

電波防護指針

諮問第38号「電波利用における人体の防護指針」

平成2年6月

目次

はじめに	2
第1章 目的と範囲	4
第2章 定義	5
第3章 防護指針	8
3.1 防護指針の性格と構成	8
3.2 管理指針	12
3.3 基礎指針	19
3.4 注意事項	19
第4章 測定法	20
4.1 測定法の性格と構成	20
4.2 電磁界強度測定の限界	20
4.3 電磁界強度測定における基本的条件	21
4.4 電磁界強度の測定系	22
4.5 測定値の処理及び評価	23
4.6 測定法の適用手順	28
4.7 測定上の注意事項	30
第5章 電磁界強度の推定法	31
5.1 電磁界強度推定の性格と構成	31
5.2 電磁界強度の推定	31
第6章 防護法	35
6.1 防護法の性格と構成	35
6.2 防護方法	35
別紙1 電波防護指針の根拠	37
別紙2 電磁界強度の測定距離	53
別紙3 推定法に関する事項	55

はじめに

近年の社会・経済活動及び情報化の著しい進展に伴い、電波利用分野における需要は高まる一方である。

電波を通信媒体として利用する無線通信は、時間と距離を克服して即時に情報を伝達できるという電波の特性を最大限に生かしたものであり、現代社会においては重要な生活・産業基盤の一つとして位置づけられている。無線通信の中で最も一般的な利用は、中波、短波、FM、TV、衛星と幅広いメニューを取り揃えている放送分野であり、家庭の茶の間をはじめ全国のあらゆる場所に教養・娯楽に関する情報や多彩な音響・映像文化を提供し、国民生活を潤いのあるものにしていく。また、大容量マイクロ回線や通信衛星回線を利用して、電話、ファクシミリ、データ通信などの多種多様な情報を、日本国内はもとより世界中に瞬時に伝達しており、文字どおり高度情報社会の担い手となっている。日常生活や自然災害時においても、国、地方自治体、救急、消防、警察などの公共機関をはじめ、医療、海上交通、運輸などの多くの公益機関において、迅速な情報伝達手段として重要な役割を果たしている。最近では、プライベートな分野での電波利用が目立って増えており、特に家庭内で使用するコードレス電話、都市内における行動範囲を広げる携帯無線電話、趣味やレジャー分野で人気のあるパーソナル無線などは、専門的な知識を必要としないこともあって、個々のライフスタイルに応じて手軽に利用されるようになってきている。

同様に、家庭内で使用される電子レンジをはじめ、セラミックや木材の乾燥、プラスチックやビニールの容着加工等のいわゆる電波をエネルギーとして利用する形態も国民生活、産業・経済活動に不可欠な存在になっている。また、骨折、神経痛、癌などの治療に電波を利用する医療技術も大きな広がりを見せている。

このような中で電波利用施設から発射されている電波が、生体に好ましくない影響を及ぼすのではないかと不安や疑問が提起されるようになってきている。生体が強い電磁界にさらされた場合には、電磁界のエネルギーによる深部体温の上昇、あるいは電流刺激による神経・筋の興奮などいくつかの生体作用の生じることがこれまでの内外における調査研究によって明らかにされている。しかし、無線通信施設をはじめとする各種の電波利用施設（設備）から発射されている電波は、我々の日常生活の範囲においては非常に弱いエネルギー分布であり、懸念されるような生体作用が起きることはほとんどないと考えられている。しかしながら、今後、これまでになかったさまざまな電波の利用形態が現れる可能性があり、また、電波利用に関して一定の知識のない人々が、単に施設の規模の大きさや外観の特殊性などで電波に対する誤解や不安を抱き、無用な混乱を招くことも予想される。このため、電波のエネルギー量と生体への作用との関係を定量的に明らかにすることが重要であり、また、健全な電波利用の発展を図るために、電波防護指針を策定することが求められている。

この電磁界と生体との相互作用には、熱や電流刺激による作用のほかに、比較的弱い電磁界でも細胞レベルで生体に直接作用して、なんらかの影響を及ぼす可能性があることを示唆する研究報告があるなど、なお究明すべき問題が数多く残されていることも事実である。その反面、電磁界と生体の相互作用に関する研究は、40年以上にわたって行われており多くの成果が報告されているほか、近年においては生体作用に関する研究の方法が体系

化されるなど著しい進歩があり、専門家の中で共通の理解に達している事項が数多く蓄積されている。

本答申においては、それらの事項と最近の研究成果を踏まえ、電波防護についての正しい理解を通し、電波利用の健全な発展を図るため、電波利用における人体の防護指針を提示している。今後、この防護指針の主旨に照らし、行政における適切な措置及び電波利用者等における自主的な運用基準を策定する際のガイドラインとして積極的に活用するのが望ましい。

第1章 目的と範囲

電波防護指針は、人体の安全と電波利用施設の運用との間の適切な調和を図ることによって、社会・経済的に需要の高まっている電波利用の健全な発展に資することを目的とする。このため、電波利用において人体が電磁界にさらされる場合、その電磁界が人体に好ましくない電磁現象（深部体温の上昇、電撃、高周波熱傷など）を及ぼさない安全な状況であるか否かの判断をする際の基本的な考え方と、それに基づく数値、電波利用施設周辺における電磁界強度等の測定法及び推定法並びに人体に照射される電磁界の強度を軽減するための防護法を示し、電波利用の安全基準、勧告、実施要領などを定める際の指針を提供する。ここで示した数値は、十分な安全率を考慮した人体防護を前提としており、これを超えたからといってそれだけで人体に影響があるものではない。

電波防護指針において対象とする電磁界の周波数範囲は、電波法第2条に定められている範囲（「電波」とは3,000GHz以下の周波数の電磁波をいう。）を全て網羅することが望ましいが周波数割当ての現状、電波利用技術の動向等を考慮し、10kHzから300GHzまでの周波数を対象とした。

電波防護指針は電波利用全般において適用する。具体的には、業務上において電磁界にさらされる場合や日常生活において電磁界にさらされる場合が考えられるが、電波防護指針を実際に適用する場合には、電磁波源の諸元や電磁界にさらされる状況などの様々な条件を十分吟味した上で、電波防護指針の考え方に基づき適切に行うことが必要である。

ここで提示する電波防護指針は、現時点において専門家が共通の認識に達している事項に基づいて記述しているが、暫定的な性格も有している。したがって、今後、この分野における調査研究が進展し、科学的に裏付けされた根拠や新しい考え方等が示された場合には、社会における電波利用の状況等に応じて本防護指針の内容を改める必要がある。

第2章 定義

電波防護指針の解釈に関しては、次の各号の定義に従うものとする。

1. 「電波」とは、電波法第2条に定められた3,000GHz以下の周波数の電磁波をいう。電波防護指針においては、10kHzから300GHzまでの周波数帯を対象とする。
 2. 「電波防護指針」とは、電波利用において人体が電磁界（周波数範囲は10kHzから300GHz までに限る。）にさらされるとき、その電磁界が人体に不要な生体作用を及ぼさない安全な状況であるために、推奨される指針であり、電磁界強度等に関する数値、電磁界の評価方法及び電磁界照射を軽減する防護方法から構成される。
 3. 「基礎指針」とは、人体が電磁界にさらされるとき、人体に生じる各種の生体作用（深部体温上昇、電流刺激、高周波熱傷等）に基づいて、人体の安全性を評価するための指針をいう。電波防護指針の考え方の根拠として位置づけられ、SAR、誘導電流、接触電流等で記述される。
 4. 「管理指針」とは、基礎指針を満たすための実測できる物理量（電界強度、磁界強度、電力密度及び電流）で示した実際の評価に用いる指針であり、電磁界強度指針と補助指針により構成される。
 5. 「電磁界強度指針」とは、対象とする空間における電界強度、磁界強度及び電力密度によって、当該空間の安全性を評価するための指針をいう。
 6. 「補助指針」とは、電磁界強度指針を満足しない場合において、基礎指針に従った詳細評価を行なうために使用する指針をいう。電磁界にさらされる状況（不均一、局所、表面など）、対象とする生体作用（接触電流及び誘導電流）、電波発射源の属性（空中線電力及び周波数帯）が明らかな場合、これらの状況に基づき電磁界強度指針の適用を緩和又は除外する形で表わした指針である。
 7. 「条件P」とは、電波防護指針の考え方に基づいた電波利用を行うことが可能な条件をいう。電波利用の実情が認識されていると共に、防護対象を特定することができる状況下であり、注意喚起など必要な措置可能な場合をいう。
 8. 「条件G」とは、条件Pを満たさない場合をいう。次にあげるような状況を考慮し、十分な安全率を随時適用している。
 - さまざまな、年齢、身体の高さ、健康状態の人々が含まれる。
 - 電波の利用を必ずしも認識していない。
 - 電撃・高周波熱傷に対する予防措置を期待できない。
 - いかなる場合も安全側とすることが望まれる。
- なお、ペースメーカー使用者などの特殊な状況に置かれている人については、本電波防護指針の適用から除外する。（3.4参照）
9. 「低電力放射源」とは、100kHzから3GHzまでの周波数を使用し、定格出力7W以下の電磁放射源をいう。
 10. 「均一ばく露」とは、人体が存在する空間領域の電磁界がほぼ均一とみなせる場合であって、全身がその電磁界にさらされることをいう。この場合、自由空間インピーダンスが $120\pi[\Omega]$ とならない場合も含まれる。自由空間中では、波源からの距離が身長に比べ十分大きい場合（例えば、0.3MHz以下の周波数では15m以上、0.3MHz

から300MHzまでの周波数では10m以上、300MHz以上の周波数では5m以上)であれば均一とみなす。

11. 「不均一ばく露」とは、均一ばく露とみなせない場合をいう。
12. 「局所ばく露」とは、体の一部が集中的に電磁界にさらされる場合をいう。人体の大きさより小さいアンテナのごく近傍での照射や波長の短い電波によるスポット的な照射などの場合を含む。
13. 「全身ばく露」とは、局所に偏らず全身が電磁界にさらされる場合をいう。必ずしも均一とは限らないが局所ばく露ではない場合に相当する。
14. 「平均時間」とは、指針値への適合性を評価するために、着目した生体作用に基づき設定した測定のための時間をいう。電波防護指針で用いる平均時間は、刺激作用においては1秒以内、熱作用においては6分間である。
15. 「比吸収率 (SAR : Specific Absorption Rate)」とは、生体が電磁界にさらされることによって生じる、単位質量当たりの吸収電力をいう。
16. 「接触電流」とは、電磁界中に置かれた非接地導電物体に、接地された人体が触れることによって接触点を介して流れる電流をいう。
17. 「接触ハザード」とは、接触電流を生じさせるような潜在的な状況をいう。
18. 「誘導電流 (密度)」とは、人体が電磁界にさらされることにより人体内部に誘導される電流 (密度) をいう。
19. 「非接地条件」とは、誘導電流が大地へ流れないような大地の影響が無視できる条件をいう。例えば、素足の場合は大地より10cm以上離れた状態である。
20. 「電磁界 (電磁場)」とは、電界 (電場) と磁界 (磁場) の総称をいう。電界と磁界が時間的に変化しないような静的な場合を除けば、両者は必ず同時に存在し、それらの関連はマクスウェル方程式で規定される。
21. 「電界強度」とは、与えられた点に対し、その点に静止した微小正電荷を置くとき、その点電荷が受ける力を電荷の量で割ったベクトル量をいう。力を F 、電荷量を q とすれば、電界強度 E は、 $E = F/q$ [V/m]で与えられる。この防護指針では、電界強度の大きさを単に電界強度と呼ぶ。
22. 「磁界強度」とは、その回転が電流密度及び変位電流密度となるベクトル量をいう。磁束密度を媒体の透磁率で割った量に等しい。単位はA/mで与えられる。この防護指針では、磁界強度の大きさを単に磁界強度と呼ぶ。
23. 「電力密度 (電力束密度)」とは、伝搬の方向に垂直な単位面積当たりの放射電力をいう。例えば、平面波の場合の電力密度 S [W/m²]は、電界強度を E [V/m]、磁界強度を H [A/m]とすれば、自由空間インピーダンス 120π [Ω]により、 $S = E^2 / 120\pi = 120\pi H^2$ のように関連付けられる。
24. 「遠方界」とは、電磁波源からの距離が、 $2D^2/\lambda$ 又は $\lambda/2\pi$ のいずれよりも遠い領域にあり、反射又は散乱がない状態の電磁界をいう。ここで、 D はアンテナの最大寸法、 λ は自由空間波長とする。
25. 「近傍界」とは、遠方界とならない領域の電磁界をいう。
26. 「広帯域測定系」とは、特定の周波数に測定器の同調をとることなく、広い周波数

範囲（例えば、10kHzから300MHzまで）にわたって、電磁界を同一感度で測定できる測定系をいう。

27. 「狭帯域測定系」とは、特定の周波数に測定器の同調をとることにより、電磁界を周波数成分ごとに測定する測定系をいう。通常、測定範囲は極めて広く（例えば、10kHz～18GHz）、高感度で応答時間が短い。
28. 「電磁界プローブ」とは、物理的に微小なダイポールアンテナ又はループアンテナを二軸又は三軸に直交配置することによって等方性及び広帯域特性を持たせるとともに、高抵抗線などを用いて干渉特性等を改善したアンテナ系をいう。主に等方性広帯域電磁界強度計に用いる。
29. 「等方性」とは、電磁波の入射方向に対して、その感度が依存しないようなプローブ（又はアンテナ）の特性をいう。
30. 「応答時間」とは、電磁界強度測定系に対して測定対象量が印加された場合に、測定系の指示値が最終値の90%に達するまでの時間をいう。
31. 「実効値」とは、周期波形 1 周期の全体にわたって波形の自乗の平均をとり、その平方根をとった値をいう。周期的に変化する電磁界の電界強度、磁界強度の実効値は、ジュール熱と関連する値である。
32. 「時間平均値」とは、電界強度又は磁界強度の場合は、実効値指示を瞬時値として平均時間にわたる自乗平均平方根値をいい、電力密度の場合は、実行値指示を瞬時値として平均時間にわたる平均値をいう。
33. 「デューティサイクル」とは、周期性を有するパルスにおいては、パルス周期に対するパルス幅の割合をいい、周期性を有する間欠波においては、間欠周期に対する間欠波の発射時間の割合をいう。
34. 「電磁ファントム」とは、生体の電気定数（導電率、誘電率）と等価な物質で作られた擬似生命体をいう。

第3章 防護指針

3.1 防護指針の性格と構成

3.1.1 防護指針の基礎とする電磁界の生体作用

人体内の各組織は電磁的にはある電氣的定数を持った誘導体と考えられている。電磁界と生体の相互作用に関しては、この生体の電氣的特性の面から理論的解析が行われているほか、適切な誘電率及び導電率で構成した模擬人体などによる実験的分析手法も確立されている。これらに基づく研究成果によれば、電磁界による生体作用は、表1に示すように、熱作用、刺激作用及びその他の作用に大別できる。

表1 電磁波と生体作用の関係

作用の区分		生体の変化の要因	作用の評価量	電磁波との関係
熱作用	全身加熱	熱調節応答 深部体温加熱 熱ストレス	全身平均SAR 上昇温度 (深部体温)	マクロな相互作用(線量学的アプローチが可能)
	局所加熱	組織加熱	局所平均SAR 上昇温度 (局所組織温)	
刺激作用		電流刺激による神経、筋の興奮	誘導電流(密度)	
その他作用		不明	電磁界強度など (変調周波数)	ミクロな相互作用

この生体作用のうち、熱作用及び刺激作用については多くの研究の蓄積があり、電磁界強度との因果関係がほぼ定量的に把握されている。それらによれば、100kHzを境界領域として、刺激作用は低周波領域において、熱作用は高周波領域において支配的である。しかし、熱作用、刺激作用以外のその他の作用については、生体内の現象と関連した状態で確認されたものではなく、人の健康に支障を及ぼすという事実も示されていない。

このため、電波防護指針において対象とする電磁界の生体作用は、熱作用、刺激作用に限定した。この中には、熱作用及び刺激作用の範疇で捉えられるパルス波や変調波などによる作用が含まれている。また、電磁界から生体が直接に受ける作用でパルス波や変調波などの作用が含まれている。また、電磁界から直接受ける作用ではないが、電磁界が原因となって生ずる接触電流についても考慮した。

なお、諸外国でも同様な考え方に基づいて電波防護指針を定めているが、それらの指針の範囲内において、熱作用、刺激作用はもとよりその他の作用についても、好ましくない影響が生じたという事実は、現在まで示されていない。

