†1}は、

通信の分野を除く、工業、科学、医療、家庭、あるいは類似の目的のために RF エネルギー (9 kHz ~ 3 THz の周波数範囲の電磁エネルギー) を発生して局所的に使うように設計された機器や器具

を意味する。

ISM の典型的な用途は、例えば加熱、ガスのイオン化、機械的振動、脱毛、また荷電粒子の加速のような、物理的、生理学的、あるいは化学的な効果の発生である。

例えば、電子レンジ、電磁調理器、高周波加熱装置、RF プラズマ CVD 装置、超短波/マイクロ波治療器、RF 脱毛器、超音波洗浄器、超音波溶着機、RF 照明機器^{†2}、MRI、ワイヤレス給電などが 47 CFR 18 の対象となる。

^{†1} ISM は industrial, scientific and medical (工業、科学、医療) に由来するが、工業用や医療用の機器全般が ISM 機器として扱われるわけではなく、また電子レンジのような家庭用の機器も ISM 機器に含まれる。

^{†2} 9 kHz 以上の周波数で動作する高周波点灯式の蛍光灯や高周波点灯式の蛍光灯器具への取り付けが意図された交換用 LED チューブを含むが、9 kHz 以上の周波数を用いた LED 照明器具は一般に 47 CFR 15^{[1][9]} の対象となる (KDB^[6] 640677 D01 “Radio Frequency LED Lighting Products” 参照)。

情報技術機器などの ISM 機器以外の免許不要デバイスは 47 CFR 15^{[1][9]} でカバーされ、これと異なる要求が適用される。

また、RF を用いて液面や何らかの物性の測定を行なうものにも 47 CFR 18 ではなく 47 CFR 15 が適用される。^{†3}

ISM 機器は 47 CFR 18 の対象となる ISM 機器の部分と 47 CFR 15 Subpart B^{[1][9]} の対象となるデジタル・デバイスの部分との複合システムとみなすべきものとなるかも知れず、そのような場合は 47 CFR 18 に加えて 47 CFR 15 Subpart B の要求への適合も必要となる。^{†4}

1.2 使用の条件

47 CFR 18 の対象となる ISM 機器はその規則に従うことでアメリカ国内で運用可能となる。^{†5}

但し、これによってその周波数の継続的な利用の権利が得られるわけではなく、許可された無線サービス (ISM 周波数帯で運用される無線サービスを除く) への有害な干渉を生じた場合には干渉を除去するために必要な処置を即座に講じることが必要となる。^{†6}

^{†3} KDB^[6] 227764 D01 “Classification of ISM Equipment” 参照。

^{†4} 但し、47 CFR 15 Subpart B に関しては、47 CFR 15.103、特に b (工業プラントなどで制御/電力システムとして用いられるデジタル・デバイス)、c (工業/商業/医療用試験機器としてのみ用いられるデジタル・デバイス)、d (電子レンジなどの家電品内のデジタル・デバイス)、e (医療従事者の指示や監督のもとで用いられる医用デジタル・デバイス) によりエミッション限度の適用などが免除可能となるケースが多そうである。^{[1][9]} 無線送信機 (47 CFR 15 の他のサブパートの対象となるものを含む) についてはこのような除外はなく、無線送信機を含む ISM 機器はその用途などに関わらず無線機器に対する要求にも適合しなければならない。47 CFR 15 Subpart B の、また機器にモジュール認可済みの無線送信機を組み込む場合の扱いについては [9] で触れている。

^{†5} 勿論、他の規則の対象にもなる場合はそれらの規則にも従うことが必要となる。

^{†6} 例えば 2.4~2.5 GHz 帯が無線 LAN や Bluetooth などで用いられており、電子レンジが無線 LAN に干渉する場合があることは良く知られているが、この帯域は ISM 周波数帯であり、その帯域の無線通信での使用は ISM 機器の運用によって引き起こされる干渉を受容するという条件のもとで許可されている (47 CFR 15.5 (a), 47 CFR 2.106 footnote 5.150)。従って、47 CFR 18 の要求に適合した 2.4~2.5 GHz 帯で動作する ISM 機器 (例えば電子レンジやマイクロ波治療装置) がその帯域を利用する無線 LAN などの通信に干渉した場合、この規則上は ISM 機器側でその干渉を除去する義務はない (47 CFR 18.111 (c))。勿論、干渉を低減するように務めるべきであるし、例えば工場に設置されたマイクロ波加熱装置が近隣一帯の無線 LAN を使用不能とするようなことがあれば適切な対応が必要となりそうではある。

1.3 除外

47 CFR 18 の対象となる機器のうち、医療的な診断/監視の用途で用いられる非民生用超音波機器、及び非民生用磁気共鳴機器^{†7}は、47 CFR 18 のエミッション限度や適合手続きなどの適用は不要となる。但し、この場合も、帯域外のエミッションの抑制のためにグッド・エンジニアリング・プラクティスを適用すること、許可された無線サービスへの有害な干渉を生じた場合は干渉を除去するために必要な処置を即座に講じること (§1.2)、使用が禁じられた周波数 (§3) を使用しないことなど、47 CFR 18 の一般的な要求は適用される。

47 CFR 15 Subpart B^{[1][9]} と異なり、医療用の機器や工業プラントで利用される機器などに対する一般的な除外の規定はなく、上記のもの以外の ISM 機器に対してはこの規則のエミッション限度や適合手続きなどを含めて 47 CFR 18 の要求の適用が必要となる。

2 適合手続き

47 CFR 18 の対象となる全ての機器について供給者適合宣言 (Supplier's Declaration of Conformity; SDoC) を、また一部については製造業者がそれを選択するならば証明 (certification) の手続きを適用することができる:

- 500 W 未満かつ 90 kHz 未満の民生用超音波機器 — SDoC
- その他の民生用 ISM 機器^{†8} — SDoC か証明
- 非民生用 ISM 機器 — SDoC

SDoC は、アメリカ国内の責任組織 (responsible party)^{†9}がその機器がこの規則に適合することを確

^{†7} 例えば、医療用の超音波画像診断装置、超音波血流計、MRI など。但し、医療機器は一般に FDA (アメリカ食品医薬品局) の要求への対応も必要となり、この規則の対象から除外されるかどうかに関わらず、大抵は、ANSI AAMI IEC 60601-1-2 か IEC 60601-1-2 (Medical electrical equipment – Part 1-2: General requirements for basic safety and essential performance – Collateral Standard: Electromagnetic disturbances – Requirements and tests) にも適合させることになるだろう。

^{†8} “民生用 ISM 機器 (consumer ISM equipment)” は、家庭用の電子レンジなどのような、一般の人が居住環境で使用するものが意図された ISM 機器を意味する。

^{†9} 47 CFR に出てくる「responsible party」の定訳はないと思われるが、本稿では「責任組織」としておく。これは FCC の要求への適合の責任を持つ組織や個人であり、通常、アメリカへの輸入品の場合は輸入業者が、アメリカ国内製造品の場合は製造業者がこれに該当する。

認し、宣言するもので、この場合は FCC や TCB (telecommunication certification body) への申請などは不要である。

これに対して、証明 (certification) では TCB を通して認可を得ることが必要となる。

47 CFR 18 では証明が必須となるケースはなく、47 CFR 15 Subpart B^{[1][9]} (非意図放射器) の場合と同様、多くの場合は証明ではなく SDoC が用いられると思われる。

これと別に、該当する KDB^[6] で ECR (equipment compliance review) や PAG (pre-approval guidance) などの適用が規定されている場合、その規定に従うことも必要となる。例えばワイヤレス電力伝送 (WPT) 機器は曝露に関して ECR の対象となる旨が KDB 680106 で述べられており、KDB 問い合わせシステムを通じて FCC に所定の情報を提出して確認を受けることが必要となる。

2.1 適合性の確認

測定法は MP-5^[2] で述べられており、この規則の技術的要求への適合性の確認のための測定はその測定法に従って行なう。^{†10}

SDoC の場合、エミッション測定を認定試験所で行なう必要もないが、測定で使用する設備は規格の要求を満足するものでなければならず、また測定施設に関する 47 CFR 2.948 で規定された情報を少なくともその試験所が保持しなければならない。

証明 (certification) の場合は測定を認定試験所で行ない、また TCB を通して認可を得ることが必要となる。

2.2 記録

責任組織は、以下の記録を、機器の供給が完全に終了してから 2 年 (証明の場合は 1 年) 以上保管しなければならない:

1. オリジナルの設計図面と仕様、適合性に影響するかも知れない全ての変更

2. 適合性の確認のための生産検査/試験に用いられた手順の記録^{†11}
3. 適当な試験所で行なわれた試験の記録:^{†12}
 - (a) 試験を実施した日
 - (b) 試験を実施した試験所、企業、あるいは個人の名前
 - (c) 測定手続きと使用された試験機器を同定する、実際にどのように試験されたかの記述
 - (d) EUT と補助機器がどのように接続されたかの記述
 - (e) EUT と補助機器の、ブランド名とモデル番号、そして該当する場合には FCC ID と製造番号による同定
 - (f) 使用された接続ケーブルの種類と長さ、そして試験に際してそれがどのように配置され、もしくは動かされたか
 - (g) 最大の伝導性エミッションと最大の放射性エミッションの試験セットアップを示す、少なくとも 2 つの図が写真
 - (h) 適合性の達成のために EUT に対して加えられた全ての改造の一覧
 - (i) 適合性を示すために必要な全てのデータ
 - (j) 試験に責任を持つ個人の署名と、責任組織の職員の名前と署名
4. 機器とともに提供する必要がある適合情報のコピー
5. 移行期間を含む規則の対象となる機器については、機器の適合性が確認された時に特定の移行条項が有効であったかどうか

また、証明の申請などに際しては少なくとも以下の情報を提出することが必要となるだろう:

1. 測定施設に関する 47 CFR 2.948 で規定された情報
2. ユーザーに提供される設置/操作指示のコピー

^{†10} 以前は FCC が使用する測定法は MP-5 であるがその使用は必須ではない旨が記載されていたが、この記載は 2017 年の改定で変更された。

^{†11} 量産品からの抜き取り検査の実施など、量産品の適合性を保証するための手順を設け、その記録を残すことが必要となるだろう。

^{†12} 外部の試験所にエミッション測定の実施とテストレポートの発行を依頼した場合、これらの情報は、責任組織の職員の名前と署名を除き、テストレポートに含まれている筈である。

3. 製造業者、及び/もしくは申請者の名称と住所
4. その機器の FCC ID、商標、及び/もしくは型番
5. 以下のものを含む定格技術パラメータの宣言:
 - (a) 回路のブロック図と回路図
 - (b) 公称動作周波数
 - (c) 発生させられる最大 RF エネルギー
 - (d) 機器の電源入力要求
 - (e) その他関係する動作特性全て
6. 測定報告書 (測定器の一覧、それらの最終校正日、測定が行なわれた日、確認が行なわれた周波数範囲の情報を含む)

- そのデバイスやシステムによる干渉の可能性
- そのシステムの保守
- 干渉の回避のためにユーザーが行なうことのできる簡単な対処
- RF 照明デバイスの製造業者は、製品の梱包かその他のユーザー向け文書に以下のものに似た勧告を示す:

This product may cause interference to radio equipment and should not be installed near maritime safety communications equipment or other critical navigation or communication equipment operating between 0.45-30 MHz.

(この製品は無線機器への干渉を生じるかも知れず、海上安全通信機器や 0.45~30 MHz で動作するその他の重要な航法もしくは通信機器の近くに設置すべきではない。)

2.3 機器へのマーキング

SDoC を適用した場合、機器には機器を同定する情報 (例えばブランド名、モデル番号、製造番号など) を表示する。

また、SDoC を適用した場合は責任組織がそれを表示することを望むのであれば、47 CFR 2.1074 で示されている **FC** ロゴ (図 1) を任意で表示することができる:



図 1: **FC** ロゴ

適合に関するステートメントの機器への表示が必要となる 47 CFR 15^{[1][9]} と異なり、47 CFR 18 ではステートメントの機器への表示の要求はない。勿論、その機器が 47 CFR 15 の対象にもなる場合はその要求にも従うことが必要となる。

証明 (certification) の場合、FCC ID の表示が必要となる、**FC** ロゴの表示を行えなくなるなど、要求事項に相違がある。

2.4 ユーザーへの情報

47 CFR 18.213 で規定されているように、少なくとも以下の情報をユーザーに提供しなければならない:

また、47 CFR 18.213 には示されていないが、その機器の使用上の注意事項全て、例えば曝露の制限 (§7) を満足するために確保すべき離隔距離の情報 (該当する場合) なども適切に記載する。過剰な曝露の防止のためにユーザー側での防護策 (例えばゾーニング、インターロック、動作時の音や光による警告のような)、保護具の着用、所定のトレーニングなどが必要な場合、その種の情報も適切かつ具体的に、ユーザーがそれを理解して適切に実施できるような形で記載することが必要となるだろう。

また、SDoC を適用した場合、47 CFR 2.1077 で規定されたように、添付される取扱説明書もしくは別紙に以下の情報を記載しなければならない (図 2):

1. 製品を同定する情報、例えばブランド名とモデル番号
2. その製品が 47 CFR 18 の要求に適合する旨の、“*This device complies with part 18 of the FCC Rules.*” のようなステートメント
3. 責任組織^{†13}の名前、住所、及び電話番号もしくはインターネットでの連絡先情報

適合情報の記載に関しては KDB^[6] 896810^{†14} も参照。

^{†13} §2 で述べたように、SDoC の場合、責任組織はアメリカ国内になければならない。

^{†14} KDB^[6] 896810 D01, “Supplier’s Declaration of Conformity Guidance”

Supplier's Declaration of Conformity
47 CFR §2.1077 Compliance Information

Unique Identifier: (例えば商号、モデル番号)

Responsible Party – U.S. Contact Information
社名
住所 (Street Address, City, State)
郵便番号
United States
電話番号かインターネットでの連絡先情報

FCC Compliance Statement
This device complies with part 18 of the FCC Rules.

図 2: 適合情報の記載の例 (KDB^[6] 896810 D01 に基づく)

3 ISM 周波数

表 1 に示す周波数帯は ISM 機器での使用のために割り当てられており、その周波数で動作する ISM 機器はその周波数範囲内では無制限のエミッションが許容される。^{†15}

但し、強い電磁放射は人体への影響を生じる可能性があり、これについては別途考慮が必要となる (§7)。

中心周波数	許容幅	周波数範囲
6.78 MHz	±15.0 kHz	6.765~6.795 MHz
13.56 MHz	±7.0 kHz	13.553~13.567 MHz
27.12 MHz	±163.0 kHz	26.957~27.283 MHz
40.68 MHz	±20.0 kHz	40.66~40.70 MHz
915 MHz	±13.0 MHz	902~928 MHz
2 450 MHz	±50.0 MHz	2 400~2 500 MHz
5 800 MHz	±75.0 MHz	5 725~5 875 MHz
24.125 GHz	±125.0 MHz	24.000~24.250 GHz
61.25 GHz	±250.0 MHz	61.00~61.50 GHz
122.50 GHz	±500.0 MHz	122.00~123.00 GHz
245.00 GHz	±1.0 GHz	244.00~246.00 GHz

表 1: ISM 周波数帯 (47 CFR 18.301 より)

この規則で規定された ISM 周波数 (表 1) は CISPR 11^{[7][10]} のものとほぼ同一だが、この規則では 433.05~434.79 MHz は ISM 周波数帯ではなく、通常のエミッション限度の範囲内での放射のみが許容される。

^{†15} ISM 周波数が通信のために用いられることがあるが、その場合は該当する規則 (通常は 47 CFR 15 の該当する条項) の要求が適用される。

また、490~510 kHz、2170~2194 kHz、8354~8374 kHz、121.4~121.6 MHz、156.7~156.9 MHz、及び 242.8~243.2 MHz の使用は禁止されており、エミッションが通常の限度に入るとしてもそれらの周波数を動作周波数として使用してはならない。

4 放射エミッション

放射エミッション限度 (表 3) は、30 m~1600 m、多くの機器については 300 m か 1600 m という大きな距離での電界強度で規定されている。^{†16} また、超音波機器と RF 照明デバイス以外については限度はその限度が測定周波数範囲 (表 2) 全体にわたって一定となっており、RF 電力が 500 W を超える機器の一部と RF 照明デバイスを除いては住宅地での使用を意図したものかどうかによる違いもない。

検波は、指定がない場合は平均値 (AV) 検波を、但し RF 照明については準尖頭値 (QP) 検波を用いる。

1000 MHz よりも低い周波数で動作する民生機器を除き、RF 電力が 500 W 以上の場合には限度の緩和が許容される場合があるが、その場合も 1600 m での電界強度が 10 $\mu\text{V}/\text{m}$ を超えてはならない。^{†17}

RF 電力は、電子レンジは負荷として用いる水の温度上昇から、ジアテルミー装置は白熱電球の輝度を介しての置換法で求めることができる。^[2]

RF 照明デバイスの放射エミッション限度は 30~1000 MHz の周波数範囲で規定されており、この限度は非民生用か民生用かによって 10 dB 程度異なる (図 3)。この限度は 30 m の距離で規定されているが、 $1/d$ の減衰を仮定すればこれらの限度はそれぞれ 47 CFR 15.109 のクラス A とクラス A 以外の限度^{[1][9]} と同等である。

4.1 構成

エミッション測定に際しての EUT の構成や動作は典型的な応用でエミッションが最大となるようにする。エミッションが最大となる構成は通常は明白ではなく、大抵は例えばケーブルや機器の位置や向きを変えてのいくつかの試行が必要となる。

^{†16} §4.4 で触れるように、実際の測定はこれよりも短い測定距離で行なうことになるだろう。

^{†17} $1/d$ の減衰を仮定すると、300 m で 50 $\mu\text{V}/\text{m}$ の場合に 1600 m で 10 $\mu\text{V}/\text{m}$ 弱となる。

動作周波数	測定周波数の下限	測定周波数の上限
< 1.705 MHz	装置内で発生する最低の周波数と 9 kHz の高い方	30 MHz
1.705～30 MHz	装置内で発生する最低の周波数と 9 kHz の高い方	400 MHz
30～500 MHz	装置内で発生する最低の周波数と 25 MHz の低い方	10 次高調波と 1000 MHz のいずれか高い方
500～1000 MHz	装置内で発生する最低の周波数と 100 MHz の低い方	10 次高調波
> 1000 MHz	装置内で発生する最低の周波数と 100 MHz の低い方	10 次高調波か検出可能な最も高いエミッション

表 2: 放射エミッションの測定周波数範囲 (47 CFR 18.309 より)

機器	動作周波数	RF 電力 P (W)	電界強度 ($\mu\text{V}/\text{m}$)	距離 (m)
他で規定されたもの以外	任意の ISM 周波数	< 500 W	25	300
		≥ 500 W	$25\sqrt{P/500}$	⁽¹⁾ 300
	任意の非 ISM 周波数	< 500 W	15	300
		≥ 500 W	$15\sqrt{P/500}$	⁽¹⁾ 300
工業用加熱装置、 RF 安定化アーク溶接機	≤ 5725 MHz	任意	10	1600
	> 5725 MHz	任意	⁽²⁾	⁽²⁾
内科的ジアテルミー	任意の ISM 周波数	任意	25	300
	任意の非 ISM 周波数	任意	15	300
超音波 [‡]	< 490 kHz	< 500 W	$2400/F_{\text{kHz}}$	300
		≥ 500 W	$2400/F_{\text{kHz}}\sqrt{P/500}$	⁽³⁾ 300
	490～1600 kHz	任意	$24000/F_{\text{kHz}}$	30
	> 1600 kHz	任意	15	30
電磁調理器	< 90 kHz	任意	1500	30
	≥ 90 kHz	任意	300	30
RF 照明デバイス		任意	図 3 参照	30

(1) 1600 m で $10 \mu\text{V}/\text{m}$ を超えないこと。1000 MHz よりも低い周波数で動作する民生機器では特に規定されない限り 500 W を超える場合の限度の緩和は許容されない。

(2) 可能な限り低減すること。

(3) 1600 m で $10 \mu\text{V}/\text{m}$ を超えないこと。民生機器では特に規定されない限り 500 W を超える場合の限度の緩和は許容されない。

[‡] 伝導エミッション限度 (§5) に適合する超音波機器は FCC が要求しない限り 30 MHz 以下の放射エミッションの評価は不要 (47 CFR 18.307 (f))。

表 3: 電界強度限度 (47 CFR 18.305 より)

卓上機器は高さ 1 m の非導電性の台の上に配置する。床置き機器はターン・テーブル上に直接置くことができる。

負荷の使用が規定されている場合、あるいは意図したような状態で動作させるために負荷が必要な場合、適切な負荷を用いる。

例えば電子レンジの場合はポリプロピレンかその他の低損失な材料の容器に入れた水道水を負荷として用い、この水の量は定格 1000 W 以下の場合には出力の測定と周波数の測定では 1000 mL、2 次高調波

と 3 次高調波の放射の測定では 700 mL と 300 mL、その他の測定では 700 mL とし、定格 1000 W を超える場合は水の量を 500 W について 50 % 増やす。

内科的ジアテルミー装置についても負荷の規定があるが、製造業者が規定した他の負荷を用いることもできる。^[2]

機器	動作周波数	RF 電力 P (W)	電界強度 (dB μ V/m) $1/d$ を仮定した 10 m での換算値
他で規定されたものの以外	任意の ISM 周波数	< 500 W	57.5
	任意の非 ISM 周波数	< 500 W	53.1
工業用加熱装置、 RF 安定化アーク溶接機	≤ 5725 MHz	任意	64.1
内科的ジアテルミー	任意の ISM 周波数	任意	57.5
	任意の非 ISM 周波数	任意	53.1
超音波	> 1600 kHz	任意	33.1
電磁調理器	< 90 kHz	任意	73.1
	≥ 90 kHz	任意	59.1