3.1.2 防護指針の評価対象量の問題点

電磁界による生体に対する熱作用は、組織内でのジュール熱の発生による体温あるいは組織温の上昇である。この温度上昇は、組織の吸収エネルギー量と密接に関係し、単位質量の組織に単位時間に吸収されるエネルギー量、すなわち比吸収率（SAR）を評価量として用いる。一方、刺激作用は人体組織に誘導される電流密度と関係づけられ、比吸収率及び誘導電流はいずれも、人体組織内部の電界強度と組織の導電率に依存する現象として捉えられる。

このように、電磁界の生体作用は組織内部の電界強度等と密接な関係がある。しかし、組織内部の電界強度等は直接測定することができないため、なんらかの方法により人体内部の電磁現象を推定しなければならない。現在、この推定を行う手順は定式化されておらず、一部の研究機関等が個別の問題として推定（評価）を行っているのみである。したがって、現時点においては、人体内部の電磁現象を測定の対象量とすることは一般的ではないと言える。

電波防護指針は、我々が電波利用機器とかかわるさまざまな場面において、その安全性を迅速に評価できるようになっている必要があり、直接測定できない人体内部の電磁現象に関する量による表現では、防護指針としての現実的な役割を果たすことはできない。このため、人体内部の電磁現象を測定可能な量（電磁界強度、電流）に変換し、これによって安全性の評価を行なうことが必要となる。

3.1.3 防護指針の構成

防護指針の適用を必要とする状況は、概ね次の3つのケースに分類できる。

- ① 空間の電磁環境評価の側面
- ② 電波利用機器からの放射および機器の使い方に関する評価の側面
- ③ 電磁界に対する防護手段の評価の側面

①では、人体の存在しない空間の電磁界が評価の対象である。電波発射源が十分遠方にあり、人体の位置する空間の至近距離に金属などの電波を散乱させる物体がなければ、その位置における人体内部の電磁現象は、その空間に人体が存在しない場合に測定した電界強度及び磁界強度とほぼ一定の関係があるとみなすことができる。このような条件の下では、人体の存在しない空間における電磁界強度を用いて防護指針が設定できる。この指針を電磁界強度指針と呼ぶ。防護指針の対象となる電磁界は、通常、近傍界又は不均一であるため、電磁界強度指針をそのまま適用できる状況は限られている。このような条件を満たさない電磁環境は、空間のみを対象とした評価が適切でない場合である。この場合は、②のケースとして考える。

②では、電磁放射源と人体の相互関係が評価の対象となる。電磁放射源と人体との関係が一定であれば、電磁放射源自体に対する評価とみなすこともできる。すなわち、放射源が遠方にある場合などは①のケースの問題とみなせるが、一般的には人体内部の電磁現象に基づく評価を行う必要がある。このような人体内部の電磁現象に基づく評価のための指針を基礎指針と呼ぶ。

しかし、基礎指針には測定できない量による表現が含まれているため、②の問題す

べてに対して基礎指針による評価を行うとなると、防護指針としての現実的な活用が期待できない。そこで、②の問題に現実的に対処するため、測定可能な評価量による指針を設ける必要がある。この指針を補助指針と呼ぶ。補助指針は、基礎指針に基づき電磁界強度指針を補う形で示され、次の4項目から構成する。

- (1) 不均一又は局所的な電磁界にさらされる場合
- (2) 接触電流
- (3) 誘導電流
- (4) 低電力放射源

なお、補助指針は基礎指針に代わる人体内部の電磁現象の簡易評価方法としての性格を有するものであって、②のケースは、本来、基礎指針で扱うべき問題であることを念頭に置く必要がある。

③では、人体内部の電磁現象を直接評価しなくては判断できない問題が含まれる。この場合には、基礎指針による評価を行う必要であり、研究機関等で慎重に推定・評価を行なう必要がある。

以上のように、防護指針は電磁界強度指針、補助指針及び基礎指針から構成する。このうち、電磁界強度指針及び補助指針は、実際の問題へ具体的に適用するための指針である。この二つの指針を管理指針と呼ぶ。基礎指針は、管理指針の根拠であるとともに、管理指針で扱えない特別の場合において、安全性を判断する際の根拠を与える性格を有する。

防護指針は、現時点の研究成果と電波利用状況の実情を基礎に定められたものである。したがって、これらの状況の変化に応じて補足又は改訂する必要がある。電磁界の生体作用に関する研究の進展は主に基礎指針に反映され、生体内の電磁現象に関する測定法・推定法に関する研究の進展及び電波の利用状況の変化に伴う実社会との整合性については、管理指針に反映される。このような位置づけを考慮すると、基礎指針は容易に改訂される性格のものではないが、管理指針は状況によって適宜変更されるものである。

3.1.4 管理指針の2段階構成

防護指針による評価が信頼できるものであるためには、防護指針が適切に用いられ、また、電磁環境の状況に変化がないかどうかを必要に応じ確認できる必要がある。このような状況を確保できる場合は、基礎指針から換算される数値に基づく管理指針（電磁界強度指針及び補助指針）を適用する。しかし、電波利用の状況が正しく認識されていないような場合には、基礎指針を満たさない状況が無意識のうちに生じてしまうおそれがあり、また、電磁界の存在を意識した行動も期待できない。したがって、このような状況下でも十分な安全性を確保するため、諸外国の防護指針などにおいても合理的な対応策として取り入れられている方法と同様に、付加的な安全率を考慮した適切な指針を設ける必要がある。

以上のような観点から、管理指針を防護指針の主旨が生かされ電磁環境が管理されている状況を対象とする条件Pと、防護指針及び電波利用の状況が認識されていない

状況を対象とする条件Gに区分する。条件Gは条件Pに比べ電磁界の管理の不十分さに伴う不確定性を考慮し、条件Pより電力密度に換算しておおむね5倍の付加的安全率を設けている。

3.1.5 防護指針の適用手順

管理指針（電磁界強度指針及び補助指針）及び基礎指針で構成される防護指針の適用の手順は次のとおりとする。

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

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

このような手順による評価の結果、条件Gの管理指針が満たさない場合には、条件Pに該当するような管理を行うか、若しくは、指針を満たすよう対策を講ずる。条件Pの管理指針が満たされていないことが示された場合は、基礎指針を満たさないおそれがあり、これを満たすよう対策を行うか、あるいは人体への障害の可能性をより直接的に判断するために基礎指針に立ち戻った評価を行なう必要がある。

基礎指針による評価には、規定される量に具体的な測定法・推定法が十分に確立されていない量が含まれている。このため、本指針では実際の評価法について例示するにとどめる。この場合の評価は、研究機関等で適切と認められている方法に従って行う。

3.2 管理指針

管理指針は、基礎指針に基づいて定められたもので、実際の電磁環境の評価は主に管理指針を用いて行う。この指針は、電磁界強度指針及び補助指針から成り、第4章及び第5章で示す測定法及び電磁界強度の推定法に基づいて適用する。

3.2.1 電磁界強度指針値

(1) 条件P

条件Pに該当する場合の電磁界強度指針値を表(2)a及び(2)bに示す。

測定対象空間が局所的にこの表の値を満足しない場合には、3.2.2(1)の補助指針を適用する。

表2(a)及び2(b)の指針値をグラフ化したものを図1及び図2に示す。

表2(a) 条件Pの電磁界強度（6分間平均値）の指針値

周波数 f	電界強度の実効値 E[V/m]	磁界強度の実効値 H[A/m]	電力密度 S[mW/cm ²]
10kHz - 30kHz	614	163	
30kHz - 3MHz	614	$4.9f(\text{MHz})^{-1}$ (163-1.63)	
3MHz - 30MHz	$1,842f(\text{MHz})^{-1}$ (614-61.4)	$4.9f(\text{MHz})^{-1}$ (1.63-0.163)	
30MHz - 300MHz	61.4	0.163	1
300MHz - 1.5GHz	$3.54f(\text{MHz})^{1/2}$ (61.4-137)	$f(\text{MHz})^{1/2}/106$ (0.163-0.365)	$f(\text{MHz})/300$ (1-5)
1.5GHz - 300GHz	137	0.365	5

表2(b) 条件Pの低周波領域における電磁界強度（平均時間<1秒）の指針値

周波数 f	電界強度の実効値 E(V/m)	磁界強度の実効値 H(A/m)
10kHz - 100kHz	2,000	163

注1：接触ハザードが防止されていない場合の電界強度の実効値は、15MHz以下の周波数では137V/m以下(平均時間<1秒)でなければならない。ただし、これを満たさない場合であって、表2(a)及び表2(b)の指針値を下回る時は、3.2.2(2)を適用することができる。

注2：人体の非接地条件を満たさない場合の電磁界強度の実効値(平均時間6分間)は、3MHzから30MHzまでの周波数では $3,200f(\text{MHz})^{-3/2}\text{V/m}$ (すなわち614V/m~20V/m)、30MHzから100MHzまでの周波数では20V/m、100MHzから300MHzまでの周波数では $0.2f(\text{MHz})\text{V/m}$ (すなわち20V/m~61.4V/m)以下でなければならない。ただし、これを満たさない場合であって、表2(a)の指針値を下回る時は、3.2.2(3)を適用することができる。

注3：表2(a)に示した平均時間内において、電界強度又は磁界強度が変化する場合は平均時間内で実効値の自乗平均平方根した値を用い、電力密度が変化する場合に平均時間内での平均値を用いる。

注4：電磁界が指針値に対して無視できないレベルの複数の周波数成分からなる場合は、電界強度及び磁界強度に関しては各周波数成分の指針値に対する割合の自乗和を求め、電力密度に関しては各周波数成分の指針値に対する割合の和を求める。これらの総和が1を超えてはならない。

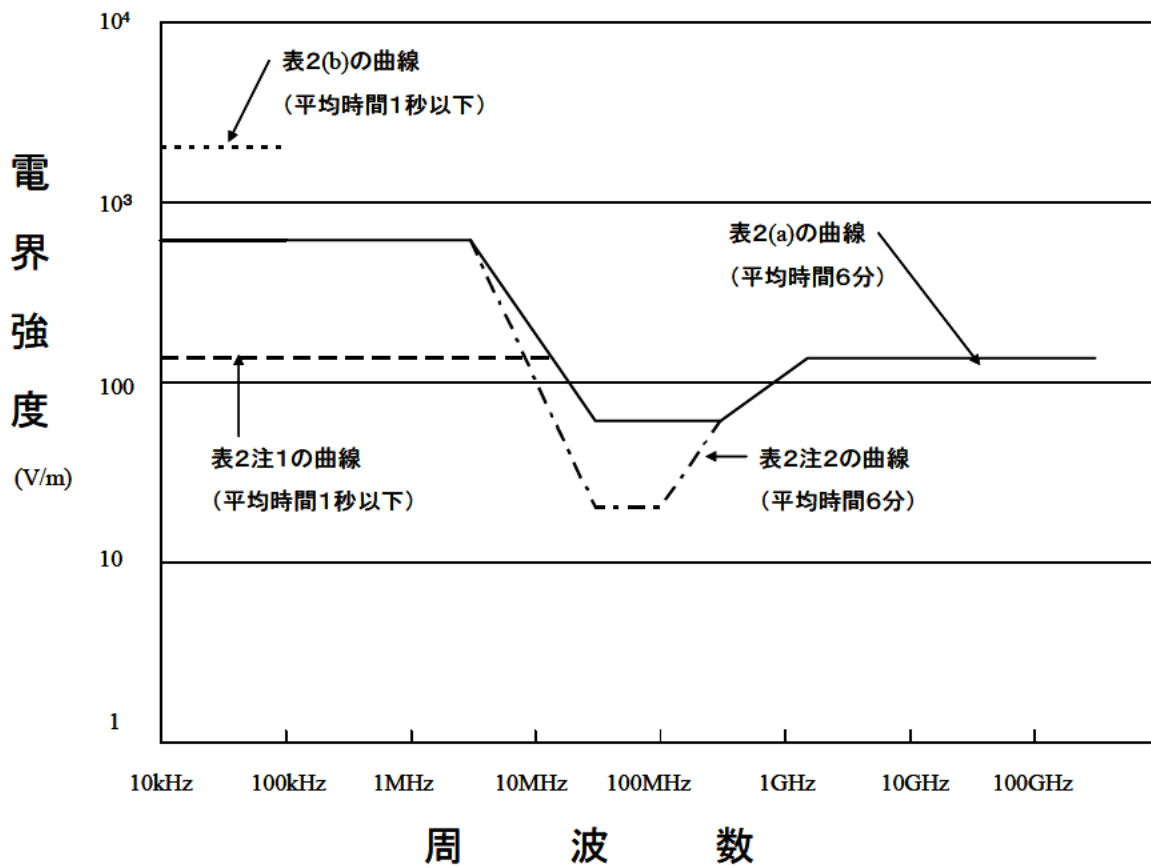


図1 電界強度指針値 (条件P)

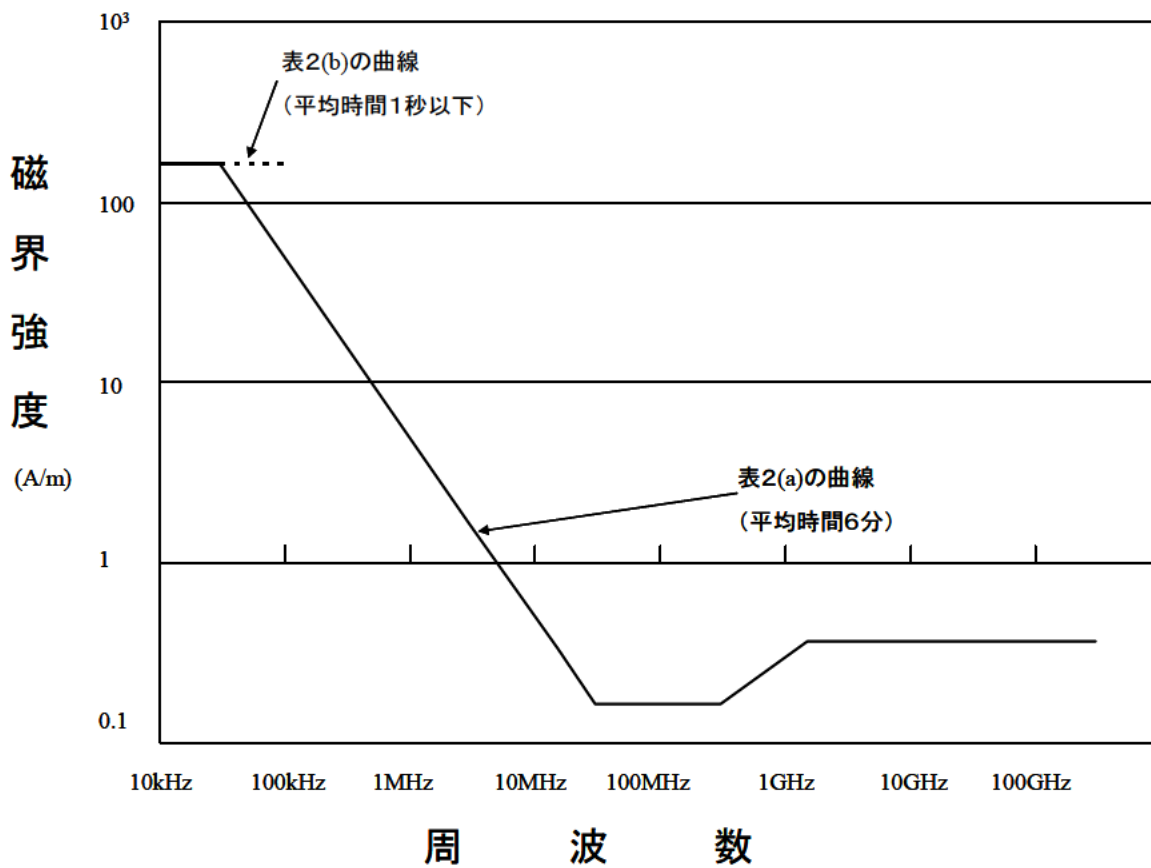


図2 磁界強度指針値 (条件P)

(2) 条件 G

条件 G に該当する場合の電磁界強度指針値を表 3(a) 及び表 3(b) に示す。

測定対象空間が局所的にこの表の値を満足しない場合には、3.2.2(1)の補助指針を適用する。

表 3(a) 及び 3(b) の指針値をグラフ化したものを図 3 及び図 4 に示す。

表 3(a) 条件 G の電磁界強度（6 分間平均値）の指針値

周波数 f	電界強度の実効値 E[V/m]	磁界強度の実効値 H[A/m]	電力密度 S[mW/cm ²]
10kHz - 30kHz	275	72.8	
30kHz - 3MHz	275	$2.18f(\text{MHz})^{-1}$ (72.8-0.728)	
3MHz - 30MHz	$824f(\text{MHz})^{-1}$ (275-27.5)	$2.18f(\text{MHz})^{-1}$ (0.728-0.0728)	
30MHz - 300MHz	27.5	0.0728	0.2
300MHz - 1.5GHz	$1.585f(\text{MHz})^{1/2}$ (27.5-61.4)	$f(\text{MHz})^{1/2}/237.8$ (0.0728-0.163)	$f(\text{MHz})/1500$ (0.2-1)
1.5GHz - 300GHz	61.4	0.163	1

表 3(b) 条件 G の低周波領域における電磁界強度（平均時間 < 1 秒）の指針値

周波数 f	電界強度の実効値 E (V/m)	磁界強度の実効値 H (A/m)
10kHz - 100kHz	894	72.8

注 1 : 接触ハザードが防止されていない場合の電界強度の実効値は、15MHz 以下周波数では 61.4V/m 以下（平均時間 < 1 秒）でなければならない。ただし、これを満たさない場合であって、表 3(a) 及び表 3(b) の指針値を下回る時は、3.2.2(2) を適用することができる。

注 2 : 人体の非接地条件を満たさない場合の電界強度の実効値（平均時間 6 分間）は、3MHz から 30MHz までの周波数では $1,430f(\text{MHz})^{-3/2}\text{V/m}$ （すなわち 275V/m ~ 9V/m）、30MHz から 100MHz までの周波数では 9V/m、100MHz から 300MHz までの周波数では $0.09f(\text{MHz})\text{V/m}$ （すなわち 9V/m ~ 27V/m）以下でなければならない。ただし、これを満たさない場合であって、表 3(a) の指針値を下回る時は、3.2.2(3) を適用することができる。

注 3 : 表 3(a) に示した平均時間内において、電界強度及び磁界強度が変化する場合は平均時間内で実効値の自乗平均平方根した値を用い、電力密度が変化する場合に平均時間内での平均値を用いる。

注 4 : 電磁界が指針値に対して無視できないレベルの複数の周波数成分からなる場合は、電界強度及び磁界強度に関しては各周波数成分の指針値に対する割合の自乗和を求め、電力密度に関しては各周波数成分の指針値に対する割合の和を求める。これらの総和が 1 を超えてはならない。

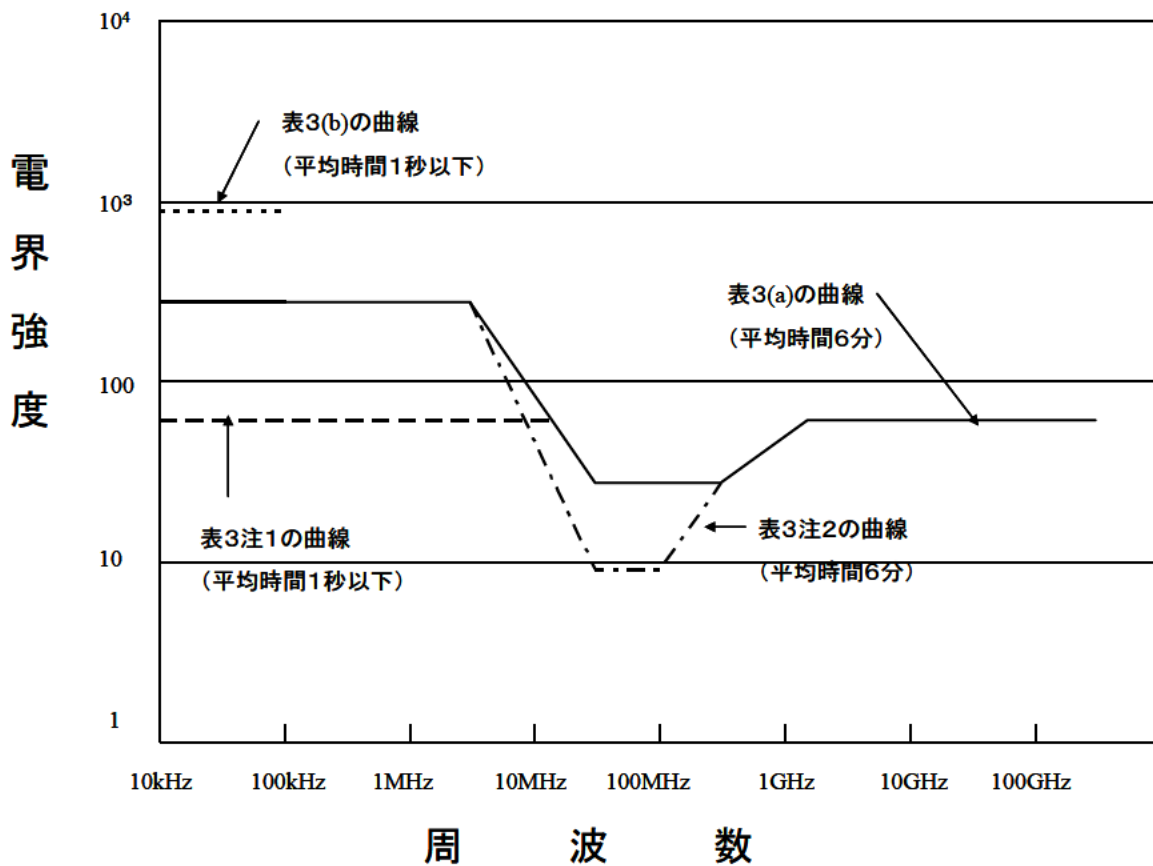


図3 電界強度指針値 (条件G)

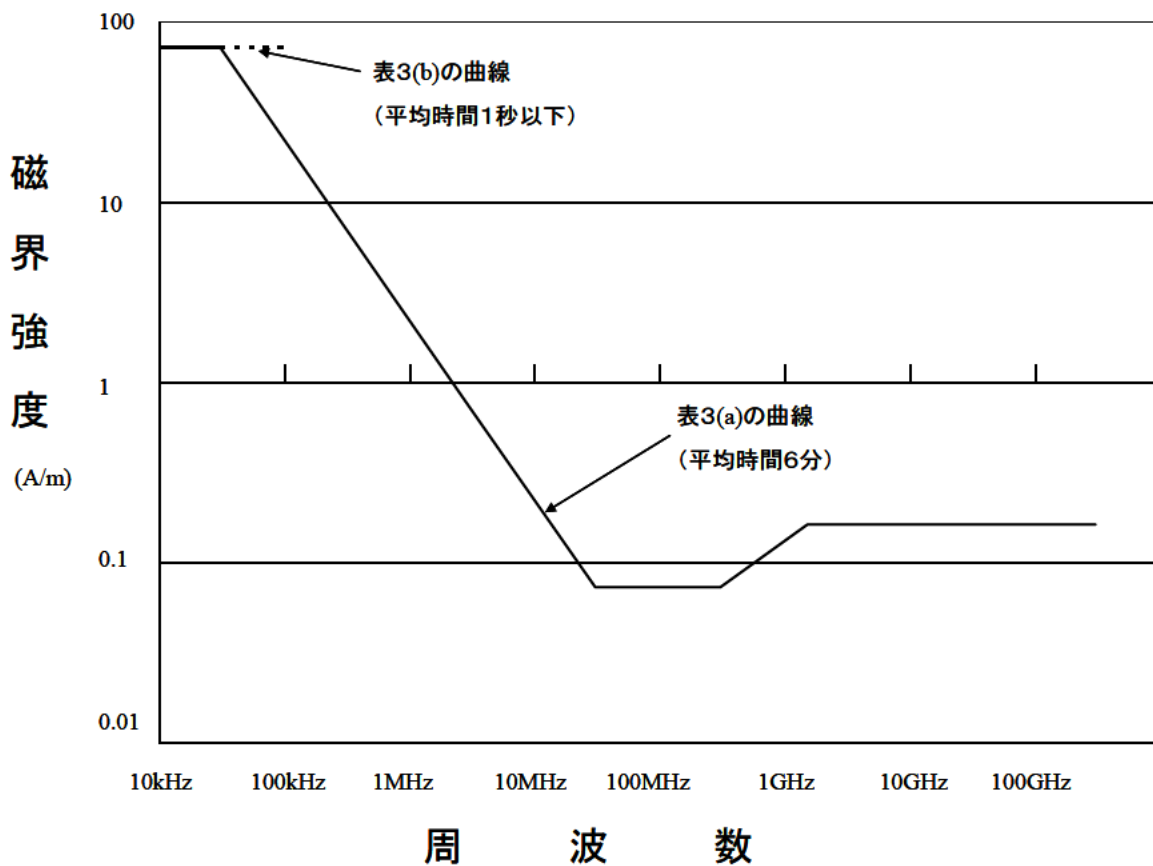


図4 磁界強度指針値 (条件G)

3.2.2 補助指針

電磁界強度指針だけでは防護指針を満たしていることを示すことができない場合に、人体が電磁波にさらされる状況、考慮すべき生体作用等に着目してより厳密に評価するための指針である。

(1) 人体が電磁界に不均一又は局所的にさらされる場合の指針

周波数に応じて該当する条件が全て満たされている場合は、管理指針を満足しているものとみなす。

対象とする周波数が以下の区分にまたがって存在する場合は、①、②(a)及び(b)並びに③(a)及び(b)については各周波数成分の指針値に対する割合の自乗和を求める。これらの総和が1を超えてはならない。

なお、人体から20cm以内(300MHz以上の周波数では10cm以内)の空間で使用する機器等については、その状況ごとに個別の判断が必要である。基礎指針を超えるおそれがある場合には、基礎指針に基づく評価を行なうことが望ましい。

① 周波数が300MHz未満の場合

電磁放射源及び金属物体から20cm以上離れた空間において、人体の占める空間に相当する全領域の電力密度分布の空間的な平均値(電界強度又は磁界強度の場合は自乗平均値の平方根である。)が、対応する条件(条件Pあるいは条件G)の電磁界強度指針(3.2.1項)以下であること。

なお、表2あるいは表3の注1～注4は、本項でも適用する。

② 周波数が300MHzから1GHz未満の場合

(a) 電磁放射源及び金属物体から10cm以上離れた空間において、人体の占める空間に相当する全領域の電力密度分布の空間的な平均値(電界強度又は磁界強度の場合は自乗平均値の平方根である。)が、対応する条件(条件Pあるいは条件G)の電磁界強度指針(3.2.1項)以下であること。

なお、表2あるいは表3の注1～注4は、本項でも適用する。

(b) 四肢を除く人体の占める領域内における電力密度の空間的な最大値が $20\text{mW}/\text{cm}^2$ 以下(6分間平均値)であること。ただし、電磁放射源及び金属物体から10cm以上離れた空間のみを対象とする。

なお、表2あるいは表3の注3及び注4は、本項でも適用する。

③ 周波数が1GHzから3GHz未満の場合

(a) 電磁放射源及び金属物体から10cm以上離れた空間において、人体の占める空間に相当する全領域の電力密度分布の空間的な平均値(電界強度又は磁界強度の場合は自乗平均値の平方根である。)が、対応する条件(条件Pあるいは条件G)の電磁界強度指針(3.2.1項)以下であること。

なお、表2あるいは表3の注1～注4は、本項でも適用する。

(b) 四肢を除く人体の占める領域内における電力密度の空間的な最大値が $20\text{mW}/\text{cm}^2$ 以下(6分間平均値)であること。ただし、電磁放射源及び金属物体から10cm以上離れた空間のみを対象とする。

なお、表2あるいは表3の注3及び注4は、本項でも適用する。

- (c) 頭部に入射する電力密度の空間的な最大値が $10\text{mW}/\text{cm}^2$ 以下(6分間平均値)であること。ただし、電磁放射源及び金属物体から 10cm 以上離れた空間のみを対象とする。

なお、表2あるいは表3の注3及び注4は、本項でも適用する。

④ 周波数が 3GHz 以上の場合

- (a) 電磁放射源及び金属物体から 10cm 以上離れた空間において、人体の占める空間に相当する全領域の電力密度分布の空間的な平均値(電界強度又は磁界強度の場合は自乗平均値の平方根である。)が、対応する条件(条件Pあるいは条件G)の電磁界強度指針(3.2.1項)以下であること。

なお、表2あるいは表3の注1～注4は、本項でも適用する。

- (b) 電磁放射源及び金属物体から 10cm 以上離れた空間での体表に入射する電力密度の空間的な最大値が、条件Pの場合は $50\text{mW}/\text{cm}^2$ 以下、条件Gの場合は $10\text{mW}/\text{cm}^2$ 以下(いずれも6分間平均値)であること。

なお、表2あるいは表3の注3及び注4は、本項でも適用する。

- (c) 電磁放射源及び金属物体から 10cm 以上離れた空間での眼に入射する電力密度が、 $10\text{mW}/\text{cm}^2$ 以下(いずれも6分間平均値)であること。

なお、表2あるいは表3の注3及び注4は、本項でも適用する。

以上各条件を表4に示す

表4 不均一または局所的にさらされる場合の補助指針

	10kHz-300MHz	300MHz-1GHz	1GHz-3GHz	3GHz-300GHz
電磁界強度の空間的平均値	条件P：表2の電磁界強度指針値以下（注1から注4も適用） 条件G：表3の電磁界強度指針値以下（注1から注4も適用）			
電磁界強度の空間的最大値			体表： 条件P： $50\text{mW}/\text{cm}^2$ 条件G： $10\text{mW}/\text{cm}^2$	
			四肢以外： $20\text{mW}/\text{cm}^2$	頭部： $10\text{mW}/\text{cm}^2$ 眼： $10\text{mW}/\text{cm}^2$
適用する空間	電磁放射源、金属物体から 20cm 以上離れた人体の占める空間	電磁放射源、金属物体から 10cm 以上離れた人体の占める空間		

(2) 接触電流に関する指針

- (a) 条件Pで接触ハザードが防止されていない場合

10kHz から 100kHz までの周波数において測定された接触電流(平均時間 < 1 秒)が $10^{-3}f(\text{Hz})\text{mA}$ 以下、 100kHz から 15MHz までの周波数においては 100mA 以下であれば、表2の注1を満たさなくてもよい。

ただし、接触電流がこの指針に対して無視できないレベルの複数の周波数成分からなる場合は、その各周波数成分の指針値に対する割合の自乗和を求める。これら

の総和が1を超えてはならない。

(b) 条件Gで接触ハザードが防止されていない場合

10kHzから100kHzまでの周波数において測定された接触電流(平均時間<1秒)が $4.5 \times 10^{-4}f(\text{Hz})\text{mA}$ 以下、100kHzから15MHzまでの周波数においては45mA以下であれば、表3の注1を満たさなくてもよい。

ただし、接触電流がこの指針に対して無視できないレベルの複数の周波数成分からなる場合は、その各周波数成分の指針値に対する割合の自乗和を求める。これらの総和が1を超えてはならない。

(3) 誘導電流に関する指針

(a) 条件Pで非接地条件を満たさない場合

3MHzから300MHzまでの周波数で測定された足首における誘導電流(平均時間6分間)が、片足当たりで100mA以下ならば、表2の注2を満たさなくてもよい。

ただし、誘導電流がこの指針に対して無視できないレベルの複数の周波数成分からなる場合は、その各周波数成分の指針値に対する割合の自乗和を求める。これらの総和が1を超えてはならない。

(b) 条件Gで非接地条件を満たさない場合

3MHzから300MHzまでの周波数で測定された足首における誘導電流(平均時間6分間)が、片足当たりで45mA以下ならば、表3の注2を満たさなくてもよい。

ただし、誘導電流がこの指針に対して無視できないレベルの複数の周波数成分からなる場合は、その各周波数成分の指針値に対する割合の自乗和を求める。これらの総和が1を超えてはならない。

(4) 低電力の電磁放射源に関する指針

100kHzから3GHzまでの周波数において定格出力7W以下の電磁放射源に関しては、通常の使用状態では基礎指針を満たすものと考えられ、管理指針及び他の補助指針での評価を要しない。ただし、放射源が身体に極めて近い場合及び放射エネルギーが特定方向に集中する場合は、局所的に大きなSARを生じることがあるので注意することが望ましい。