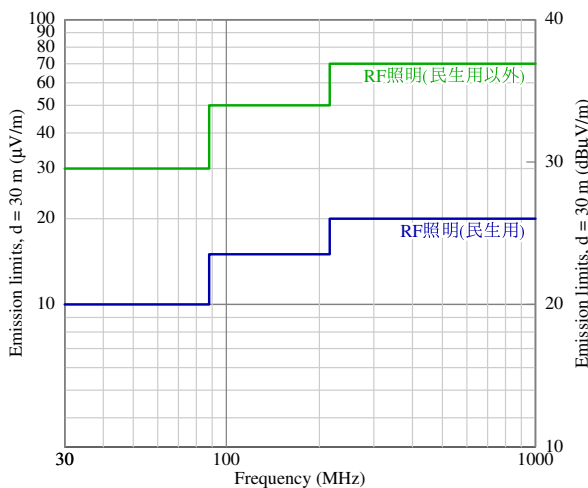
表 4: 代表的な電界強度限度 (表 3) の $1/d$ (-20 dB/decade) の減衰を仮定しての 10 m における相当値 (参考)

図 3: RF 照明デバイスの放射エミッション限度

4.2 テスト・サイト

放射エミッションの測定は、開けた平坦な場所で、EUT から適切な距離離れた位置に受信アンテナを置いて行なう (図 4, 図 5)。金属のグラウンド・プレーンの使用が推奨されるが、これは必須ではない。電波暗室などはそのような開放形サイトとの相関を示せる場合に限り使用できる。

MP-5 ではテスト・サイトの検証の方法は示されていないが、30 MHz~40 GHz については ANSI C63.4^[3] でテスト・サイトの検証の方法が規定されており、この要求に適合するテスト・サイト (電波暗室のような代替サイトを含む) は MP-5 での 30 MHz

以上の測定にも適したものとなる。^{†18†19}

30 MHz 以下についてはいずれの規格でもサイトの検証の方法は示されておらず、またグラウンド・プレーンの使用も必須でないので、周辺に反射物のない開けた平坦な場所であれば、特性の検証を行なうことなしに開放形テスト・サイトとして使用できると考えられる。だが、電波暗室のような代替サイトについては、そのサイトが開放形テスト・サイトでの測定と相関する結果をもたらすことを立証するために十分な試験を行なわなければならないと定められている。^{†20†21}

イン・サイチュ測定の場合はこのような制限はないが、その機器とその場所の双方が EUT とみなさ

^{†18} 30~1000 MHz についても 10 m、1 GHz 以上ではより近い測定距離でのみ検証されているテスト・サイトも多いと思われるが、§4.4 や §8.2.1 で述べるように、30~1000 MHz については 10 m での測定の結果から $1/d$ の減衰を仮定して換算することができる。

^{†19} MP-5 では 1 GHz 以上についても開放形サイト (床面は大地面か金属のグラウンド・プレーン) での測定がベースとなる。ANSI C63.4 の 1 GHz 以上のテスト・サイトは自由空間を模擬するもの (全無響室) となるが、半無響室の床面に電波吸収体を配置して全無響としている場合は吸収体を取り除いた状態では金属のグラウンド・プレーンを持つ開放形サイトを模擬するものとなりそうである。

^{†20} KDB^[6] 414788 D01 “Test Sites for Radiated Emission Measurements” では、47 CFR 15 に関して、電波暗室などの代替サイトの特性の確認は複数の類似のデバイスの測定結果の開放形サイトでの測定結果との比較によって行なえるかも知れない旨、またその代替サイトと開放形サイトとの相関の証拠を文書化し要求があれば提出すべき旨が述べられている。

^{†21} 30~1000 MHz の測定で用いられるような電波暗室 (SAC) は壁面と天井の電波吸収体によって反射を抑えているが、その電波吸収体は低い周波数では効果を失い、壁面や天井での強い反射が生じることが予期される。また、例えば 20 m や 30 m のような大きな測定距離での測定を行ないたいと思うかも知れないが、電子機器のエミッション測定で用いられている電波暗室の多くではそのような大きな測定距離での測定を行なうことは困難である。従って、9 kHz~30 MHz の測定をそのような電波暗室で行なえる可能性はあるものの、低い周波数範囲での測定には特別な注意が必要となるかも知れない。

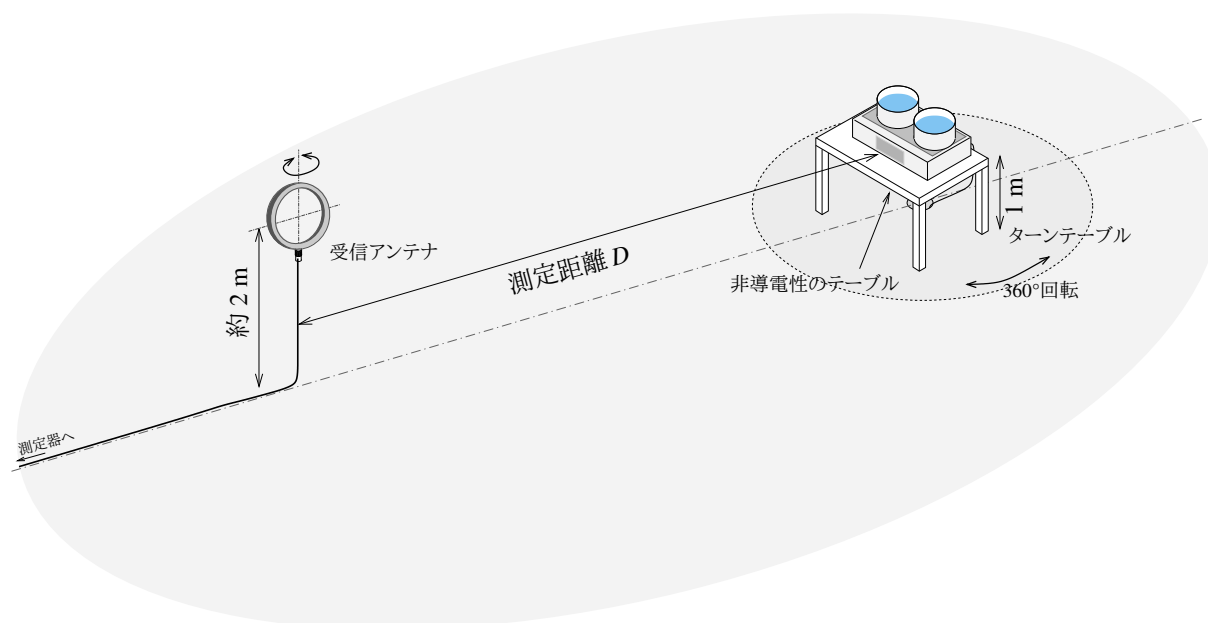


図 4: ループ・アンテナでの放射妨害の測定

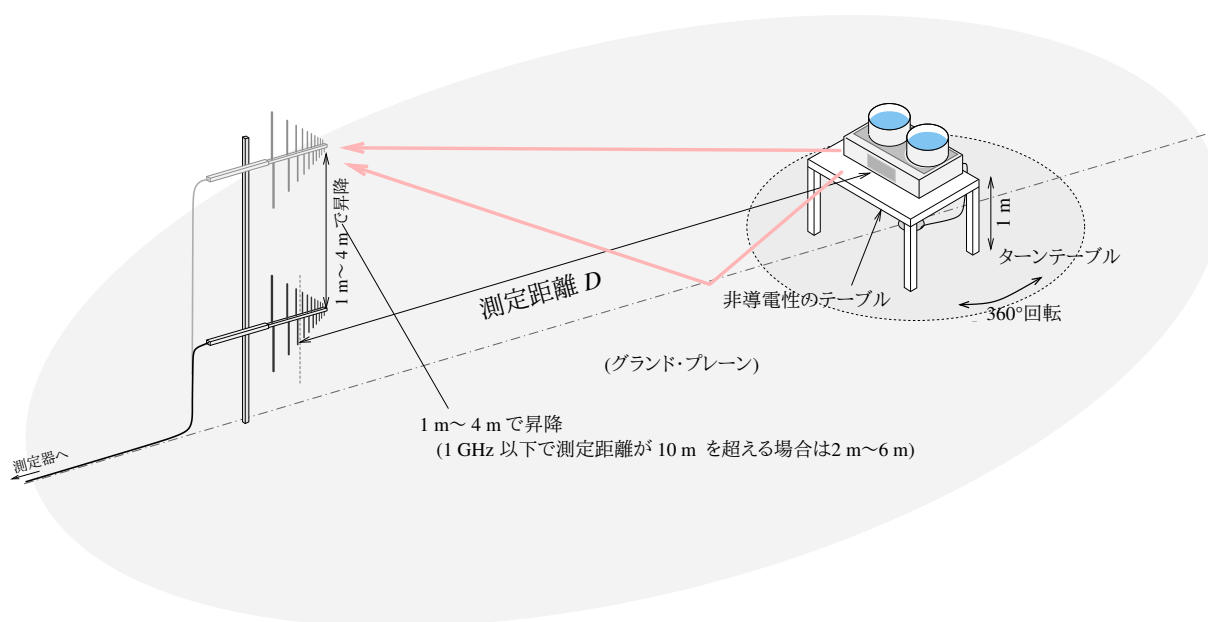


図 5: 放射妨害の測定 (30 MHz~)

れ、イン・サイチュ測定の結果はその場所に固有のものとなる。

4.3 アンテナ

規格で指定された測定用のアンテナと実際の測定でしばしば用いられるアンテナの例、またアンテナの高さの指定を [表 5](#) に示す。

ループ・アンテナは磁界の成分を検出するが、その周波数範囲についても限度 ([表 3](#)) は電界強度で規定

されているため、換算が必要となる。MP-5 はその方法を示していないが、ANSI C63.4^[3] は 377Ω の自由空間インピーダンスを仮定して電界強度に換算するアンテナ係数を用いるように述べており、ISM 機器の測定でも同様とすれば良いだろう。^{†22} アンテナの校正の方法も明確に示されていないが、ANSI

^{†22} 電磁界の電界と磁界の成分の強さを 377Ω の係数で換算できるという仮定は近傍界では成り立たない ([図 20](#))。従って、近傍界でループ・アンテナで測定した結果を電界強度で表現したものはあくまでも 377Ω のインピーダンスを仮定しての等価電界強度であり、実際の電界強度とは異なったものとなる。