3.3 基礎指針

基礎指針を表5に示す。基礎指針は管理指針の根拠となる概念であるとともに、生体作用発生の可能性を判断するための基礎を与えるものである。

表5 基礎指針

- | |
|---|
| <ol style="list-style-type: none">1 全身平均SARの任意の6分間平均値が、0.4W/kg以下であること。2 10kHzから100kHzまでの周波数では、組織内の誘導電流密度が$0.35 \times 10^{-4}f[\text{Hz}]\text{mA}/\text{cm}^2$以下であること。3 10kHzから100kHzまでの周波数では、接触電流などが体外からの流入電流が$10^{-3}f[\text{Hz}]\text{mA}$以下（平均時間<1秒間）であること。また、100kHzから100MHzまでの周波数では、100mA以下(平均時間6分間)であること。4 上記の(1)(2)及び(3)に加え、次の点に関して注意事項として考慮すること。<ol style="list-style-type: none">(a) 全身平均SARの任意の6分間平均値が0.4W/kg以下であっても、任意の組織1g当りのSAR（6分間平均値）が8W/kg（体表と四肢では25W/kg）を超えないことが望ましい。(b) 3GHz以上の周波数においては、眼への入射電力密度(6分間平均)が$10\text{mW}/\text{cm}^2$以下とすること。 |
|---|

3.4 注意事項

(1) 医療目的の場合

電磁波を医療目的で用いる場合、医療従事者が電磁界にさらされる状況は本指針の適用の対象となるが、患者に関しては医療効果を考慮して判断すべき問題であり、医師が本指針で示された安全性の限界を十分に認識した上で用いる場合に限り適用の対象とはしない。しかし、例えば膝の関節の治療に有効な電波も眼には有害となる可能性があることから、必要以上に広範囲に電磁波を照射することを避けるとともに、漏洩電磁界には十分注意する必要がある。

(2) ペースメーカー装着者

ペースメーカー装着者が電波利用をする場合は、担当医師の指示に従うべきであり、この指針ではペースメーカー装着者を対象とはしない。

(3) 体内に金属を埋め込んでいる人

体内に金属を埋め込んでいる場合は、指針値以下の電磁界でも予想外の局所的な発熱などを引き起こす可能性があり、注意が必要である。

(4) 体に金属を身につけている人

金属を身につけている場合は、特に誘導加熱炉などの近くでは、指針値以下の電磁界でも金属が発熱する可能性があり、注意が必要である。

第4章 測定法

4.1 測定法の性格と構成

本測定法では、電波防護指針の対象となる空間（場所）が、防護指針で示された管理指針（電磁界強度指針及び補助指針）及び基礎指針に照らして、安全側か否かの判断を行う際に必要な測定に関する技術的事項等を示している。電磁界強度指針及び補助指針(1)（不均一ばく露及び局所ばく露に関するもの）に関しては、対象とする空間における電磁界強度（電界強度、磁界強度及び電力密度）が評価の対象となり、補助指針(2)、(3)（接触電流及び誘導電流に関するもの）及び基礎指針に関しては、人体内部の電磁的現象等（接触電流、誘導電流及びSAR）が評価の対象になる。このため、前者と後者とでは本測定法における扱い方が大きく異なっている。

電波防護を目的とした電磁界強度の測定においては、対象空間に人体などが存在しないことが測定条件となり、電波伝搬などの諸特性に注意を払うことが重要な要件となる。また、対象となる電磁界のほとんどが自由空間インピーダンスが $120\pi[\Omega]$ とはならない近傍界領域であること、測定の対象量には任意点の電磁界強度だけでなく、対象空間における電磁界強度の分布状態も含まれることから、遠方界領域を想定した一般の測定方法と大きく異なる。

一方、人体内部の電磁的現象等に関する測定では、この現象を模擬的に再現する人体と等価な測定回路又は電磁ファントムを用いる必要がある。このため、特殊な設備及び現時点においては標準的な測定法が確立されるまでには至っていない。

このため、ここでは管理指針及び基礎指針の中で規定されている電磁界強度については、通常入手し得る一般的な測定機器を用いて行う標準的な方法を示し、人体内部の電磁現象（接触電流、誘導電流及びSAR）については、参照すべき代表的な事例として挙げるにとどめた。

なお、ここで示した測定法は、防護指針の見直し及び測定機器の進歩に対応して、漸次、追加又は改訂する必要がある。

4.2 電磁界強度測定の限界

電磁界強度の測定においては、主に測定機器に起因する測定上の限界があることに十分留意し、適切な測定機器の選定を行う必要がある。

(1) 測定対象量と測定できる周波数範囲

電波防護指針においては、10kHzから300GHzまでの電界強度及び磁界強度並びに30MHzから300GHzまでの電力密度を評価の対象としている。これらの対象量はそれぞれに独立に測定して評価する必要があるが、これらすべての周波数に対応できる測定機器は存在しない。現在、通常入手し得る一般的な測定機器における対象量とそれに対応する測定可能な周波数範囲は、電界強度の測定においては10kHzから40GHz、磁界強度の測定では10kHzから300MHzである。また、電力密度については、遠方界領域に限り300MHzから300GHzまでの周波数範囲で測定ができる。電磁界プローブを用いる測定器は直接電力密度を測定するものではなく、その多くは電界強度（又は磁

界強度)を電力密度に換算して表示するものである。

(2) 測定に関する限界と問題点

防護指針において対象としている電磁界強度は、対象空間(場所)における単一入射の直交三軸成分の自乗和の平方根(電力密度については、直交三軸成分の和)である合成界強度により評価される。また、入射波が複数存在する場合には各単一波の合成界強度の自乗平方根(電力密度については、各単一波のごとの合成界強度の和)で評価される。このような意味からは、対象空間における全周波数帯の電磁界強度を同時に全偏波面に関して実時間で測定することが理想である。実際の測定では、空中線系の大きさ、機器の応答特性、電磁波源の特性及び測定環境のほか、測定時における時間的・空間的な制約もあるため、測定結果には必然的にさまざまな誤差が含まれる。したがって、実際の測定に当たっては、対象波源に関する情報及び対象空間の状況を最大限に把握し、防護指針の考え方に従った適切な評価が行えるよう最適な測定系を選定すること及び合理的な測定法の適用手順を採用することが重要である。

(3) その他の問題点

防護指針の対象となる電磁波源に極めて近い領域では、電磁界強度が高くなる。通常、通信分野で使用している電磁界強度測定器は、このような状況を念頭に設計されていないため、ケーブル及び測定機器本体は十分な遮蔽効果が期待できない場合が多い。この結果、アンテナ以外の部分が電磁界に反応し、これに起因する大きな測定誤差が生じる場合があるほか、測定回路に障害が生じ機器が正常に動作しない状況も想定される。

このため、波源に極めて近い領域における測定では、電波防護の目的で設計された測定機器を使用する必要がある。

4.3 電磁界強度測定における基本的条件

電磁界強度の測定における基本的な条件は、次のとおりである。

(1) 測定対象空間

電界強度及び磁界強度(あるいは電力密度)の測定は、人のいない状態で人の存在する可能性のある全空間を対象とすることを原則とする。一般的に、測定の対象となる電磁界が条件Pに該当する場合には、測定の対象となる空間は比較的狭い範囲に限定されると考えられるが、条件Gに該当する場合は対象空間が非常に広い範囲に及んだり、人の行動や周囲の条件などに不確定な要素があることから、測定の対象とする空間領域を明確にできない場合があると考えられる。このときには、代表的な測定点を選定する必要がある。

また、電磁界強度指針の実際の適用の対象とする空間には、通常、金属等の多くの反射物体が存在するために、電磁界は不均一となる場合が多い。このため、対象となる空間のすべての電磁界強度分布を詳細に把握することは困難であるが、測定の対象となる空間内に便宜的に人体の占める空間を考慮した単位空間を設定して測定するこ

とが考えられる。また、補助指針の適用においてはこの単位空間の導入によって、人体に占める空間全体の電磁界強度分布の平均値（空間平均値）や眼、頭部及び胴体、表面における局所的な電磁界強度の測定には有効な方法となる場合もある。

(2) 測定原理

電界強度又は磁界強度は、電界又は磁界に対してのみ感度を有するアンテナ（例えば微小ダイポール又は微小ループ）を、アンテナ系を含め校正された測定器に接続して測定する。また、遠方界における電力密度は、電界強度と磁界強度の両方に感度を有するアンテナ（例えば電磁ホーン）をアンテナ系を含め電力校正された測定器に接続して測定する。

これらの電磁界強度はそれぞれ独立に測定することが原則であるが、測定位置が遠方界領域内にあり、かつ、電磁界の分布が均一とみなせる場合には、電界強度 $E[V/m]$ と磁界強度 $H[A/m]$ との間には、 $H=E/120\pi$ の関係式が成り立つことから、いずれか一方の測定を省略できる。

また、遠方界の場合には、電力密度、電界強度、磁界強度との間には、 $P=E^2/120\pi=120\pi H^2$ の関係式が成り立つことから4.2(1)に示す周波数範囲における電力密度、電界強度、磁界強度のいずれかを測定することにより、現在の測定器では直接測定が困難な40GHz以上の電界強度、300MHz以上の磁界強度及び30MHzから300MHzまでの電力密度を相互に算出できる。

(3) 測定距離

測定用アンテナを電磁波源や金属物体又は高誘電率物体に近づけると、両者間の容量結合やアンテナのインピーダンス変化が生じるほか、アンテナが大きい場合には電磁界の乱れや勾配の平均化などが付加されるため、測定誤差が無視できなくなる。これを考慮して、測定用アンテナと電磁波源、大地及び金属物体などとの最小測定距離は原則として、300MHz未満の周波数では20cm以上、300MHz以上の周波数では10cm以上とする。しかし、この最小測定距離はアンテナの大きさ（素子長、ループ径、開口径など）や反射物体の大きさ波長に対する比及び反射物体等の電気定数等に依存するため、測定条件によってはこれら距離以内の領域での測定が可能な場合もある。

4.4 電磁界強度の測定

防護指針に関する測定には一般的な測定器を用いるが、それを機能的に分類すると広帯域測定系及び狭帯域測定系に大別され、両測定系とも、基本的にはアンテナ部（給電部を含む）、測定器部及びデータ記録処理装置部から構成される。防護指針においては、生体組織における寝る作用の評価基準に平均時間6分間における電磁界強度の自乗平均平方根値を適用していることから、いずれの測定系においても時間領域での測定を原則とする。測定系の特徴及び測定系の選定の方法は、次のとおりである。

(1) 広帯域測定系におけるアンテナは、電界に対してはダイポール、磁界に対してはループを用いる。周波数に対して均一な感度にするために、それらの大きさは測定上限周波数の波長に比べ十分小さくしている。また、通常、等方性を得るために三つのアン

テナをお互いに直交させて、それらの出力を単独に又は合成して取り出すプローブを用いる。このため、この方式のアンテナは、電磁界の分布が複雑な近傍界領域での使用に適している。広帯域測定系の代表的な測定器として、電波防護を目的に設計された広帯域等方性電磁界強度計がある。また、測定器部をダイオード検波器とオシロスコープのような波形観測装置で構成する方式もある。

(2) 狭帯域測定系は、対象とする周波数ごとに同調する方式である。この測定系は、通常、測定周波数範囲は極めて広く（例えば、10kHz～18GHz）、また受信感度が高く、応答時間が極めて短い。この測定系は、測定対象波がパルス波であるとき、複数波存在する場合に適しているが、パルス波の測定のように対象波の占有する帯域幅が測定器部の通過帯域幅（例えば、3kHz～3MHz）より大きい場合は周波数領域で測定する方法が有効である。アンテナ部には、例えばバイコニカルアンテナのような広帯域特性を有するアンテナが使用されるが、その大きさが波長に対して十分小さくないため、遠方領域での測定にしか適さない。近傍領域での測定には、三軸直交微小ダイポール又は微小ループアンテナが適しているが、一般に入手しにくく特注品となる場合が多い。

(3) 電磁環境の評価に当たっては、広帯域等方性電磁界強度計を用いることを優先させ、この測定機では十分な測定が行い得ない場合には他の測定方法を選定する。

測定系の選定に当たっては、測定系が具備すべき性能、測定可能周波数、電磁界強度範囲等を十分考慮する必要がある。測定系の例及びその特徴をそれぞれ図5及び表6に示す。

4.5 測定値の処理及び評価

電波防護指針においては、指針値は対象とする空間の電磁波の状況に応じて時間平均、瞬時値の最大値等で示されている。したがって、測定して電磁界強度の瞬時値をそのまま評価するのではなく、指針値と比較できるように測定値の処理を行う必要がある。以下に、基本的な測定値の処理と評価の方法について述べる。

4.5.1 処理式と評価

(1) 平均時間における時間平均値

① 時間平均値

電力密度が変化する場合には平均時間における平均値を用い、また、電界強度（又は磁界強度）が変化する場合には、平均時間内で電界強度（又は磁界強度）の実効値を自乗平方根した値（時間平均値）を適用する。

電力密度及び電界強度（又は磁界強度）の平均時間における時間平均値を求める一般式は、次式で示される。

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt$$

$$\bar{E} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T E^2(t) dt}$$

ここで、

T : 測定時間 (6 分間)

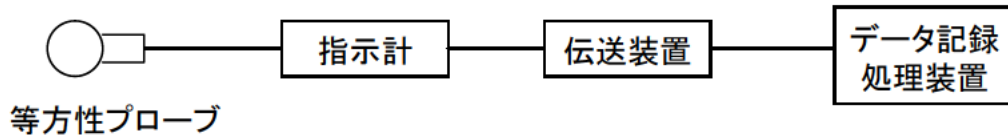
\bar{P} : T における電力密度の時間平均値

\bar{E} : T における電界強度 (又は磁界強度) の時間平均値

$p(t)$: 電力密度 (実効値) の瞬時値

$E(t)$: 電界強度 (又は磁界強度) (実効値) の瞬時値

したがって、電力密度、電界強度又は磁界強度の瞬時値が指針値を超える場合であっても、それぞれの平均値における時間平均値が指針値を超えない場合は、指針値を満たすものと評価される。



(A) 広帯域等方性電界（磁界、電力密度）強度計

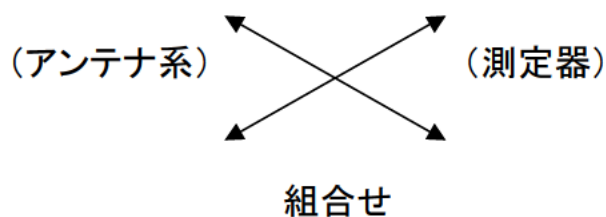
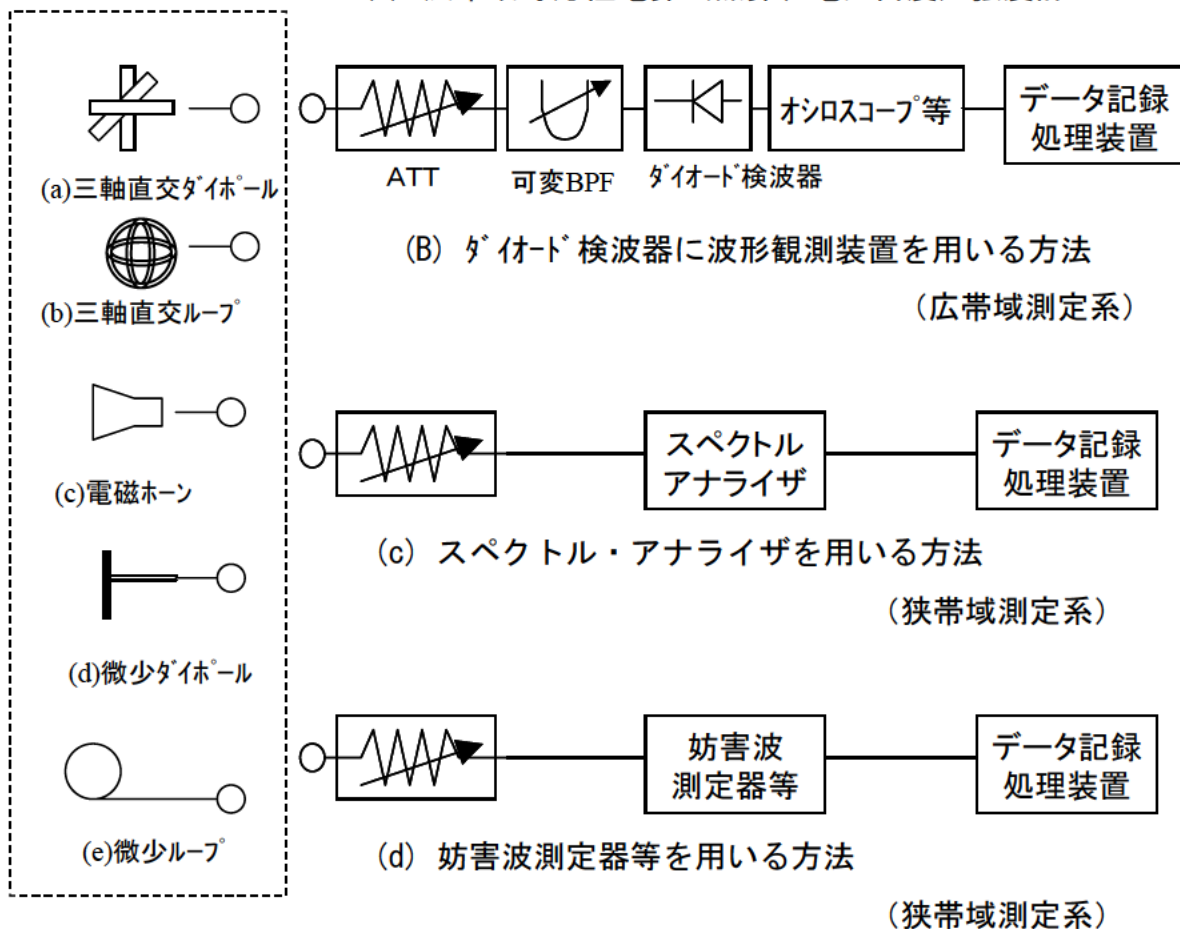