周波数範囲	指定されたアンテナ	アンテナ高さ	典型的なアンテナの例
< 18 MHz	シールドされた平衡型ループ	約 2 m で、ヌルを避ける	60 cm シールド・ループ
18~30 MHz	シールドされた平衡型ループ、もしくは半波長ダイポールか他の直線偏波アンテナ	ループ: 約 2 m で、ヌルを避ける 他: 測定距離 10 m までは 1~4 m、それ以遠では 2~6 m で昇降	
30~1000 MHz	半波長ダイポールか他の直線偏波アンテナ	測定距離 10 m までは 1~4 m、それ以遠では 2~6 m で昇降	バイコンカル、LPDA (対数周期ダイポール・アレー)、あるいはハイブリッド
> 1 GHz	広帯域直線偏波ホーン・アンテナか他の直線偏波アンテナ	1~4 m で昇降	ダブルリッジド・ウェーブガイド・ホーン

表 5: 測定用アンテナ

C63.4^[3] では ANSI C63.5^[4] の、さらにループ・アンテナについては IEEE Std 291-1991 STLM (標準送信ループ法)^[5] の参照が見られる。

4.4 測定距離

放射エミッションの測定はできる限り限度が規定されている距離で行なうべきである。だが、表 3 の限度は 300 m や 1600 m の距離で規定されたものもあり、そのような長い距離での測定は実際的でない。

このため、限度が 30 m よりも遠くで規定されている場合には特に、次のいずれかの規定に従い、近い距離での測定結果から規定の距離での電界強度を推定することが必要となるだろう：

- 放射のメジャー・ローブの同定のために放射パターンをプロットし、また規定された距離で予想される電磁界強度を同定するために充分な数の方位^{†23} と距離での測定を行なう限り、より近い距離での試験を行なって良い

可能であればそれぞれの方位で複数の距離で測定し、距離と電磁界強度のカーブを描画し、限度が規定された距離での電磁界強度を外挿するために延長する。

- あるいは、近い単一の距離でのみ測定するならば、減衰率として $1/d$ (-20 dB/decade) を用いて限度値を補正する。

低い周波数では近い距離の複数の距離での測定結果は $1/d$ (-20 dB/decade) よりもかなり急激な (最大で $1/d^3$ 、すなわち -60 dB/decade までの) 減衰を示すことも多く、そのような場合は前者の方法を

^{†23} 20° 以下の間隔が望ましい。

用いた方が規定の距離での電界強度が大幅に低く推定されることになる。但し、これはあくまでも近い距離で得られた限られた情報からの推定であり、その推定の結果は著しく甘いものとなる可能性もあること、また推定された減衰の傾斜のわずかな違いが規定の距離での電界強度の推定の結果に非常に大きな違いをもたらす得ることに注意した方が良いかも知れない。^{†24}

一方、高い周波数、例えば 30 MHz 程度以上では大地面での反射とアンテナの昇降の範囲の制限の影響に伴う変則性を除いては減衰は概ね $1/d$ に従うであろうと予想され、前者の方法を適用する利点はなさそうに思われる。

距離に伴う電磁界の減衰や近い距離での測定結果からの推定に関しては §8 でも触れる。

5 伝導エミッション

伝導エミッション限度は、商用電源に接続される、

- 電磁調理器、超音波機器
- RF 照明デバイス (民生用)
- RF 照明デバイス (非民生用)
- その他の民生機器

に対して規定されている (図 6)。^{†25}

その他の民生機器の限度は 150 kHz~30 MHz について準尖頭値 (QP) と平均値 (AV) で規定されて

^{†24} これらについては §8、特に §8.1.2 や §8.2.2 でももう少し詳しく説明する。

^{†25} 47 CFR 15^{[1][9]} の対象にもなる機器については、当然、その要求への適合が必要となる。その他の機器についても 47 CFR 15 の規定を準用して確認を行なっておくことは良い考えかも知れない。

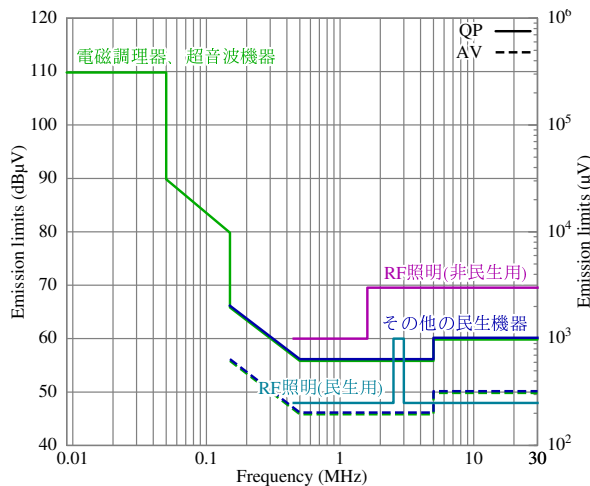


図 6: 伝導エミッション限度

おり、この限度は 47 CFR 15.107 のクラス A 以外の機器に対する限度^{[1][9]}と同等である。電磁調理器と超音波機器も 150 kHz～30 MHz の限度は同様だが、9～150 kHz の準尖頭値限度が加わる。

RF 照明デバイスの限度は 150 kHz～30 MHz で規定されており、一般の人が居住環境で使うことが意図された RF 照明デバイスは民生用 RF 照明デバイスの限度に適合しなければならない。^{†26}

5.1 構成

床置き以外の EUT は 2 m 角以上の導電性の面 (例えばシールド・ルームの床の金属面) から 40 cm に置き、その他の導電性の面からは 80 cm 以上離す。シールド・ルームでの測定の場合はこの 2 m 角以上の導電性の面の代わりにシールド・ルームの壁を用いても良い。床置き機器は金属の床面の上に直接置くことができる。

LISN (§5.2) は EUT から 80 cm の距離に置く。EUT に電源コードが付属する場合は EUT と LISN をそのコードで接続して余長を 30～40 cm で束ね、その他の場合は 1 m よりも長くないコードで接続する (図 7)。

5.1.1 超音波機器

可搬型のデバイスの場合、1 m × 3 m の木のテーブルを LISN の直近に置き、一体型のデバイスは

^{†26} そのような明確な要求はないものの、非民生用 RF 照明デバイスについては、例えば使用の制限に関する情報の梱包への明確な表示など、一般消費者への販売や居住環境での使用を防ぐための適切な配慮も必要となりそうである。

テーブルの LISN 側の端に置く。

治療用のデバイスは超音波発生器から 30 cm 離してテーブル上に置いた 1 m × 2.5 m の接地されない金属板の上の水槽にトランスジューサを漬けて同様に配置する。この水槽はプラスチックのものとし、水槽内の水をストラップで金属板に接続する (図 8)。

患者への装着が意図された電極 (パッド) などのアクセサリがある場合は濡らしてテーブル上の金属板に接触させる。

可搬型でない、あるいは床置き型のデバイスは床の上に置き、トランスジューサやその他のアクセサリは、通常はテーブルの上に置かれるならばテーブルの上に、さもなくば床の上に置く。

5.2 LISN

LISN^{†27} (図 9) は、電源のインピーダンス (図 10) を管理するとともに、電源線上の高周波成分を取り出して測定器 (テスト・レシーバ) に伝える機能を持つ。

150 kHz～30 MHz は 50 μH / 50 Ω LISN で、9～150 kHz は 50 μH / 50 Ω + 5 Ω LISN でカバーされるが、単一の LISN で 9 kHz～30 MHz の要求 (図 10) を満足することも可能である。

6 周波数測定

ISM 周波数帯で動作する機器については、負荷や動作条件による最大周波数偏差を測定し、報告する:

1. 室温での無負荷での 5 分間の余熱の後、アプリケーション、アプリケーションの間隔、制御部の設定、負荷の様々な組み合わせについて、ISM 周波数からの最大偏差を求める;
2. 最大の偏差を生じる構成で、室温でのコールド・スタートから動作の安定までの期間での周波数変動を測定する。

7 電磁界の人体への影響

ISM 機器は ISM 周波数帯 (§3) では無制限のエミッションが許容されるものの、強い電磁放射は人

^{†27} LISN = line impedance stabilization network. AMN (artificial mains network) と呼ばれる。

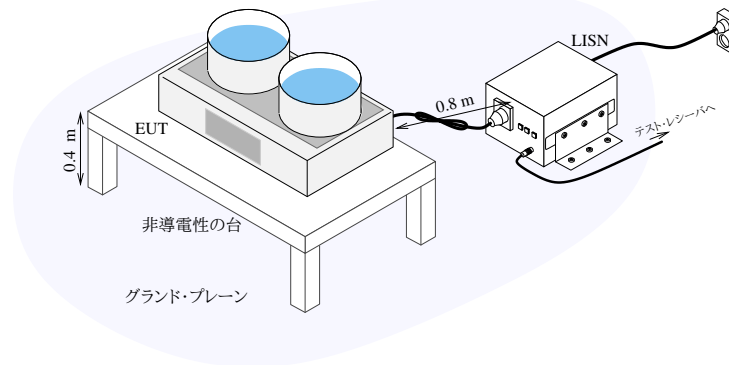


図 7: 伝導エミッション測定の設定アップの例

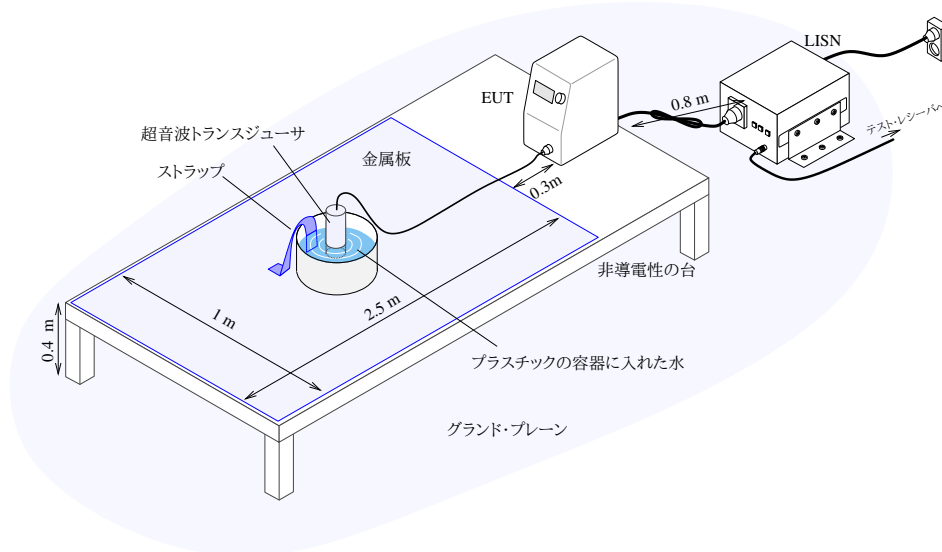
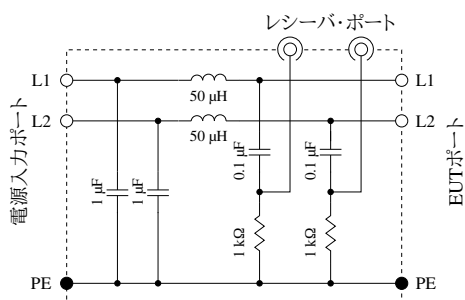


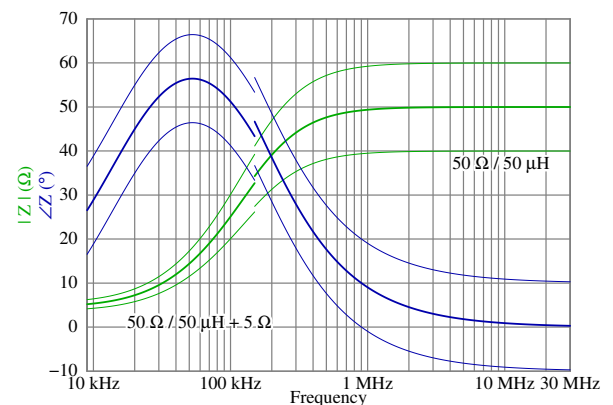
図 8: 超音波治療器の伝導エミッション測定の設定アップの例

図 9: LISN (50 μ H / 50 Ω) の原理 — 単相電源用

体への影響を生じる可能性があるため、人体への影響については別途考慮が必要となる。

これに関して、47 CFR 18 の中でも、

- 47 CFR 1.1307(b) — 曝露が限度を超える場合の環境アセスメントの要求
- 47 CFR 1.1310 — 一般的な曝露限度

図 10: LISN のインピーダンス — 50 μ H / 50 Ω + 5 Ω 、及び 50 μ H / 50 Ω LISN

- 47 CFR 2.1091 — モバイル・デバイスの曝露評価
- 47 CFR 2.1093 — ポータブル・デバイスの曝露評価



図 11: LISN の例 (写真は Rohde & Schwarz 社の厚意による)

露評価

の該当する規定に従わなければならない旨が 47 CFR 18.313^{†28}で明記されている。^{†29}さらに、無線周波デバイス全般に対する一般的な要求として、ISM 機器としての機能のために意図的に発生させられるもの以外の電磁界、例えばデジタル回路などの非意図放射器の部分からの電磁界の影響の考慮も求められるようになっている。

曝露の制限とその評価に関しては §8.3 で改めて触れる。

8 補足

8.1 外挿による電磁界強度の推定の例

47 CFR 18 のエミッション限度 (表 3) は大きな測定距離で規定されており、§4.4 で述べたように、多くの場合は 規定された距離での電磁界強度を近い距離での測定結果からの外挿によって推定することになる。

この場合、 $1/d$ (-20 dB/decade) での減衰を仮定する場合以外は、近くの複数の距離での測定結果から減衰のカーブを推定することが必要となる。これに関して 47 CFR 18 では「距離と電磁界強度のカーブを描画し、限度が規定された距離での電磁界強度を外挿するために延長する」のように述べられているだけで、それ以上に具体的な方法の記載はない。

測定を様々な距離で行なった結果を両対数で^{†30}プロットすると、それらのデータは概ね -20 dB/decade ($1/d$) かそれよりも急激な減衰を

^{†28} 47 CFR 18.313 は 2020 年の 85 FR 18150 で追加された。

^{†29} 電磁界への曝露の制限は他の規則でも定められていることがある。例えば Department of Labor は 29 CFR 1910.97 で労働者の非電離放射線に対する曝露の制限を定めている。

^{†30} 横軸を距離の対数、縦軸を $\mu\text{V}/\text{m}$ で表現した電界強度の対数か $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ で表現した電界強度として。

示す直線上に乗るか、あるいは距離が大きくなると減衰が緩やかになって -20 dB/decade に近付くような屈曲したラインに乗ることが予想される。^{†31}

例えば図 12 の青のプロットは 4 つの点が概ね直線上に乗っており、このようなケースでは図 12 の青の破線のようなそれらの点から求めた近似直線から外挿しても、あるいはこのケースではその近似直線の傾斜は -40 dB/decade ($1/d^2$) よりも大きいということで -40 dB/decade の減衰を仮定して外挿しても良さそうである。^{†32}

一方、図 12 の緑のプロットのように距離が大きくなると傾斜が緩やかになるように屈曲しているように見える場合、単純にそれらの全ての点から求めた近似直線を仮定するのは適当ではなく、図 12 の緑の破線のような測定距離が大きい 2 つの点 (このケースでは 20 m と 30 m のデータ) を結ぶ直線から、より望ましくはそれらのあいだの距離で追加で行なった測定の結果も考慮して推定した減衰の傾斜から外挿した方が、あるいはこのケースではその直線の傾斜は -20 dB/decade よりも有意に大きくなさそうであることから -20 dB/decade の減衰を仮定して外挿した方が良さそうに思われる。

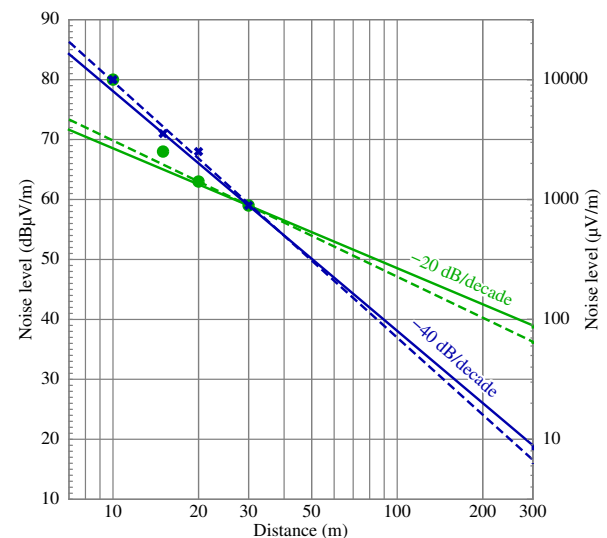


図 12: 外挿による電磁界強度の推定の例

^{†31} そのようにならない場合は測定に問題がある可能性を疑った方がよいと思われる。なお、測定を何箇所の距離で行なうべきかも示されていないが、4 つ以上の測定距離での測定を行なった方がその範囲での減衰が両対数で直線的となっているかどうかを判断しやすいと思われる。

^{†32} §8.1.2 や §8.2.2 で触れるように、測定が行なわれた距離よりも大きな距離で減衰の傾斜が緩くなる可能性もあるが、ここでは測定データから得られた傾斜を単純に延長することができるものと仮定している。

8.1.1 外挿の方法の例

距離 d_1 における電界強度が $E_{1\text{dB}}$ 、距離 d_2 における電界強度が $E_{2\text{dB}}$ であった場合、両対数でその 2 点を通る直線は単純に

$$E_{\text{dB}}(d) = \frac{E_{2\text{dB}} - E_{1\text{dB}}}{\log(d_2) - \log(d_1)} (\log(d) - \log(d_1)) + E_{1\text{dB}}$$

と表現できる。

測定データが 3 つ以上あり、それらが概ね直線上に乗っていると判断した場合、それらの測定データを近似する直線は最小二乗法によって求めれば良さそうである。だが、それが適当であれば、より簡単に、その代わりに最も小さい距離と最も大きな距離の 2 点や距離が大きい方の 2 点での結果を通る直線の傾斜、あるいはそれぞれの隣り合う 2 点の結果を通る直線の傾斜のうちで最も傾斜が緩いもの（最も悲観的な推定となるもの）を減衰の傾斜の推定値として用いても良いかも知れない。

いずれの場合も、計算で求められた減衰の傾斜（例えば -43.2 dB/decade のような）をそのまま用いることもできるだろうが、その代わりに例えば「測定データから推定された減衰の傾斜は -40 dB/decade よりも大きかったので、減衰の傾斜として -40 dB/decade を仮定して推定を行なう」のような判断を行なうこともできるだろう。

また、より簡易的な方法として、例えば計算なしにグラフ上で「減衰の傾斜は -40 dB/decade よりも大きい」のように判断できるかも知れず、また規定の測定距離における値の推定もグラフ上で行なう（例えば、データをグラフ用紙にプロットし、プロットされたデータを通る直線を定規で引き、その直線の所定の測定距離における値をグラフ上から読むような）こともできるかも知れない。

適合性評価でどのような方法を用いるべきかは 47 CFR 18 では具体的に示されておらず、自らの責任で妥当な推定を行なうことになるだろうが、いずれの場合も、推定の結果の記録や報告では、それが推定値である旨、またその推定をどのような方法で行なったかを、そしてそれが明確でない場合はその推定の根拠を明確に示すべきだろう。

8.1.2 外挿による推定の限界

§4.4 で述べたように、近い複数の距離での測定結果から得られたカーブを延長して規定の距離（例え

ば 300 m）での電磁界のレベルを推定することは 47 CFR 18 で定められた方法の 1 つである。

だが、この方法での推定の結果は例えば次のような事象の影響を受けることが予期されるため、そのような影響をできる限り抑えるように務めるとともに、得られた推定値はそのようなものとして扱うことが望ましいだろう。

- 近い距離での測定結果が直線的な減衰を示していたとしても、それよりも遠い距離でその直線的な減衰が続くかどうかはわからない。

例えば図 13 の例で、10 m までの測定を行なった場合、その測定の結果は直線的な減衰を暗示し、これから図 13 で実線で示したような直線的な減衰を仮定して規定の距離における電磁界のレベルを推定することは自然だろう。だが、この場合の実際の減衰は図 13 の破線のようにより遠い距離で緩やかになっているかも知れず、その場合、規定の距離における実際の電磁界のレベルは先の推定よりも著しく強いものとなるかも知れない。

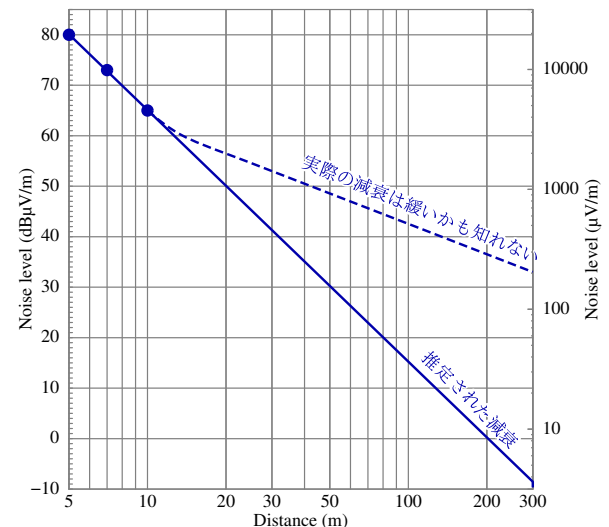


図 13: 外挿による推定の限界 — 減衰の傾斜が変化する場合かも知れない

従って、47 CFR 18 (MP-5) の規定上は近い複数の距離での測定結果から導いた $1/d$ (-20 dB/decade) よりも大きな減衰率を用いて 300 m や 1600 m での電磁界の強さを推定することが許容されるものの、状況によってはその推定は著しく甘いものとなる可能性も考えられる。