図5 電界強度・磁界強度・電力密度の測定系の例

表6 測定系とその特徴

種別	測定系		特徴									
	アンテナ系	測定器	測定周波数 範囲	空間分 解能	応答 特性	検波方 式	通過 帯域	ダイミッ クレンジ	精度	迅速 性	周波数 分離性	ハルス測 定可能
1	(本体一体型) ①三軸出力合成 方式 ②三軸出力分離 方式	広帯域等方性 電磁界強度計	◎	◎	△	2乗	◎	△	△	◎	×	×
2	(外部組合せ型) ③三軸ダイミッ クレンジ (10kHz~1GHz)	ダイミッ クレンジ 検波器	○	△ ⑦使用 の場合 は○	◎	包絡線	◎	△	△	○	△	◎
3	④三軸ルーフ (10kHz ~ 30MHz) ⑤電磁ホーン	スペクトル アナライザ	◎	△ ⑦使用 の場合 は○	◎	包絡線	○	◎	◎	○	◎	○
4	(1GHz~) ⑥一軸微小 ダイミッ クレンジ (10kHz~1GHz) ⑦一軸ルーフ (10kHz ~ 10MHz)	妨害波測定器 等	△	△ ⑦使用 の場合 は○	○	準尖頭 値平均 値	△	○	○	△	◎	△

注 ◎：優れている、○：良、△：やや劣る、×：不可

② 時間平均値

人体が占める空間の相当する領域における電磁界強度分布の空間的な平均値は、次式で求められる。

$$\overline{P}_i = \sum_{i=1}^N \frac{P_i}{L_i}$$

$$\overline{E}_i = \sum_{i=1}^N \left(\frac{E_i}{M_i} \right)^2$$

ここで、

N : 測定値数

$\overline{P}(r)$: 電力密度の空間平均値

$\overline{E}(r)$: 電界強度（又は磁界強度）の空間平均値

$P_i(r)$: 空間内の r 点における電力密度の時間平均値

$E_i(r)$: 空間内の r 点における電界強度（又は磁界強度）の時間平均値

したがって、人体が占める空間の相当する領域において、時間平均された電磁界強度が指針値を超える点があっても、その空間内における平均値が指針値を超えない場合は、指針値を満たすと評価される。

(3) 複数波の評価

入射波が指針値に対して無視できないレベルの複数の周波数成分から成る場合は、それぞれの入射波の電力密度、電界強度（又は磁界強度）を測定し、それぞれ指針値に対する割合を算出し、それらの和（電界強度（又は磁界強度）においては、自乗和）を得る。この値が1を超えていなければ、指針値を満たすと評価される。

また、この処理の方法は補助指針(1)の①及び各②、③、④の(a)に示している人体の占める空間に相当する領域の電磁界強度分布の空間的な平均値を求める場合にも適用できる。次にその一般式を示す。

$$\overline{P}_i = \sum_{i=1}^N \frac{P_i}{L_i}$$

$$\overline{E}_i = \sum_{i=1}^N \left(\frac{E_i}{M_i} \right)^2$$

ここで、

N : 入射波の数

\overline{P}_i : 複数波の電力密度成分の指針値に対する割合の和

\overline{E}_i : 複数波の電界強度（又は磁界強度）成分の指針値に対する割合の乗和

P_i : 電力密度（実効値）の時間平均

E_i : 電界強度（又は磁界強度）（実効値）成分の時間平均値

L_i : 電力密度の指針値

M_i : 電界強度（又は磁界強度）の指針値

4.5.2 時間平均値による電磁界強度測定値の求め方

測定器が指示する電磁界強度実効値の瞬時値を平均時間にわたって連続記録し、時間平均値をとるのが原則であるが、測定系の構成や電磁界の変動の様子から必ずしも原則的な方法が最良とは言えない。条件によって、おおよそ次のような方法がある。

方法1は、直交三軸成分 (F_x , F_y , F_z) を平均時間内で三軸同時に測定する方法である。三軸同時に測定できない場合は、同時に測定する方法の三倍の時間が必要となるが、各軸ごとに順次平均時間内で連続して測定する方法がある。しかし電磁界強度の平均レベル変動 (AM変調等による瞬時の変動は考慮外) が大きい場合は正確な測定ができなくなる。電界強度 (又は磁界強度) は各軸成分の自乗和の平方根、電力密度は各成分の和から瞬時値 $F(t)$ を得て4.5.1(1)の式から時間平均値を求める方法である。

同時測定の例として、電磁界プローブと連続記録装置を組み合わせる方法があげられる。

方法2は、三軸成分を時分割して、十分短い時間で順次切り替え、離散的に電磁界の各成分の自乗和の平方根あるいは電力密度の和の平方根から瞬時値を求める方法である。この方法の特徴は、三軸での測定時間は平均時間の6分間となるが、一軸当たりの平均時間は6分間より短くなる。また、多くの測定系がアンテナの切り替え操作、測定値の読み取りや算出等に時間がかかることを考慮して、現実的に行う方法である。

方法3は、平均時間内での電磁界強度の変動がほとんどないような場合に、時間平均をとることなく瞬時値の6分間の平均をもって測定値とする方法である。

なお、瞬時的に変化する電磁界強度に関しては、1秒未満の時定数をもつ測定器が指示する電磁界強度実効値の最大値をとる必要がある。

4.5.3 測定誤差

4.5.2により得た測定値の安全性を判断する場合には、測定値に電磁界強度測定系に起因する誤差が、最悪の場合 $\pm 3\text{dB}$ 程度含まれていることを考慮する必要がある。

4.6 測定法の適用手順

初めに、対象とする空間に人体が存在しないときの電磁界強度を電磁界強度指針値と比較して安全性を判断する。この空間内に電磁界強度指針値を超える領域が存在し、人体が電磁波にさらされる状況や考慮すべき生体作用などにより、より詳細に評価する必要がある場合には、補助指針値を適用して安全性を判断する。このような評価手順によって管理指針が満たされないと示された場合には、基礎指針に立ち戻った考察を要する場合もある。以下に、測定法の基本的な適用手順を示す。

なお、補助指針(4)に示す条件を満たす低電力の電磁放射源については、評価すべき対象の放射源から除外する。

(1) 電磁界強度指針による評価

対象とする空間における電磁波分布の状況にかかわらず、最初に電磁界強度指針を適用する。実際の電磁界強度測定においては、測定の対象とする電磁界が遠方界、近傍界に相当するかどうか等を考慮せずに、測定器のアンテナを測定対象とする空間内

全体にわたり連続的に走査する。走査に当たっては、電磁界強度の変動の速度に応じて走査の速さを変えるなどして適切に測定することが大切である。

測定した電界強度、磁界強度あるいは電力密度の値を第3章の表2(a)、表2(b)、表3(a)及び表3(b)に示した電磁界強度指針値と比較する。このとき、電磁界強度指針値と比較すべき数値は、測定された電界強度、磁界強度及び電力密度の瞬時値ではなく、それぞれ定められた平均時間における時間平均値（第3章の表2及び表3の注3）であることに注意を要する。測定対象空間のいずれの点でも測定値の時間平均値が、表の値を超えなければ管理指針を満たす。電磁界の周波数が単一周波数でない場合には、第3章の表2及び表3の注4に従い、各周波数成分の指針値との比の重み付け平均を求めて比較する。

このようにして評価された全ての値が電磁界強度指針値を超えなければ、対象電磁界は安全であると判断される。

(2) 補助指針による評価

(1)で得られた測定値の中に電磁界強度指針を超える点が1以上ある場合であって、測定対象の電磁界が不均一又は人体の占める空間の局所に限られる場合並びに接触電流及び誘導電流に関わる場合には、補助指針を適用する。

① 測定対象の電磁界が不均一又は人体の占める空間の局所に限られる場合

ここで、測定対象とする空間は、電磁界強度指針値を超える点における人体の占める全空間であり、人体のいない状況における電界強度、磁界強度、電力密度が測定対象量となる。この全空間内における電磁界強度分布の平均値（電界強度又は磁界強度の場合は測定した時間平均値の自乗平均値の平方根であり、電力密度の場合は測定した時間平均値の平均値である。）並びに頭・胴部、眼及び体表面における電力密度が、それぞれ補助指針(1)の周波数に応じて該当する条件を全て満足する場合には、管理指針を満たすものとする。

② 接触電流に関する指針の適用

接触ハザードの防止されていない条件では、電磁界強度指針値は第3章の表2及び表3の注1に示す値に制限される。対象空間内にこの注1の値を超える電磁界強度の点が存在し、かつ、表2又は表3に示す値を下回る場合には、補助指針(2)が適用できる。

なお、この補助指針を適用するほか、接触ハザードの防止対策を行うことで対処できる場合がある。また、不均一電磁界の場合には、補助指針(1)を適用して接触電流に関する評価を行うことができる。

③ 誘導電流に関する指針の適用

接地状態の人体の足から地面に流れる誘導電流は、第3章の表2及び表3の注2に示す値に制限される。注2が適用されない非接地条件とは、高周波電流に関して人体が地面と十分に絶縁されている状態を意味しており、足と地面の間に10cm以上の空隙が必要である。電磁界強度がこの注2に示す値を超える電磁界強度の点が存在し、かつ、表2又は表3に示す値を下回る場合には、補助指針(3)が適用できる。

また、不均一電磁界の場合には、補助指針(1)を適用して誘導電流に関する評価を行うことができる。

(3) 基礎指針による評価

管理指針（電磁界強度指針及び補助指針）が満たされていない場合には、原則としてこれを満たすように対策を講じることが望ましい。しかし、対象とする電磁界が管理指針において想定されている状況と異なりこの管理指針で評価することが困難となる場合や、管理指針を満たさなくても基礎指針を満足することが予想される場合がある。このような場合に、基礎指針を用いた評価を行うことができる。例えば、身体に極めて近接しているために管理指針で評価することの困難な場合などでは、基礎指針で評価することが望ましい。

4.7 測定上の注意事項

4.7.1 測定者の安全確保

測定に際して測定場所に立ち入る場合には、予め電磁界強度を推定し必要に応じて防護対策を講じるなど、測定者の安全を確保することが重要である。また、接触電流等の測定に際しても、高周波熱傷又は電撃を受けないよう十分に注意を払う必要がある。

4.7.2 測定実施上の注意

- (1) 測定系の選定を誤らないこと。例えば、等方性広帯域電磁界計を用いてレーダ電波を測定したような場合は、電磁界強度を過小評価することになる。
- (2) 測定空間の内又は近傍に反射物等がある場合は、測定位置のわずかな変化に対して、電磁界強度が複雑に変化し局所的に大きくなることがあるので、測定位置の選定に注意すること。
- (3) 指向性を有するアンテナを用いる場合には、その指向特性（水平・垂直）を十分考慮し、主輻射方向以外の方向からの入射波の影響についても考慮すること。
- (4) 測定実施時には、測定者及び測定系に起因する電磁界のじょう乱を極力避けるよう配慮すること。特に、時間的に変化している電磁界を測定している間は、測定者、アンテナ及び周囲の物体は移動させないこと。また、走査測定に伴って生じる電磁界の変動が、空間的な変動か、時間的な変動かを区別するため、走査を遅くするなど十分な注意を払いながら測定を実施すること。
- (5) 測定機器は、環境条件（温度、湿度、振動、電磁界など）の影響を受ける場合がある。
- (6) 測定系は校正されたものを用いること。構成機器の経過年数、使用頻度などに応じて定期的に校正を実施することが望ましい。

第5章 電磁界強度の推定法

5.1 電磁界強度推定の性格と構成

5.1.1 電磁界強度推定の性格

電波防護指針の対象となる空間（場所）の中には、測定要件に一致する適当な測定器がない場合や電波発射源の近傍であるため測定器が正しく応答しない等の理由から、第4章の測定法によって電磁界強度測定が行えない場合がある。また、測定の実施に先立って、対象となる空間（場所）の電磁界強度を予め推定することにより、測定効率を向上させるとともに、測定者が強い電磁界に不用意にさらされることを防止することも可能となる。加えて、電波利用施設の新設・変更時においては、施設周辺の電磁界強度を事前に把握することによって、電波防護指針への適合性を判断できるほか、必要に応じて、適切な対策を講じることが可能となる。

電磁界強度の推定は、以上のような様々な状況においても、電波防護指針を円滑に適用するために行うものであって、本来の電磁界強度の評価は、実際の測定結果に基づいて行うべきものであり、推定はあくまで測定法を補完する性格のものである。

5.1.2 電磁界強度推定の構成

電磁界強度の推定方法は、あらゆる電波利用施設・設備に関して設けておくことが望ましいが、電波利用の形態とその周辺の状況は極めて多様であることから、現実的には対応が困難である。このため、推定の対象施設としては、各種電波利用施設の中から、①利用形態として代表的（基本的）であること、②理論的な解析が可能であること、③測定結果があり推定式の評価が行えることなどの条件により抽出した。ここで、①の要件としては、次のような内容を特に考慮している。

- ・ 放射（誘導）電力が大きい
- ・ 人体の近傍で運用（操作）する
- ・ 利用されている数が多い
- ・ 長時間にわたって電波が発射される

また、②に関して推定式の導出に当たっては、電磁界強度を計算するための諸条件を単純化している。

以上のような観点から、中波放送局、短波送信局、超短波・テレビジョン放送局、車載用・携帯用無線機、衛星地球局、レーダ局及び高周波利用設備を選定し、各施設・設備の推定法の考え方を順次示す。

なお、ここで示した推定方法は、将来における電波利用の実態の変化と電磁界解析技法の進歩などに基づいて、今後、適時適切に改善されることが必要である。

5.2 電磁界強度の推定

5.2.1 中波放送局

中波放送局で使用されているアンテナは、接地型であるために、アンテナの放射特性及び伝搬特性は大地の電氣的定数及び接地網によって大きく左右される。また、中

波放送の波長は数百mにも及ぶので、電波防護の対象となる送信アンテナの周辺地域のほとんどは近傍界とみなされる。

この中波放送局のアンテナ近傍界を推定する方法にはいくつかあるが、放送局の出力電力、アンテナ高（頂部負荷を含む等価高）及び送信周波数をパラメータとする比較的計算の簡単な理論解析法がある。

5.2.2 短波送信局

短波を利用した施設としては、国際短波放送局、国内短波放送局、国際通信用固定局、海岸局などがあるが、ここでは詳細な測定データがある国際短波放送局を取り上げた。

国際短波放送局では、放送対象地域ごとに作成された放送スケジュールに基づいて運用を行っているが、時間的・季節的に複雑に変動する伝搬状況に応じて、国際的に割り当てられている6MHz帯～21MHz帯の周波数と、放送対象地域向けの指向性アンテナ（主としてカーテンアンテナ）を随時切り換えて放送している。このように、無線局としての運用状況は非常に複雑であることから、推定を行う際には、その情報を事前に把握する必要がある。

また、国内短波放送局は、3MHz帯、6MHz帯及び9MHz帯の3周波数帯を、指向性アンテナにより放送している。

5.2.3 超短波（FM）・テレビジョン（TV）放送局

FM放送及びTV放送に用いられるVHF帯及びUHF帯の電波は、見通し距離内の伝搬が主体となるので、送信アンテナは通常高い鉄塔上に設置される。また、1つの鉄塔を複数の局が共用する場合も多く、1点から異なる周波数で複数の放送波が放射されることを前提に、合成電磁界強度を推定する。

5.2.4 車載用及び携帯用無線機

車載用・携帯用無線機は、簡易無線、アマチュア無線、パーソナル無線及び自動車電話など、個人用、業務用を問わず広く用いられている。これらの無線機は比較的近距离の通信に用いられるため、送信出力は数ワット程度である。また、この車載及び携帯用の無線機には、同一の種別では同じ周波数帯が割り当てられ、また、使用するアンテナ型式も同じであることから、電波の放射形態は類似しており、共通の推定式が適用できる。

これらの無線機による放射電磁界のレベルは、送信出力、アンテナの型式、アンテナの位置等によって変化する。特に、車載用アンテナは一般的に金属きょう体に取り付けられるため、近傍電磁界に自由空間伝搬の概念による推定式をそのまま適用するのは困難であるが、無限長完全導体上に設置したホイップアンテナをモデルとするのが有効である。350MHz、835MHz及び900MHzの周波数において $\lambda/4$ のホイップアンテナ及び $\lambda/2$ のスリーブアンテナから $\lambda/4$ 離れた距離における電界強度の推定値は実測値とよく一致する結果が得られている。

5.2.5 地球局

地球局には、特殊な用途（20GHz帯～90GHz帯）を除けば、通常、2GHz帯～14GHz帯の周波数が割り当てられ、アンテナとしては多くの場合、カセグレン型開口面アンテナを用いている。

地球局用開口面アンテナのビーム形状は一般的に鋭いので、主ビーム方向以外の空間で電磁界強度が強くなる可能性は少ない。電磁界強度は、推定対象とする地域と地球局のアンテナとの相互位置関係、主ビーム方向、送信出力、アンテナ開口径及び波長などに依存する。

電磁環境の推定に当たっては、地球局の周辺地域を、①アンテナの近傍領域（フレネル領域）、②遠方領域（フラウンホーファ領域）及び③過渡領域（①及び②領域の中間領域）に分け、それぞれにおける最大電力密度の表示式を用いる。ここで、地球局用アンテナの直下及びアンテナのエッジを含む極めて近い場所では、この推定法を適用できない。

本推定式による電力密度の推定値は、遠方領域においては実測値と比較的よく一致する結果が得られている。他方、近傍領域において本推定式による推定電力密度が管理指針の基準値を超える場合には、散乱電磁界の影響等を考慮した、より厳密な推定法が必要となる。

5.2.6 レーダ施設

レーダ施設は、測位、航行、気象、航空管制等の目的に使用されており、アンテナを含む設備は、地上に設置されるものから船舶に搭載されるものまで様々である。送信電力は、アンテナ指向性を含めたパルス尖頭値で数百kWから数MWに及び、また、アンテナは目的に応じて、回転又は往復運動を行えるような走査機能を有している。

パルス変調されているレーダ波の尖頭電力 P_p [W]と平均電力 P_{ar} [W]との間には、パルス幅 Δt [s]とパルス変調 T [s]との比（デューティサイクル）を与えると、次の関係がある。

$$P_{ar} = P_p \times (\Delta t / T)$$

ある地点における平均電力密度は、この平均電力、アンテナ利得及び使用電波の周波数（又は波長）などから推定できるが、アンテナからの距離により、①ごく近傍のフレネル領域、②過渡領域（フレネル領域とフラウンホーファ領域の中間領域）及び③遠方領域（フラウンホーファ領域）に区分して、推定式を適用する。

なお、この推定式はレーダアンテナの走査運動を考慮していないので、それを補正するための係数を近傍界と遠方界とに分けて適用する必要がある。また、本推定式は、ペンシルビーム型アンテナの大型レーダを対象としているため、ファンビーム型の船舶用レーダに適用すると推定誤差を与える可能性があるため、この場合はより精度の高い推定法が要求される。

5.2.7 高周波利用設備

実用に供されている高周波利用設備は、加熱原理（誘導加熱、誘電加熱の別）、使用目的（材料加工、医療など）、使用周波数帯、高周波出力及び作業環境（作業者の距離）などが多種多様であり、一律に適用できる推定法はない。したがって、高周波利用設備では、各設備ごとに電磁波源及び環境をモデル化して推定しているのが現状である。

この種の設備では、一般に作業者が電磁波源に近接して作業する場合が多いので、特に、以下の条件を考慮した、より正確な電磁界強度の推定方法が要求される。

- ① 使用周波数と放射電力
- ② 運用条件（連続運用か間欠運用か、またその運用周期など）
- ③ 作業条件（作業者の位置、接地条件など）
- ④ 設備の周囲環境（設備の遮蔽、接地状態、反射物体の有無、他設備との距離など）

なお、医療用設備に関しては、最近の温熱療法（ハイパーサーミア）の急速な発展に伴い、その防護方法を含めて、ハイパーサーミア学会で調査・検討中である。

第6章 防護法

6.1 防護法の性格と構成

6.1.1 防護法の性格

本防護法では、測定法、推定法により電磁界強度（電界強度、磁界強度及び電力密度をいう）、接触電流及び誘導電流を測定あるいは推定した結果、電波防護指針を越すような電磁界から、人体の安全を確保するための方策を講ずることを目的としている。したがって、ここで示す防護法は一般的かつ原理的な内容であって、個々の施設・設備が有する特別な条件を考慮した具体的な解決策について言及するものではない。また、防護法は電磁波源の諸特性、電磁波源との位置関係及び技術的難易度等を考慮し、総合的に確実かつ合理的な方法を選択する必要がある、加えて、防護策を施した結果、効果があったか否かを評価するために、対象空間の電磁環境が防護対策の実施の前後においてどう変化したかを、測定又は推定により慎重に分析・評価する必要がある。

なお、この防護法は現時点での防護技術等を踏まえたものであり、防護技術等の進歩に対して適時適切に見直しを行う必要がある。

6.1.2 防護法の構成

電磁波源が電磁環境の発生源であることから、人体を電磁界から護る最も有効な方法は電磁波源側で防護法を実施することである。防護法の構成としては、電磁波源等を施設・設備など（ハード面）及び運用・操作など（ソフト面）の2つの側面から捉えて、その対処方策を検討し、その効果を最大限発揮できるような方策を適用する必要がある。しかし、防護を必要とする状況が、通常の電波利用状況の場合や電磁波源の保守等の特殊な状況の場合があり、必ず電磁波源側で対処しなければならないというものではない。特に、後者の場合には、電磁界にさらされる人体側で防護策を講ずることも必要である。

6.2 防護方法

防護方法は、遮断・絶縁、距離制限、時間制限、電力制限及び安全管理の五つに大別され、これらを有機的に組み合わせて最適な効果となるようにする。

6.2.1 遮断・絶縁

電磁波源と人体との間を電磁氣的に遮断又は絶縁して対策するものである。

漏洩電磁波等に対しては、電磁波源又は電磁波源を含む空間を電磁遮蔽材等で覆うことにより遮蔽する方法、金属板や電波吸収材を用いた衝立等により電磁界強度を軽減する等の方法がある。

接触電流に対しては、金属物体を非誘導材により被覆することや金属体を接地する等の方法があり、また、足首誘導電流に対しては、床面を絶縁状態にすること等により人体の非接地条件を確保する方法がある。

なお、電磁波源の保守等の特殊な状況に対しては、防護具（防護服、防護眼鏡、絶

縁靴、絶縁手袋)の使用で電磁界強度の軽減が可能である。この場合、防護具としては基礎指針に基づいて評価されたものを用いる必要がある。しかし、現在、防護素材の評価法はかなり進んでいるものの、これらで構成した防護服等の評価法はまだ研究段階にあり、我が国でもその効果の追試がされていない。

6.2.2 距離制限

電磁波源と人体との間の距離を一定以上確保して対策するものである。

具体的には、利用状態において指針に適合する機器構造とする、電磁波源から一定範囲を立入禁止とする。空中線地上高を高くする等の方法がある。

6.2.3 時間制限

電磁波源の送信時間又は稼働時間を小さくし、平均時間の評価を考慮して対策するものである。

間欠利用される設備のデューティサイクルを小さくする、稼働(操作)時間を平均時間(6分間)内で制御する等の方法がある。

6.2.4 電力制限

対象空間に対する輻射電力量を低減することによって対策するものである。

複数波源が局所的に集中しないように配置する、空中線の輻射パターンを利用する、空中線系が特定方向を向かないようにする等の方法がある。

なお、電磁波源の保守等の特殊な状況に対しては、一時的に電磁波源の出力を低減又は停止する方法がある。

6.2.5 安全管理

安全管理マニュアル、機器の操作説明書等において、防護に関して必要な情報を明示し、操作者又は運用者が、この情報に基づく適切な行動を励行することによって対策をするものである。

安全管理マニュアルに関する情報としては、次の項目が考えられる。

- ① 障害発生の可能性と回避行動
- ② 立入禁止区域の設定、標識の掲示、注意書き表示
- ③ 波源との適切な距離確保
- ④ 金属物の着用制限
- ⑤ 電磁界強度モニター等の利用
- ⑥ 測定・推定等による電磁界強度の事前確認
- ⑦ ペースメーカー使用者等の特異な状況

付録 1 ー 電波防護指針の根拠 ー

1 基礎指針の根拠

1.1 基礎指針①の根拠

生体が電磁界にさらされた場合に、短期的に現れる生物学的影響としては、全身加熱による体温（組織温）上昇による作用がある。この作用は動物実験により得られる行動パターンの変化に最も敏感に現れると言われている。この行動パターンの変化は、実験動物の種類及び照射電磁界の条件によらず、ほぼ一定の全身平均SARを超えると生ずることが多くの研究者により解明されている。このことから、全身平均SARがこの作用に関する指標として用いられている。

行動パターンの変化等に現れる全身に対する熱作用の閾値は、全身平均SARを指標として、ラットなどの動物実験の結果からANSI（米国規格協会）(Am82)では4~8W/kg、EPA（米国環境保護庁）の研究報告(EI84)では1~2W/kgとされている。全身平均SARが1~2W/kgとなる電磁界エネルギーの吸収は、人の基礎代謝量をもとに考察すると約1℃の深部体温上昇に相当する。

以上から、閾値が1~4W/kg程度とする考え方は確立されているとみなすことができる。これに基づき、全身平均SARの指針値を0.4W/kgとする。この指針値には上記の閾値に対し、2.5~10の安全率が含まれる。これは、閾値推定の根拠が動物実験の結果であり、そのまま人体に外挿するには不確定な要素があることを考慮したものである。動物実験の結果では、閾値はマウス、サル等の動物の種によらないと考えられているが、一方では、熱調節機構が同等ならば大きな動物ほど影響を受けやすく、「ラットの4W/kgは、人間の0.57W/kgに相当する。」という考え方も提案されている(Go86)。この考え方には批判も多く、発汗機構の発達した人体にそのまま適用することは妥当でない。しかし、仮にこうした考え方がある程度正しくても、問題を生じないためには、上記の安全率の導入が有効である。この指針値により、人体の全身が電磁界にさらされることによる熱作用の影響から十分に防護できると考えられている。

ANSI基準、IRPA（国際放射線防護協会）指針、オーストラリア規格なども同様に「全身平均SAR=0.4W/kg」という値を根拠として指針等を定めており、この数値の妥当性は確立されたものとなっている。

また、人体の熱的時定数はおよそ0.1時間以上と見積もられているため、この指針値は任意の6分間（0.1時間）にわたる平均値に対して適用する。

1.2 基礎指針2の根拠

Bernhardt(Be79)等によれば、神経・筋肉細胞を興奮させる電流密度の閾値の下限は、およそ $J=0.35 \times 10^{-4}f(\text{Hz})\text{mA}/\text{cm}^2$ [10kHz~100kHz] と推定している。この数値を誘導電流密度の指針値とした。

人体内部の心臓付近で刺激作用の閾値に近い電流密度が生じるとすれば、この作用の重要性を考慮して更に安全率を設けるべきである。しかし、10kHz以上の周波数外部電磁界によって組織内を流れる誘導電流は主に体表付近で大きく、体表面付近でこの値

が満たされていれば、人体内部の重要な部分には刺激閾値よりはるかに小さな電流密度しか生じない。したがって、この指針値で人体を十分に防護できる。

刺激作用は1秒以内の時定数の現象と考えられるので、指針値はこの時間内平均値に適用する。

1.3 基礎指針3の根拠

接触電流による熱傷の閾値は「200mA」といわれている(NC86, Ro81)。また、「200mA」の接触電流は、100kHz以上の周波数において物を握ったときに検知できる程度の値といわれている。100kHz以下の周波数では、感知できる閾値が周波数に比例して低くなる。また、指先での接触による場合は電流密度が集中するため、検知閾値はこれよりも低くなる(Ch86)。したがって、この閾値以下でも接触のしかたによっては十分に感知される可能性がある。

一方、IEC（国際電気標準会議）及びJIS（日本工業規格）において、外部からの人体への流入電流については「体外からは1mA（商用周波数）」という値が定められている。電流による刺激作用の閾値は1kHz以上の周波数では周波数に比例し、1kHz以下の周波数においてはほぼ一定の周波数依存性を有すると言われている(Sa88)。したがって、刺激作用の閾値に相当する電流の値を外挿すると、10kHzから100kHzまでの周波数については $10^{-3}f[\text{Hz}]\text{mA}$ (10mA~100mA)となる。この数値は握り接触の閾値の2分の1の値である。商用周波数の規格との整合性、指先での接触のように感知閾値の低い場合を考慮して、この数値を接触電流等の体外から流入する電流の基礎指針値とする。この作用は刺激作用を考慮したものであり、1秒間以内の平均値に対して適用する。

100kHzから10MHzまでの周波数領域では、電流の作用は刺激作用でなく熱作用が支配的である。この作用の閾値は周波数に対してほぼ一定である。したがって、上記の値との連続性を考慮し、この周波数範囲の体外からの流入電流に関する基礎指針値を100mAとする。この値は前述の高周波熱傷の閾値の2分の1であり、人体を安全に防護し得る値と考えられる。この周波数範囲では熱作用に支配的なので、指針値は6分間の平均値に適用する。

1.4 基礎指針4(a)の根拠

基礎指針1の内容を満足している場合であっても、身体の局所に大きなSARが集中することは好ましくないと指摘されている。

局所SARの最大値（ピークSAR）に関しては、自由空間において1GHz以下の周波数の電磁界にさらされている場合では、電力吸収は頸部と手足に集中し、最も吸収しやすい状態において全身平均SARのおおむね20倍程度と言われている。そこで、ピークSARを全身平均SAR（0.4W/kg）の20倍の、8W/kg以下であればSARの分布によらず安全側にあると認められる。しかしながら、これを超えた場合に障害が発生するというデータがないため、注意事項にとどめた。

一方、Gandhiら(Ga86a)等は、共振周波数付近で接地状態のときの足首のSARはその見積りをはるかに越えることを指摘している。接地状態では、足首の位置が誘導電流の

最大値となるためである。しかし、足首など四肢には重要な臓器がなく、温度上昇に対する耐性も高いと考えられるので、四肢の局所SARは8W/kg以上でも許容し得る。温度上昇の観点から行なわれた研究では、断熱状態における1分間あたりの温度上昇量[°C]は、足首では局所SAR値[W/kg]の0.0045倍、手首では0.0048倍と報告されている(Ch88)。すなわち、25W/kgでは6分間で最悪の場合約0.7°C(0.0045×25×6)上昇する。また、実験報告では定常温で40°Cまで上昇すると報告されている(Si89)。表面での冷却効果及び他の方法による局所加熱との比較によれば、体表と手足に限り、ピークSAR値=25W/kgは適当な値であると判断できる。