これは遠方での電磁界のレベルを近い距離で

の減衰から推定するという方法そのものに起因するもので、その回避は困難であろうが、状況によってはできる限り大きな距離までの測定を行なうことが助けとなるかも知れない。例えば図 13 の例では、15 m 程度以上の距離での測定も行なっていれば減衰の傾斜が緩やかになっていることに気づき、よりの確な推定を行なえた可能性もありそうである。

- それぞれの測定結果に含まれる測定のばらつきは減衰の傾斜の推定に影響し、これが規定の距離での電磁界のレベルの推定値に著しいばらつきをもたらす可能性がある。

例えば概ね -40 dB/decade ($1/d^2$) の減衰となるデータについて 7 m と 10 m の 2 点での測定結果から両対数で直線的な減衰を仮定して単純に推定を行なった場合、図 14 の緑の線で図示するように、それぞれの測定結果が $\pm 1 \text{ dB}$ 変化したならば推定された減衰の傾斜が $-40 \pm 13 \text{ dB}$ の幅で変化し、300 m での推定値に $\pm 20 \text{ dB}$ 程の変化をもたらす計算となる。

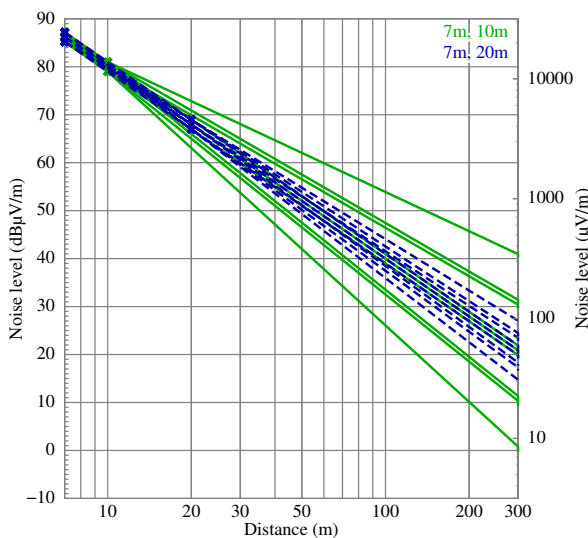


図 14: 外挿による推定の限界 — 測定のばらつきの影響

7 m と 20 m の 2 点での測定結果からの同様の推定の場合、図 14 の青の線で図示するように、それぞれの測定結果の $\pm 1 \text{ dB}$ の変化に伴う 300 m での推定値の変化は $\pm 6 \text{ dB}$ 程に緩和されそうである。

この影響を抑えるためにはできる限り大きな距

離までの測定^{†33}を行なうことが、また測定のばらつきをできる限り抑えることが望ましく、測定のばらつき (ここでは系統的な誤差はそれほど重要ではない) を抑える上では測定を複数回行なって平均値を求めることが助けとなるかも知れない。

また、規定の距離での電磁界のレベルの推定に用いる減衰の傾斜の決定に際して他の方位 (§4.4 で述べたように、充分な数の方位で測定して放射パターンをプロットするように、また可能であればそれぞれの方位で複数の距離で測定するように定められている) や他の周波数で得られたデータを考慮することも助けとなるかも知れない。

8.2 参考: 電磁界の減衰

電磁波は距離 d に対して $1/d$ で減衰すると仮定されることが多いが、この仮定は

- 放射源が波長と比較して小さく、
- 他の物体からの反射の影響がなく (自由空間)、かつ
- 放射源から十分に離れている (遠方界)

場合に成り立つ。

だが、エミッション測定では

- 高い周波数では放射源が波長と比較して大きくなり、
- 大地面からの反射があり、また
- 低い周波数では放射源に近い位置 (近傍界) での測定となる

ことも珍しくなく、これらが電磁界の減衰に影響する可能性が予期される。

従って、これらの要因が電磁界の測定結果や距離に伴う減衰にどのように影響するかを理解することが望ましいかも知れない。

以下では、大地面での反射の影響、及び短い測定距離での測定の影響を簡単に示す。

^{†33} §4.2 で述べたように、その測定に適した広さ (グランド・プレーンは敷設されていなくても良い) がある開放形テスト・サイトであれば、30 MHz 以下の周波数範囲や 10 m よりも大きな測定距離について検証されていないサイトであっても 30 MHz 以下の周波数の 10 m よりも大きな距離での測定に使用できると考えられる。

8.2.1 大地面での反射の影響 (≥ 30 MHz)

大地面 (金属のグランド・プレーンであれ単なる地面であれ) 上での測定の場合、受信アンテナには放射源 (EUT) からの直接波以外に大地面での反射波も到達する (図 5) が、これがその距離でのエミッションの測定結果に、従って距離を変えて測定を行った時の減衰のカーブに影響する。

放射源の高さを 1 m、受信アンテナの高さを測定距離 10 m 以下では 1~4 m、測定距離 10 m 以上では 2~6 m、放射源と受信アンテナの指向特性はダイポール・アンテナと同様、大地面は全反射 (金属のグランド・プレーン) として減衰量を計算したもの^[11] を図 15 と図 16 に示す。

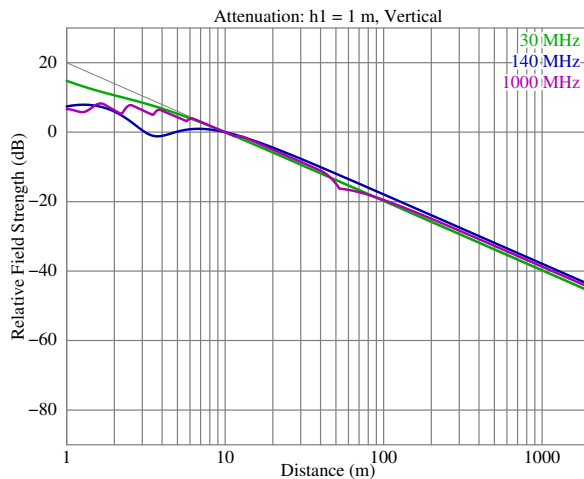


図 15: グランド・プレーン上での電磁波の減衰 — 垂直偏波

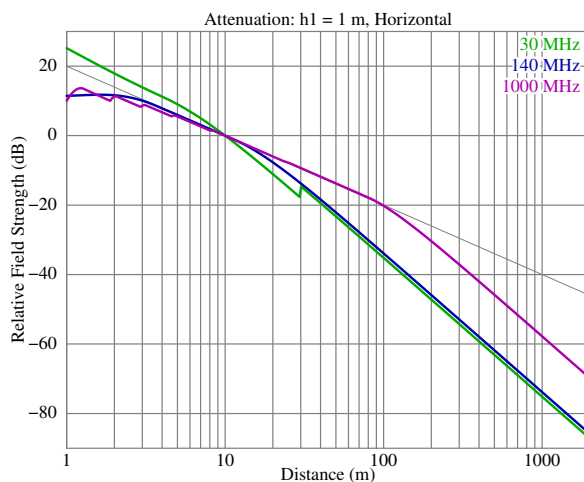


図 16: グランド・プレーン上での電磁波の減衰 — 水平偏波

垂直偏波 (図 15) では測定距離 10 m 以下では

特に低い周波数で変則的な挙動が見られるが、それ以遠の減衰は概ね $1/d$ (-20 dB/decade) に沿っている。

水平偏波 (図 16) では、測定距離 10 m 以下で特に低い周波数でやや変則的な挙動が見られるだけでなく、測定距離が大きくなった時の減衰の傾斜が $1/d$ (-20 dB/decade) よりも大きくなっているのが見られる。これは、測定距離が大きくなると直接波と反射波の距離の差が小さくなり、直接波の相当の部分が反射波 (この条件では位相が反転する) で相殺されるためである。

これからすると、30 MHz 以上の周波数範囲については、

- 10 m 程度以上 (例えば 10 m や 30 m) での測定結果から $1/d$ の減衰を仮定して 300 m や 1600 m での電界強度を推定すれば、垂直偏波については妥当な、水平偏波についても甘くはならない推定を行なえそうである;
- 10 m よりも近い距離では変則的な挙動を生じそうであるので、例えば 3 m での測定結果から $1/d$ での推定を行なうこと、あるいは 10 m 以下の複数の距離での測定結果から推定した減衰カーブでの外挿を行なうことは好ましくないかも知れない^{†34}

と考えられそうである。

8.2.2 近傍界となることの影響 (≤ 30 MHz)

放射源が小さい場合、電磁界の放射源から $\lambda/2\pi$ までの距離を近傍界、それ以遠を遠方界として考えることができる。^{†35}

一般にはエミッション測定は遠方界で行なうことが望ましいが、特に低い周波数では、その実現は困難なものとなる。

^{†34} 例えば 図 15 の 140 MHz のカーブでは、距離 3 m での値から $1/d$ で 300 m での値を推定すると 10 dB 程度甘い結果となりそうである。また距離 3~10 m での値は距離に対してほぼ一定となっておりそれから推定したカーブを 300 m での値の推定に用いることは明らかに適切ではない。

^{†35} 放射源が大きい場合は放射源の大きさを D として $2D^2/\lambda$ 以遠を遠方界と考える。 $D = 1$ m の場合で 1 GHz で $2D^2/\lambda \simeq 6.7$ m となるので、測定距離 10 m でも遠方界とみなせる。だが、10 GHz では $2D^2/\lambda \simeq 67$ m となり、10 m 程度の測定距離では干渉に伴う複雑な挙動を生じる可能性が予期される。だが、放射源の大きさ D が小さくなれば $2D^2/\lambda$ は D の自乗に反比例して小さくなり、従ってより近い距離から遠方界とみなせるようになる。

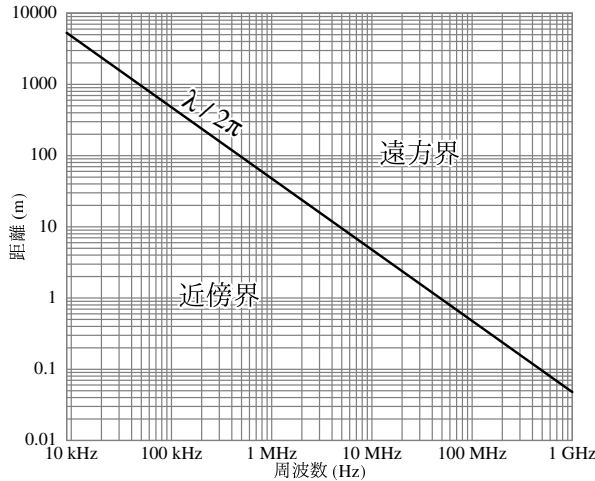


図 17: 遠方界とみなせる距離

30 MHz では $\lambda = 10 \text{ m}$ であるので $\lambda/2\pi = 10/2\pi \approx 1.6 \text{ m}$ となり、30 MHz 程度以上の周波数範囲では 3 m でも遠方界とみなせる状態となる。

だが、周波数が低い場合、

- 9 kHz — $\lambda \approx 33 \text{ km}$, $\lambda/2\pi \approx 5.3 \text{ km}$
- 30 kHz — $\lambda \approx 10 \text{ km}$, $\lambda/2\pi \approx 1.6 \text{ km}$
- 100 kHz — $\lambda \approx 3 \text{ km}$, $\lambda/2\pi \approx 0.48 \text{ km}$
- 1 MHz — $\lambda \approx 300 \text{ m}$, $\lambda/2\pi \approx 48 \text{ m}$

となるので、このような低い周波数では実際の測定は近傍界で行なうことになるだろう (図 17)。

自由空間においては、遠方界では電磁界の強度は $1/d$ (−20 dB/decade) で減衰すると仮定できるが、近傍界での減衰はこのカーブに従わない (図 18, 図 19)。また、一般に電磁界の磁界の成分と電界の成分の比率は 377Ω であると仮定されるが、この仮定も近傍界では成り立たない (図 20)。

微小ループから距離 d での磁界の強さは、磁気ダイポール・モーメント $\hat{m}$ 、 $\beta_0 = \pi/2\lambda$ として、

$$H_\theta = j \frac{\omega \mu_0 \hat{m} \beta_0^2}{4\pi \eta_0} \sin \theta \left(j \frac{1}{\beta_0 r} + \frac{1}{\beta_0^2 r^2} - j \frac{1}{\beta_0^3 r^3} \right) e^{-j\beta_0 r}$$

と表現でき [8]、概ね、 $d < \lambda/2\pi$ では $1/d^3$ 、 $d > \lambda/2\pi$ では $1/d$ に沿ったカーブとなる (図 18)。^{†36}

30 kHz では $\lambda/2\pi \approx 1.6 \text{ km}$ となるので、 $f \leq 30 \text{ kHz}$ であれば 1600 m かそれ以上まで概ね $1/d^3$ で減衰すると推定される。この場合、例えば 5 m、

^{†36} この影響は主にループ・アンテナが測定に用いられる低い周波数帯で現れるため、ここでは磁界のみで考えている。

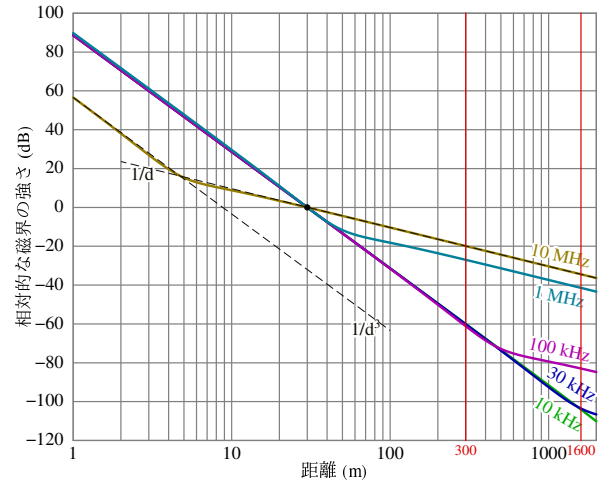


図 18: 微小ループからの磁界の減衰

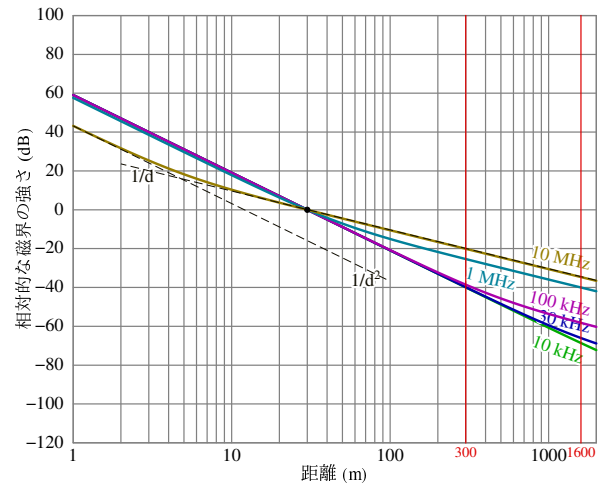


図 19: 微小ダイポールからの磁界の減衰

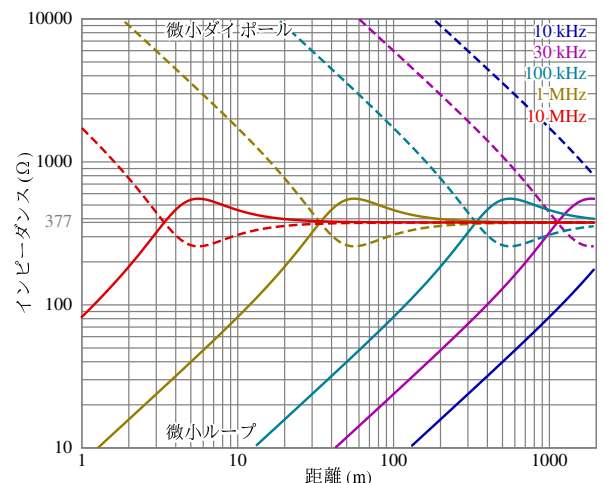


図 20: 電磁界のインピーダンス

10 m、30 m で測定した結果は概ね $1/d^3$ のカーブに沿いそうであるし、その場合、 $1/d^3$ の減衰を仮

定して 300 m や 1600 m まで外挿しても良さそうである (図 18)。

1 MHz では $\lambda/2\pi \simeq 48$ m で、この場合も 5 m、10 m、30 m で測定した結果は概ね $1/d^3$ のカーブに沿いそうである。だが、この周波数では 50 m 程度以遠では減衰の傾斜が緩やかになるので、30 m までの測定結果からは $1/d^3$ の減衰を仮定できるものの、 $1/d^3$ で 300 m や 1600 m まで外挿した結果は著しく甘いものとなる可能性がある (図 18)。

微小ダイポールからの放射で考えると、

$$H_{\phi} = \frac{\hat{I}dl}{4\pi} \beta_0^2 \sin \theta \left(j \frac{1}{\beta_0 r} + \frac{1}{\beta_0^2 r^2} \right) e^{-j\beta_0 r}$$

となり [8]、 $d < \lambda/2\pi$ では概ね $1/d^2$ で減衰し、上と同様に $d > \lambda/2\pi$ で減衰の傾斜が $1/d$ に変化するだろう (図 19)。

実際の放射源は微小ループでも微小ダイポールでもなく、減衰のカーブを予測することは難しいが、近傍での減衰の傾斜が $1/d$ よりも大きい場合、いずれにしても $\lambda/2\pi$ までのあいだに減衰の傾斜が変化して $1/d$ に漸近することが予期される。

これは机上での推定であるが、実際の測定でもこれとある程度似通った挙動を生じることが想定される。

8.3 人体の無線周波電磁界への曝露の制限

FCC の規則には人体の無線周波電磁界への曝露の制限に関する規定も含まれており、この制限の基礎となる SAR (比吸収率) の限度 (表 6) は 47 CFR 1.1310(b) と (c) で、またこれに基づいた最大許容曝露 (MPE) の限度は 47 CFR 1.1310(e) で規定されている。^{†37}

この制限は全ての無線周波デバイス (非意図放射器を含む) に適用され、適合性評価の一部として、

- 曝露の評価の免除の対象となることを示す (§8.3.1 参照)、

^{†37} 2020 年に発行された 85 FR 18131 (ET Docket No. 03-137 and 13-84, FCC 19-126) で人体の無線周波電磁界への曝露の制限に関する規則の大幅な変更が行われた。この改訂では SAR (比吸収率) や 最大許容曝露 (MPE) の限度そのものは変更されていないが、曝露評価に関する規定、例えば曝露評価の免除に関する規定は大きく変更され、また明確化されており、特に、評価の免除の条件が変わっていることに注意が必要であろう。この改訂版の規則は 2020 年 6 月 1 日に発効し、その発効から 2 年間は移行期間となっていた。

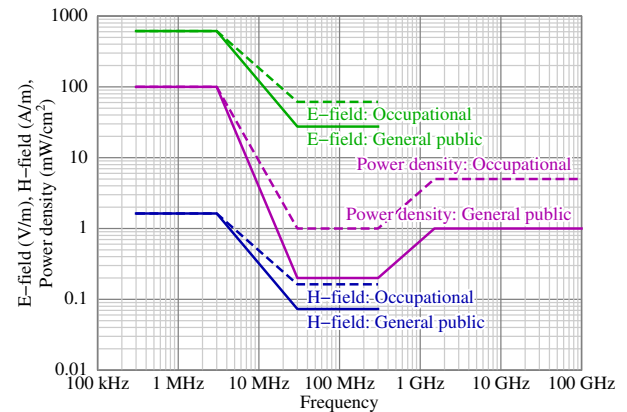


図 21: MPE 限度 (47 CFR 1.1310 に基づく)

- 曝露の評価を行ない、曝露の限度に適合する旨を宣言する、あるいは
- 曝露の限度を超える場合、環境アセスメントを実施する^{†38}

のいずれかを行ない、文書化を行なうことも必要となるだろう。

証明 (certification) の申請に際してはこの記録も他の資料と共に提出することが必要となる。SDoC の場合は記録の提出などは不要であるが、その場合も確認を行ない、その記録を他の資料と共に保管すべきであろう。

モバイル・デバイスやポータブル・デバイスの曝露評価については 47 CFR 2.1091 や 47 CFR 2.1093 で規定されており、それぞれの場合でどの限度が適用されるかを表 7 に一覧として示す。

モバイル・デバイスとポータブル・デバイスの双方の曝露条件に該当する場合、それぞれに対する規則が適用される。

47 CFR 2 の規定には曝露評価の免除の対象となる条件 (以下で触れる) も含まれており、その条件に該当する場合は SAR 測定などの詳細な曝露評価は不要となる。

デバイスが同時に放射する可能性がある複数の放射源 (非意図放射器を含む) を含む場合、それぞれの放射源が曝露評価の免除の条件に該当する、あるいは曝露限度に適合するとしても、デバイス全体としての追加の検討 (§8.3.1.3 参照) が、場合によってはより詳細な曝露評価を改めて実施することが必要となるだろう。^{†39}

^{†38} 高出力の固定型の設備以外では、この選択肢は通常は適用しない。

	職業的曝露	公衆の曝露
全身平均 SAR	0.4 W/kg	0.08 W/kg
ピーク空間平均 SAR (1 g 平均)	8 W/kg	1.6 W/kg
手足に対する ピーク空間平均 SAR (10 g 平均)	20 W/kg	4 W/kg

表 6: SAR 限度 (47 CFR 1.1310 より)