特定の部位が電磁界に局所的にさらされる場合では、眼への影響に関心が持たれている。白内障に関してはGuy(Gu75)等により、138W/kgという閾値(20分以上の照射の場合)が報告されている。一方、最近、角膜に可逆的変化をもたらす閾値が2.6W/kg(2.45GHz、10mW/cm²)という報告(Ku85)がある。カナダの改訂案ではこれに基づき眼におけるピークSARを0.4W/kg以下としている。しかしながら、この報告はパルス波を用いた場合であり、連続波では閾値が2倍以上のSARとなること、1日4時間の連続照射を繰り返した場合に見られた現象で短時間の照射では生じないこと、更に追試による確認が行なわれておらず、確立した現象という合意が得られていない。このことから、今後の追試結果などに基づきこの現象の妥当性が確立された場合に再検討することを前提とし、眼に関してピークSARの指針値を特に定めず、暫定的に他の組織と同様に8W/kg以下とした。

なお、この値は白内障の閾値に対して十分な安全率(約17倍)となっている。

周波数が高くなると電力吸収が表面のごく薄い層にのみ集中するので、ピークSARが大きくなっても深部組織の温度はそれほど上がらないため、表面組織の温度上昇はマイクロ波からミリ波領域では飽和すると考えられる。そこで局所SARは1辺が約1cmの立方体における「組織1g当り」の平均値を用いることとした。

1.5 基礎指針4(b)の根拠

3GHz以上の周波数領域では、眼への影響と体表の広い範囲への照射による熱感などが問題となる。ウサギの角膜上皮に対する一過性の障害が35GHz及び107GHzの周波数で10~50mW/cm²程度の照射で生じ、100mW/cm²程度を超えると一過性でない影響の可能性も考えられている(Ro76)。一過性の障害は、電磁波を照射しなくても検出される程度のもので重大なものではない。以上の報告を考慮し、入射電力密度を10mW/cm²以下にすることが望ましく、この項目を注意事項として加えた。

ミリ波領域のもう一つの問題である熱感については、Gandhi(Ga86b)等によれば、体表の広範囲に照射を受けたときの熱感の閾値は8.7mW/cm²であろうと推定される。全身的にこの値以上の照射を受けると、基礎指針1を超える。広範囲でなく局所の照射の閾値ははるかに高く、内腕の温感の知覚閾値が26.7mW/cm²(2.45GHz、10秒間照射時)、熱痛の閾値が2,500mW/cm²(3GHz、30秒間照射時)と言われている(E184)。これから推定して、基礎指針1と基礎指針4(a)が満たされていれば、熱感に関する問題は生じない。

2. 管理指針の根拠

2.1 電磁界強度指針の根拠

基礎指針で示した各項目に基づき、電磁界強度指針を以下のとおり定めた。

なお、電磁界強度指針値及び同指針値を決定する際に考慮した生体作用の閾値を条件P、条件Gごとに図6～図9に示した。

2.1.1 条件Pの場合

(1) 表2(a)について

ア 3MHz以上の周波数領域

基礎指針1に基づき、人体が平面波の電磁界にさらされた場合にSAR=0.4W/kgとなる電界強度をさまざまな身長の人体を想定して求め、これを超えない包絡線の曲線から電界強度の指針値を求めた(Du79,Am82)。磁界強度の指針値は平面波の場合に対応する磁界強度とした。

この換算では、電磁界分布に関しては身体の一部だけではなく全身が一様に平面波の電磁界にさらされる場合、偏波に関しては人体への電力吸収が最大となる向きの場合、といった最悪の状態を想定している。また、吸収電力は人体の寸法・形状により固有の共振特性をもっており、指針値はその共振曲線の包絡線を結んで決めている。したがって、これらの条件が変われば実際の吸収電力は小さくなる。すなわち、最悪状況を除くほとんどの場合において、基礎指針に対する十分な安全率が含まれている。

なお、平面波でない場合は電界強度と磁界強度の比が 120π とならないため、電界強度および磁界強度についてそれぞれ満たせば、安全側である。

イ 3MHz以下の周波数領域

低周波領域の電界については、基礎指針2と3の考えを6分間平均値にも取り入れることによって、予期できない状況での大きな電撃及び誘導電流による障害を防ぐこととした。このため、3MHz以下の周波数の電界強度の6分間平均値は「614V/m(100mW/cm²相当)」を上限としている。

(2) 表2(b)について

Hill(Hi85b)等によれば、接地状態にある人体がその長軸に平行な低周波電界にさらされたとき、人体を流れる電流の大きさは次式で表される。

$$I=275 \times 10^{-9}f(\text{Hz})E(\text{V/m}) \text{ mA} \quad [60\text{Hz} \sim 200\text{kHz}]$$

このとき、基礎指針③により電流を $I \leq 10^{-3}f(\text{Hz})\text{mA}$ とすると、電界強度は次式となる。

$$E \leq 3,636 \text{ V/m} \quad [10\text{kHz} \sim 100\text{kHz}]$$

これに基づいて、測定上の不確定さを考慮し、電界の上限を実効値で2,000V/m(安全率1.8)とした。平均時間は、基礎指針に基づき1秒以下とした。

また、基礎指針②により誘導電流密度を $J \leq 0.35 \times 10^{-4}f(\text{Hz})\text{mA/cm}^2$ とすると、これに相当する磁界強度は、Bernhardt(Be79)より

$$H \leq 800 \text{ A/m} \quad [10\text{kHz} \sim 100\text{kHz}]$$

これに基づき、電界強度の場合と同様に測定上の不確定さを考慮して同程度の安全率を設け、磁界の上限を実効値で163A/m（安全率は1.7）とした。

(3) 表2の注1について

接触電流は電磁界中に置かれた非接地の物体に高周波電圧が誘起している時に、接地した人体が接触することによって流れる。流れる電流と電界強度の関係は、非接地物体の大きさ等さまざまな条件に依存し、電界強度と一定の関係でない。したがって、本来は補助指針(2)のように直接これを評価すべきであるが、電磁界強度からでも簡易に評価ができるように、基礎指針3を背景に、対象にいくつかの仮定を想定して以下のように指針値を示した。

研究報告によれば、成人女性がトラックやバスのドアノブなどを握ったとき電撃を感知する電界強度の閾値は、10kHz～3MHzで約170V/m(7.7mW/cm²)である(Ch86)。これは100kHz以上では220mAの電流に相当する。男性では約200V/m(260mA)、子供では約150V/m(180mA)となる。同様に、トラックに指先で触ったときに感知する電界強度の閾値は、女性が約70V/m(35mA)、男性が約85V/m(40mA)、子供が約60V/m(25mA)である。

条件Pでは対象を成人女性がバスやトラックのドアノブに触れる状況を典型的な状況と設定し、この場合の電撃の閾値をやや下回る値として、指針値を5mW/cm²に相当する137V/mとした。また、平均時間は基礎指針③に基づき1秒以下とした。

この規定は、あらかじめ接触ハザードが防止されるときには適用しない。

(4) 表2の注2について

基礎指針4(a)に基づき、以下のとおりとした。

100MHz以下の周波数領域では、接地した成人の足首のSAR=25W/kg以下となるような電界強度は周波数特性を有しており、もっとも厳しい場合には「20V/m（周波数40MHz）」となる(Ga86a)。このとき、初期の6分間の温度上昇は0.7℃以下(Ch88)、定常温は40℃以下(Si89)である。ただしこの指針値は熱的時定数を考慮し、6分間平均値に適用する。

この足首のSARによる制約は、人体が非接地とみなせる（大地から10cm以上離れている状況）とみなせる場合は除外する。また、靴を履けば流れる誘導電流は数十%軽減できる。

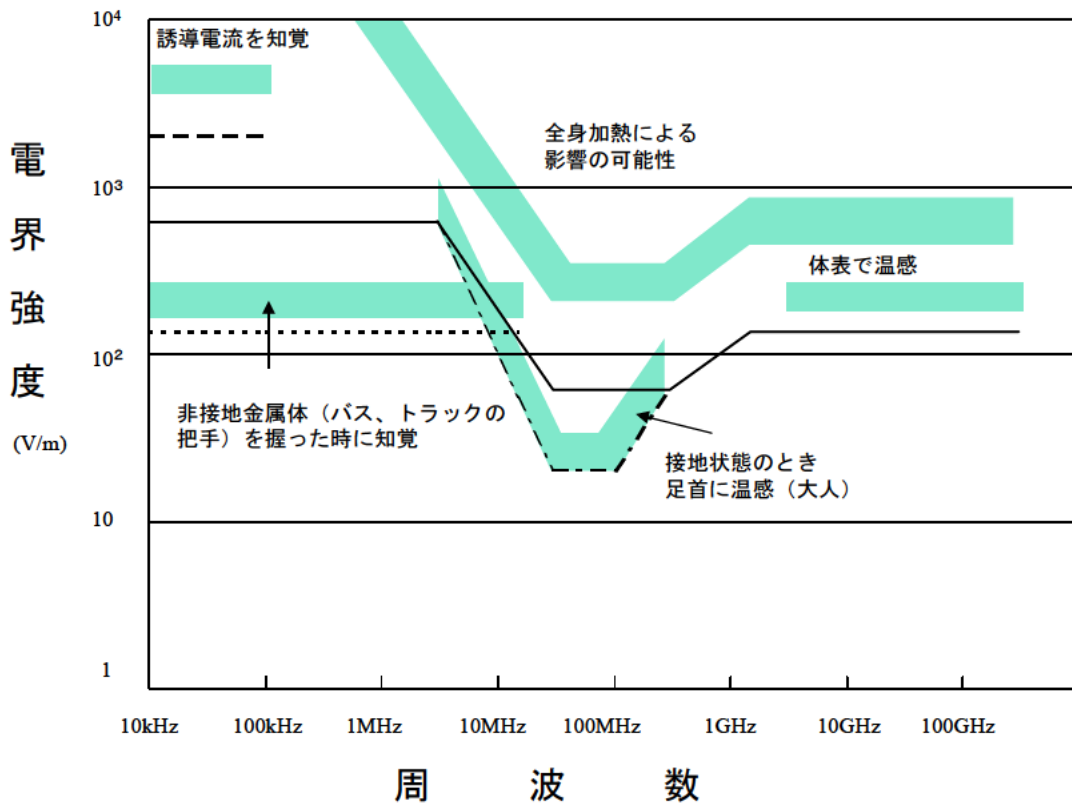


図6 電界強度指針値及び考慮した生体作用の閾値 (条件P)

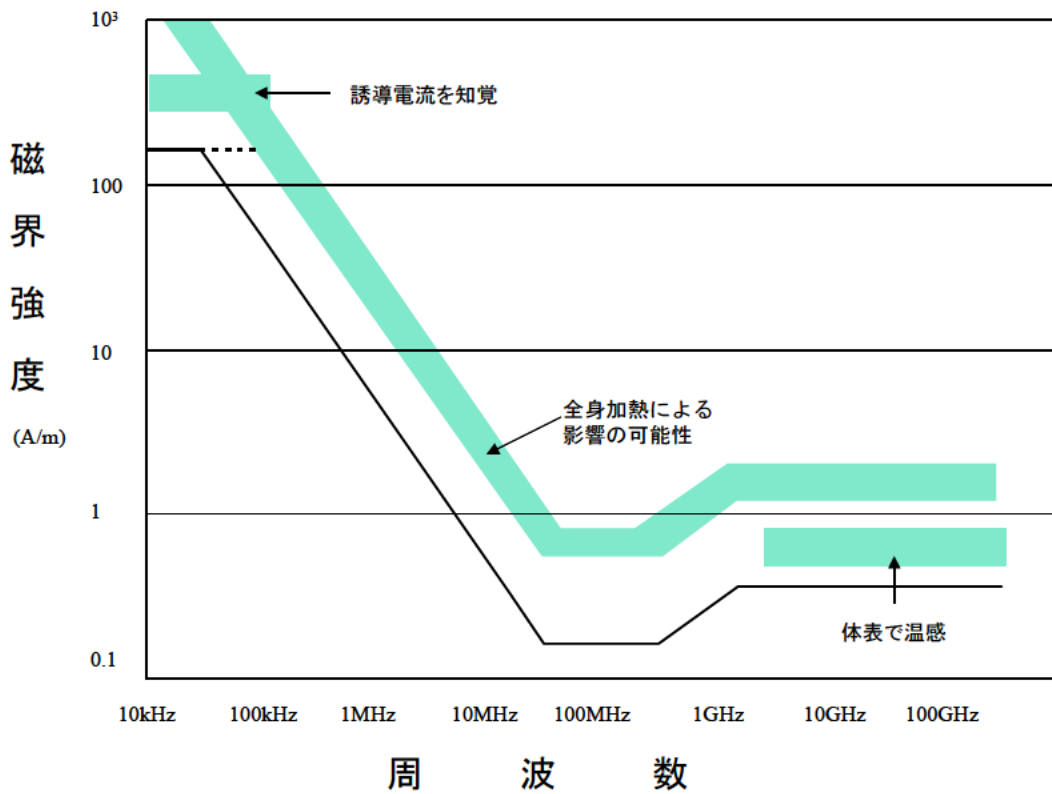


図7 磁界強度指針値及び考慮した生体作用の閾値 (条件P)

2.1.2 条件Gの場合

(1) 表3(a)及び表3(b)について

条件Gでは、防護指針に照らした管理が十分になされていない等の状況が含まれる。この場合、測定が頻繁に行なわれるわけではなく、測定点が十分に網羅されていなかったり、電波を散乱する周辺の物体や建物などの状況が変化することなどによって、放射源が変わらなくても電磁界強度が2倍程度まで変化することが想定される。条件Gでは、このような不確定さを考慮し、条件Pに比べて電力密度で5倍（電界強度又は磁界強度で2.23倍）の安全率を付加的に考慮した。IRPAなどの指針でも、一般公衆のばく露限界を職業的なばく露に比べて同じく電力密度で5倍の付加的な安全率を設けている。

(2) 表3の注1について

条件Pの場合と同様、基礎指針3に基づき以下のとおりとした。

研究報告によれば、子供がトラックやバスなどの大きな金属物体に指先で触れた時（点接触）に電撃を感知する閾値が最も低く、このときの電界強度の閾値は約60V/mである(Ch86)。これを典型的な状況として、接触ハザードの防止が考慮されていないときの指針値を「61.4V/m(1mW/cm²)」とした。この電界強度は100kHz以上では25mAの接触電流に相当する。これは成人男子がスクールバスに指先で触れた時の知覚閾値に相当するが、条件Gの性格から、より閾値の低い子供を考慮した。また、平均時間は基礎指針3に基づき1秒以下とした。

この規定は、あらかじめ接触ハザードが防止されるときには適用しない。

(3) 表3の注2について

条件Pの場合に比べて $\sqrt{5}$ 倍の安全率を課し、最悪の場合で9V/m（周波数30MHzから100MHz）とした。これは、子供に対しての最悪の場合でも、接地人体の足首のSARが周波数62.5MHzで12W/kg（条件Pの1/2）以下となる値である(Ga86a)。このとき、初期の6分間の温度上昇は0.3°C以下(Ch88)、定常温は38°C程度(Si89)となる。この指針値は熱的時定数により、6分間にわたる平均値に適用する。

この足首のSARによる制約は、人体が非接地(大地から10cm以上離れている状況)とみなせる場合は除外する。また、靴を履いている場合には誘導電流は数十%緩和できる。