周波数 f		FCC RF 曝露限度
$f \leq 100$ kHz		全てのデバイスはケース・バイ・ケースで評価
$100 \text{ kHz} < f \leq 300 \text{ kHz}$		SAR 限度
$300 \text{ kHz} < f \leq 6 \text{ GHz}$	ポータブル・デバイス	SAR 限度
	モバイル・デバイス	SAR 限度、もしくは MPE 限度
$f > 6 \text{ GHz}$		MPE 限度

表 7: モバイル/ポータブル・デバイスへの RF 曝露限度の適用 (KDB 447498, *D04 Interim General RF Exposure Guidance v01* より)

曝露評価に関しては、ここで触れていない事項を含めて、

- 47 CFR 1 Subpart I
- 47 CFR 2.1091, 2.1093
- FCC KDB、例えば [KDB #447498](#), *D04 Interim General RF Exposure Guidance v01*
- “*Mobile and Portable Device RF Exposure Policies KDB Publication 447498 D01*”, (FCC, April 27, 2022 (TCB workshop presentation))

などで詳しく述べられている。

8.3.1 曝露評価の免除

8.3.1.1 モバイル・デバイス

モバイル・デバイス (RF 放射源の放射構造と人体とのあいだに通常は 20 cm 以上の離隔距離が維持されるような形で用いられる、固定の場所以外での使用のために設計されたデバイス) は、47 CFR 2.1091 で規定されているように、以下のいずれかの条件を満たすならばそれ以上の曝露評価は不要となる：

^{†39} 曝露の制限に適合することが適切に確認された無線モジュールを非意図放射器に組み込んだ場合も、非意図放射器からの放射、あるいは他の無線モジュールからの放射の寄与によりそのデバイス全体としては曝露の制限に不適合となる可能性があるため、その程度は別として、デバイス全体としての曝露の評価を改めて行なうことが必要となる。だが、非意図放射器の影響に関しては、非意図放射器の寄与は評価の免除の閾値 (§8.3.1) を大幅に下回る、あるいはその寄与は意図放射器の寄与と比較して著しく低くほぼ無視できると、従ってより詳細な評価は不要であると判断できることが多そうに思われる。

1. RF 放射源の時間平均最大出力が[†] 1 mW を超えない。
2. 人と放射源のあいだの最小離隔距離 R (m) が $\lambda/2\pi$ 以上で、RF 放射源の時間平均最大出力が 47 CFR 1.1307(b)(3)(i)(C) の Table 1 (表 8) で示された ERP (実効放射電力) を超えない。

周波数 (MHz)	ERP の閾値 (W)
0.3~1.34	$1920 R^2$
1.34~30	$3450 R^2/f^2$
30~300	$3.83 R^2$
300~1500	$0.0128 R^2 f$
1500~100000	$19.2 R^2$

f は周波数 (MHz)、 R は距離 (m) で、 $\lambda/2\pi \leq R$

表 8: ルーチン環境評価の対象となる単一の RF 発生源 (47 CFR 1.1307(b)(3)(i)(C) Table 1 より)

3. 周波数 0.3~6 GHz、距離 20~40 cm の場合、そのデバイスの ERP (ERP を容易に得られない場合、放射構造の電氣的長さが $\lambda/4$ を超えないかアンテナのゲインが半波長ダイポールのゲインよりも小さい場合に限り、代わりに最大時間平均出力を用いても良い) が下記の式の $ERP_{20\text{cm}}$ を超えない。

$$ERP_{20\text{cm}} \text{ (mW)} = \begin{cases} 2040 f_{\text{GHz}} & 0.3 \text{ GHz} \leq f_{\text{GHz}} < 1.5 \text{ GHz} \\ 3060 & 1.5 \text{ GHz} \leq f_{\text{GHz}} \leq 6 \text{ GHz} \end{cases}$$

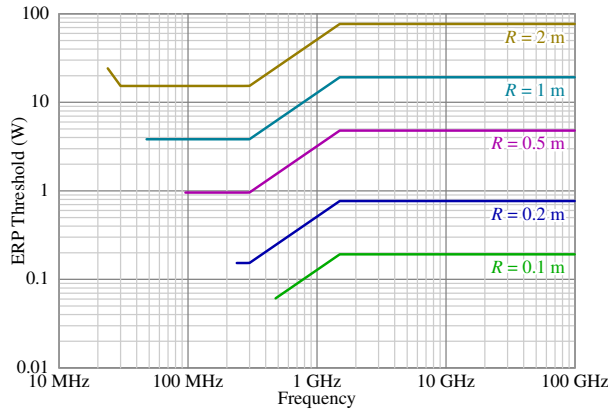


図 22: ERP の閾値のカーブの例 (47 CFR 1.1307 (b)(3)(i)(C) Table 1 (表 8) に基づく)

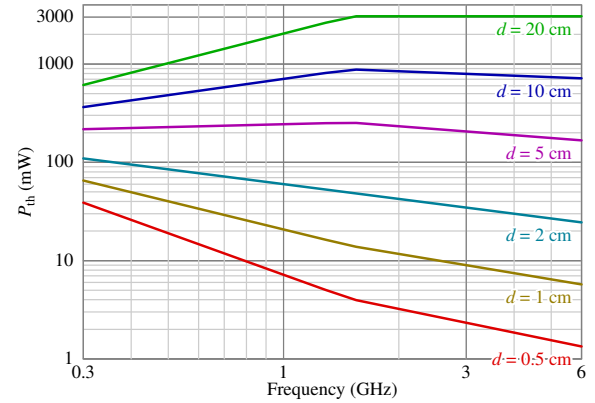


図 23: P_{th} のカーブの例 (§8.3.1.2 で示した式に基づく)

8.3.1.2 ポータブル・デバイス

ポータブル・デバイス (RF 放射源の放射構造と人体とのあいだが 20 cm 以内となるような形で用いられる、固定の場所以外での使用のために設計されたデバイス) は、47 CFR 2.1093 で規定されているように、以下のいずれかの条件を満たすならばそれ以上の曝露評価は不要となる:

1. RF 放射源の時間平均最大出力が 1 mW を超えない。
2. 人と放射源のあいだの最小離隔距離 R (m) が $\lambda/2\pi$ 以上で、RF 放射源の時間平均最大出力が 47 CFR 1.1307(b)(3)(i)(C) の Table 1 (表 8) で示された ERP を超えない。
3. 周波数 0.3~6 GHz、距離 0.5~20 cm の場合、RF 放射源の時間平均最大出力が下記の式の P_{th} を超えない。

$$P_{th} \text{ (mW)} = \begin{cases} ERP_{20\text{cm}}(d/20 \text{ cm})^x & d \leq 20 \text{ cm} \\ ERP_{20\text{cm}} & 20 \text{ cm} < d \leq 40 \text{ cm} \end{cases}$$

$$x = -\log_{10} \left(\frac{60}{ERP_{20\text{cm}} \sqrt{f_{\text{GHz}}}} \right)$$

$$ERP_{20\text{cm}} \text{ (mW)} = \begin{cases} 2040 f_{\text{GHz}} & 0.3 \text{ GHz} \leq f_{\text{GHz}} < 1.5 \text{ GHz} \\ 3060 & 1.5 \text{ GHz} \leq f_{\text{GHz}} \leq 6 \text{ GHz} \end{cases}$$

例えば、 $f = 2.45 \text{ GHz}$ 、 $d = 5 \text{ cm}$ の場合、上の規則 3 より、

$$ERP_{20\text{cm}} = 3060 \text{ (mW)}$$

$$x = -\log_{10} \left(\frac{60}{3060 \sqrt{2.45}} \right) = 1.902 \dots$$

$$P_{th} = 3060(5/20)^{1.902 \dots} \simeq 219.0 \text{ (mW)}$$

となり、RF 放射源の時間平均最大出力が 219 mW 以下であればより詳細な曝露評価、例えば SAR の測定は不要と判断できることになる。

8.3.1.3 同時送信

曝露評価の免除の条件 (時間平均最大出力が 1 mW を超えないという条件を除く) を満たす、あるいは SAR か MPE による曝露評価が行なわれた複数の RF 放射源 (非意図放射器を含む) がデバイスに含まれ、それらが同時に放射を生じる可能性がある場合、47 CFR 1.1307 (b)(3)(ii) で規定されているように、曝露評価の免除の判断か曝露評価に用いられたそれぞれのパラメータのそれに対応する閾値や曝露限度に対する比率の合計が 1 以下であれば、すなわち

$$\sum_i \frac{P_i}{P_{th,i}} + \sum_j \frac{ERP_j}{ERP_{th,j}} + \sum_k \frac{Evaluated_k}{Exposure\ limit_k} \leq 1$$

であれば、そのデバイス全体の曝露評価は免除可能と判断できる。^{†40}

^{†40} MPE や SAR での評価の結果は、 $\sum_k \frac{SAR_k}{SAR_{lim}} + \sum_k \left(\frac{MPE_{field,k}}{MPE_{field,lim}} \right)^2 + \sum_k \frac{MPE_{PD,k}}{MPE_{PD,lim}}$ のように、電界や磁界での値は曝露限度に対する比率を自乗して、SAR や電力密度での値は曝露限度に対する比率をそのまま加算する。

9 参考資料

- [1] *Code of Federal Regulations (CFR)*,
<https://www.gpo.gov/fdsys/browse/collectionCfr.action?collectionCode=CFR>
- [2] FCC/OET MP-5, *Methods of Measurements of Radio Noise Emissions from Industrial, Scientific and Medical equipment*, FCC, 1986,
https://www.fcc.gov/Bureaus/Engineering_Technology/Documents/measurement/mp5/mp5-1986.pdf
- [3] ANSI C63.4-2014, *American National Standard for Methods of Measurement of Radio-Noise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9 kHz to 40 GHz*, IEEE, 2014
- [4] ANSI C63.5-2006, *American National Standard — Electromagnetic Compatibility — Radiated Emission Measurements in Electromagnetic Interference (EMI) Control — Calibration of Antennas (9 kHz to 40 GHz)*
- [5] IEEE Std 291-1991, *IEEE Standard Methods for Measuring Electromagnetic Field Strength of Sinusoidal Continuous Waves, 30 Hz to 30 GHz*
- [6] *Office of Engineering and Technology Laboratory Division Knowledge Database (KDB)*,
<https://apps.fcc.gov/oetcf/kdb/>
- [7] CISPR 11, *industrial, scientific and medical equipment – radio-frequency disturbance characteristics – limits and methods of measurement*
- [8] *Introduction to Electromagnetic Compatibility (2nd edition)*, Clayton R. Paul, 2006
- [9] デジタル・デバイスの FCC 規制への対応 — 47 CFR 15 Subpart B の概要, 株式会社 e・オータマ 佐藤, 2009–2023,
<https://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html>
- [10] CISPR 11 の概要, 株式会社 e・オータマ 佐藤, 2020,
<https://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html>
- [11] 測定距離 10 m と 3 m でのエミッション測定の相関, T. Sato, 2016,
<https://t-sato.in.coocan.jp/compliance/correlation-emission-10m-3m.pdf>