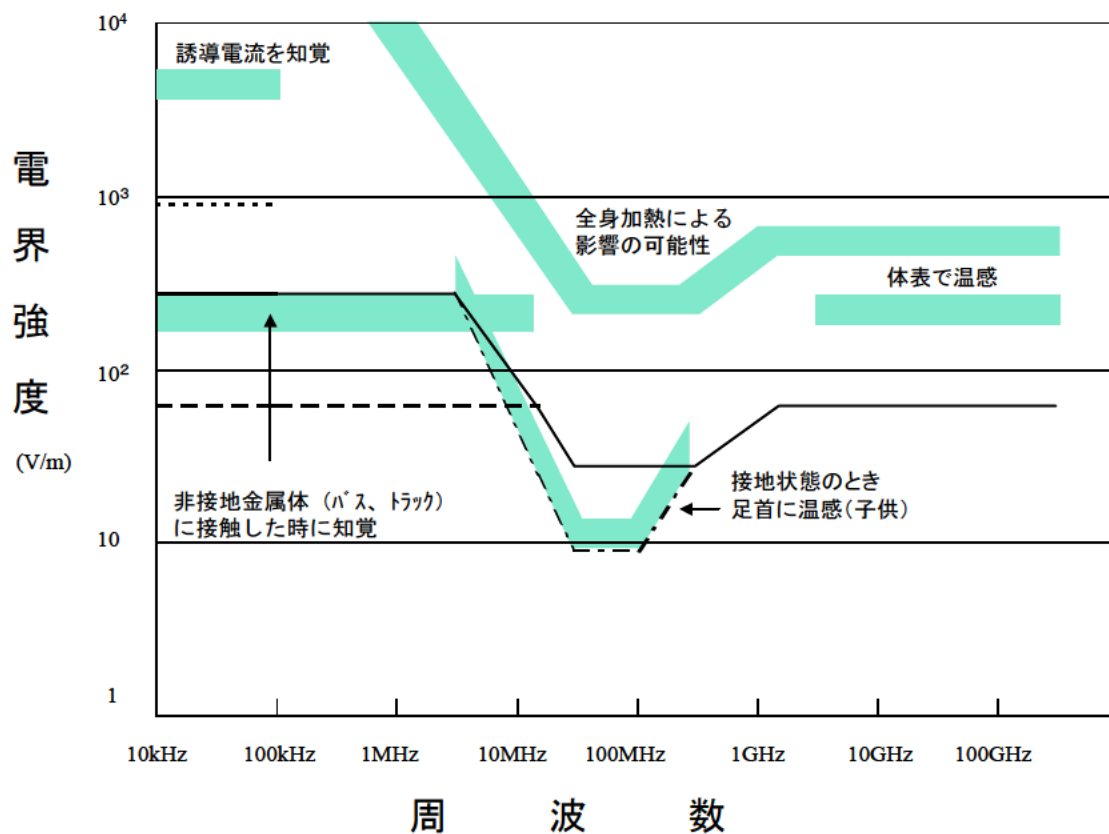


図8 電界強度指針値及び考慮した生体作用の閾値 (条件G)

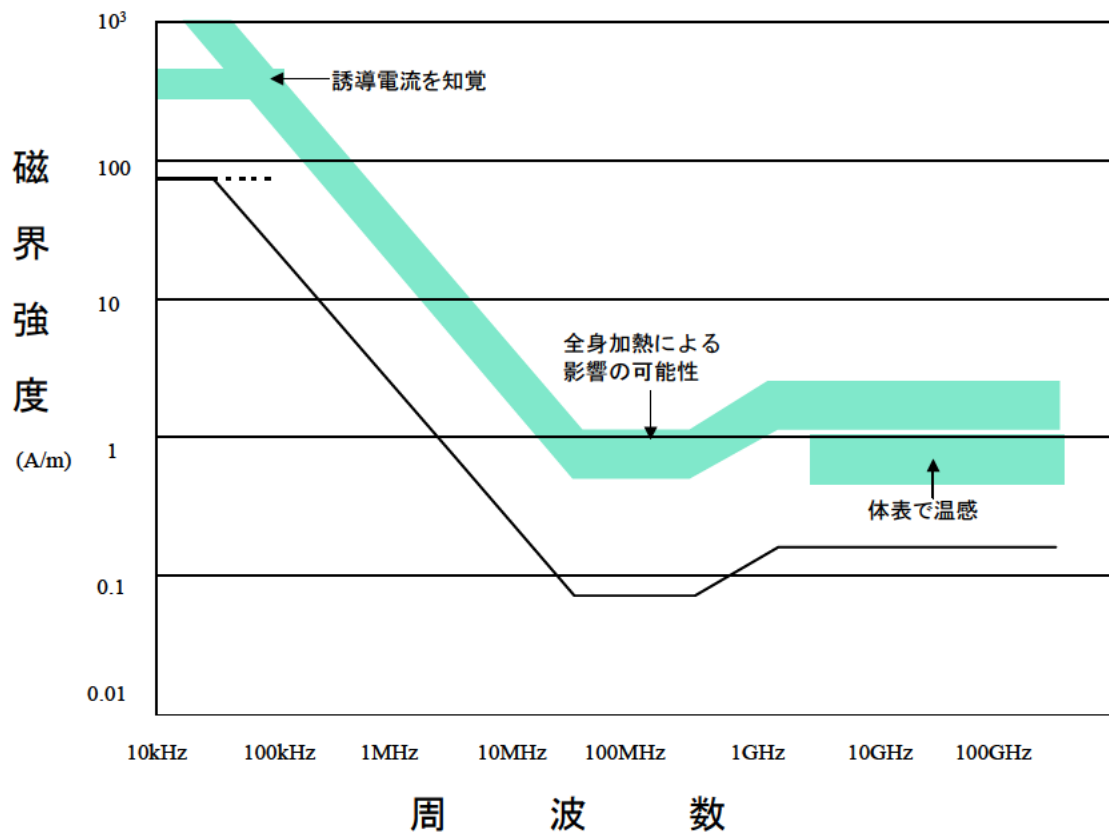


図9 磁界強度指針値及び考慮した生体作用の閾値 (条件G)

2.2 補助指針の根拠

(1) 不均一曝露・局所曝露に関する指針の根拠

電磁界強度指針は、電磁界に全身が均一にさらされた場合を想定して基本指針(1)から導いたものである。しかし、不均一にさらされた場合には局所的に電磁界強度指針値を越える点が存在しても、基礎指針(1)を十分に満たしている場合がある。

本来、入射電磁界とSAR分布とはレベル的な相関はあっても分布的な相関はない。たとえ均一な電磁界にさらされてもSAR分布は複雑になる（頸部、手首、足首などのくびれた部分にSARが集中するといわれている）。不均一曝露及び局所曝露ではさらに別のパターンの分布となる。しかし、全身平均SARを一致させるために不均一電磁界の空間的(自乗)平均強度を等価均一電磁界強度とし、その値で指針値と比較しようという試みは、ある程度自然な考えであり、複雑な問題を簡潔にするのにきわめて有効である。ただし、この制限だけでは局所曝露特有のSARの集中という危険性が残る。よって、人体に比べて波長の短い300MHz以上の周波数領域については、人体への局所的な入射電力密度を制限する条項を付け加えた。

この指針は放射源との距離が重要であり、測定条件の制約から設けられた放射源からの距離20cm(300MHz以上の周波数では10cm)より人体が近づく場合には十分注意する必要がある。特に放射源との相互作用がある場合には基礎指針(4)(a)を考慮に検討し直す必要がある。

ア (1)、(2)(a)、(3)(a)および(4)(a)について

上記の議論と基礎指針(1)および電磁界強度指針を考慮した。

イ (2)(b)、(3)(b)及び(3)(c)について

局所的に電磁界にさらされる場合の入射電力密度と局所SARの間には、必ずしも一定の関係はない。しかし、これまでの研究報告から、ある程度の相関を見出すことができる。近接した放射源による局所SARは、周波数とともに局所への集中が著しくなる傾向がある。1GHzから3GHzまでの周波数領域では、およそ10mW/cm²程度、300MHz以上の周波数ではその数倍の電力密度で局所SARの最大値が8W/kgとなることが推定される。基礎指針の注意事項である(4)(a)をそのまま適用すれば、入射電力をこの数値に制限することが適当といえるが、1GHzから3GHzまでの周波数領域では、吸収される部分が眼及び頭部を除けば主に体表や四肢の限られた領域であり、問題となる障害の可能性はない。したがって、300MHzから3GHzまでの周波数領域での局所への入射電力密度は20mW/cm²とするのが適当である。ただし、頭部における吸収については慎重にとり扱うべきであるとの専門家の指摘もあるので、8W/kgの制限を考慮し、1GHzから3GHzまでの周波数領域では10mW/cm²以下とした。

ウ (4)(b)について

基礎指針(4)(a)に基づき、表面から厚さ1cmにおける平均SARが25W/kg以下となる等価平面波電力密度は、3GHz以上の周波数では約50mW/cm²である。条件Gでは、

5倍の安全率を更に考慮した。条件Pの数値は、長時間の照射ではやや温感が感じられる場合もあるが、熱痛の閾値よりはるかに小さい。特に、指針の他の条項を考慮すれば、50mW/cm²となることが許容されるのは極めて体表の狭い範囲に限られることに注意が必要である。

エ (4)(c)について

基礎指針(4)(b)に基づき、3GHz以上の周波数では眼への入射電力を制限した。

(2) 接触電流に関する規定の根拠

基礎指針(3)を考慮した。ただし、条件Gでは1/√5倍の安全率を更に考慮した。この付加的安全率は電磁界強度指針の場合と同様の根拠による。また、指先等による点接触の場合の感知閾値が基礎指針の根拠となっている握り接触時の1/√5倍程度であるため、点接触時にも感知しない意味でもこの安全率が有効である。

(3) 誘導電流に関する規定の根拠

局所SARと電流密度との直接的関係は次式により与えられる。

$$\text{局所SAR} = J^2 / \sigma \rho$$

ここで、 $\rho = 1000\text{kg/m}^3$ 、 σ は周波数3MHz～300MHzで0.4～1.25S/mである。足首の断面積を $A = 10\text{cm}^2$ とすると、 $\text{SAR} = 25\text{W/kg}$ （基礎指針(4)(a)）に対応する誘導電流は次式で表わされる。

$$I = A(\text{SAR} \cdot \sigma \rho)^{1/2} = 100 \sim 176[\text{mA}]$$

また、両足ではこの2倍となることから200mAとした。条件Gでは、更に1/√5倍の安全率を考慮した。

(4) 低電力の電磁放射源に関する規定の根拠

仮に放射電力の1/2が全身に吸収されるとして、体重75kgの人の全身平均SAR0.4W/kgを越えるのは放射電力60W以上のときであり、たとえ体重10kgでも許容される放射電力は8Wとなる。また、頭部4kgに1/5が吸収されるとして、頭部平均SARが0.4W/kgを越えるのは放射電力8W以上のときである。

Balzanoらの800MHz帯携帯無線機での実験では、ピークSARは1Wあたり0.4～0.9W/kgであった(Ba78b)。Chatterjeeらの同様の実験でも1Wあたり0.6～0.8W/kgが得られており(Ch85)、さらにClevelandらも1Wあたり0.7～1.1W/kgを得ている(CI89)。これらによれば、「定格出力7W以下」は、基礎指針(4)の(a)の局所SAR8W/kg以下を満たしている。

更に、均質球モデルによる3GHzまでの実験でも、アンテナから7cm以上離れれば基礎指針を超えないことが確認されている。

携帯無線機等では使用時間も自然に制限されるため、「3GHz、7W以下」で特に問題はないように思われる。ただし、放射源が体に密着、あるいは眼に接近するような場合には十分注意を喚起する必要がある。

3 安全率

3.1 基礎指針における安全率

基礎指針における安全率の概念は、動物実験データからの推定閾値を人体に適用する際の不確定性に基づく。人体についての実験データに基づく場合は、不確定性が少ないため、推定される閾値の下限とした(基礎指針(2),(3))。全身平均SAR(基礎指針(1))では、動物実験から外挿するため、人体と動物の違いを考慮して適切な安全率(2.5~10)を設けた。

注意事項(基礎指針(4))の数值は、定量性が十分でないため、安全率の考えは明確でない。

3.2 管理指針における安全率

管理指針における安全率の概念は、基礎指針からの換算及び測定上の不確定性に基づく。

全身平均SARを電界強度、磁界強度に換算する場合、最悪条件以外は十分に安全側であることから、付加的な安全率を設けていない。

誘導電流(密度)を電界強度、磁界強度に換算する場合には、換算に不確定性があり、約2倍の安全率とした。

注意事項については、数値自体にある程度任意性があり、また換算の不確定性も少ないことから、換算値を直接用いた。

条件Gでは、測定点が十分に網羅されないことを考慮して、条件Pに対し、電力密度で5倍(電磁界強度では、2.23倍)の安全率とした。これは、電磁界強度が定在波などで、約2倍の数值の生じる可能性があることによる。

<参考文献>

- Am81 American National Standard Institute. 1981, "Recommended Practice for the Measurement of Hazardous Electromagnetic Fields - RF and Microwave" ANSI C95.5-1981, Institute of Electrical and Electronics Eng. Inc.
- Am82 American National Standards, 1982, Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 300kHz to 100GHz, Institute of Electrical and Electronics Eng. inc. , 345 East 47th Street, New York, NY 10047, ANSI. C95. 1.
- Au85 Australian Standard, 1985, "Maximum Exposure Level -- Radio Frequency Radiation -- 300kHz to 300GHz". AS 2772-1985, The Standards Association of Australia, Standards House, 80 Arthur St., North Sydney, N. S. W.
- Ba78a Balzano Q. , Garay O. and Steel F. R. , 1978a. "Heating of Biological Tissue in the Induction Field of VHF Portable Radio Transmitters ", IEEE Trans. Veh. Tech. , VT-27(2), 51-56.
- Ba78b Balzano Q. , Garay O. and Steel F. R. , 1978, " Energy Deposition in Simulated Human Operators of 800MHz Portable Transmitters", IEEE Trans. Veh. Tech., VT-27(4), 174-181.
- Be73 Becker C. M. , Malhotra I. V. , Hedley Whyte J. , 1973, " The Distribution of Radiofrequency Current and burns, " Anesthesiology, 38, 106-122.
- Be79 Bernhardt J. , 1979. " The Direct Influence of Electromagnetic Fields on Nerve and Muscle Cells of Man within the Frequency Range of 1Hz to 30MHz, " Rad. and Environm. Biophys. , 16, 309-323.
- Be85 Bernhardt, J. H. , " Evaluation of Human Exposure to Low Frequency Fields," in AGARD Lecture Series No. 138, pp. 8-1 to 8-18(1985)
- Ch81 Chatterjee I. , Hagmann M. J. and Gandhi O. P. , 1981, " An Empirical Relationship for Electromagnetic Energy Absorption in Man for Near-Field Exposure Conditions ", IEEE Trans. Microwave Theory & Tech. , MTT-29(11), 1235-1238.
- Ch85 Chatterjee I. , Gu Y. and Gandhi O. P., 1985, " Quantification of Electromagnetic Absorption in Humans from Body-Mounted Communication

Transceivers", IEEE Trans. Veh. Tech. , VT-34 (2), 55-62.

Ch86 Chatterjee I. , Wu D. and Gandhi O. P. , 1986, "Human body impedance and threshold currents for perception and pain for contact hazard analysis in the VLF-MF band , " IEEE Trans. Biomed. Eng. 33, 486-494.

Ch88 Chen J. Y. and Gandhi O.P. , 1988, "Thermal implication of high SARs in the body extremities at the ANSI recommended MF-VHF safety levels , " IEEE Trans. Biomed. Eng. 35,435-441.

Cl89 Cleveland R. F. and Athey T. W. . 1989, "Specific Absorption Rate(SAR) in Models of the Human Head Exposed to Hand-Held UHF Portable Radios, " Bioelectromagnetics 10, 173-186.

Du78 Durney C. H. , Johnson C. C. , Barber P. W. , Massoudi H. , Iskander M. F. , Lords J. 1. , Ryser D. K. , Allen S. J. and Michell J. C. , 1978, Radiofrequency Radiation Dosimetry Handbook (2nd edn.) , USAF School of Aerospace Medicine, Brooks Air Force Base , TX 78235, Report SAM-TR-78-22.

Du79 Durney C. H. , Iskander M. F. , Massoudi H. and Johnson C. C. , 1979, An Empirical Formula for BroadBand SAR Calculations of Prolate Spheroidal Models of Humans and Animals, " IEEE Trans. Microwave Theory & Tech. , MTT-27 (8), 758-763.

Eh79 Environmental Health Directorate Health Protection Branch of Ministry National Health and Welfare , 1979 , Safety Code-6, " Recommended Safety procedures for the Installation and Use of radiofrequency and Microwave Devices in the Frequency Range 10MHz - 300GHz"

El84 Elder J. A. and Cahill D. F. (eds.). 1984. Biological Effects of Radio frequency Radiation , U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park. NC27711, Document EPA-600/8-83-026F.

En86 U.S. Environmental Protection Agency, 1986. " Federal radiation protection Guidance ; proposed alternatives for controlling public exposure to radiofrequency radiation, "Federal Register. 51 (146). 27318-27339.

Ga82 Gandhi O. P. , 1982, "Radio-frequency Hazards in the VLF to MF Band, " Proc.IEEE 70, 1462-1469.

- Ga85 Gandhi O. P. , Chatterjee I. , Wu D and Gu Y. G. , 1985, "Likelihood of high rates of energy deposition in the human legs at the ANSI recommended 3-30MHz RF safety levels. " Proc. IEEE 73 , 1145-1147.
- Ga86a Gandhi O, P. . Chen J.T. and Riazi A. , 1986, "Currents induced in a human being for plane-wave exposure conditions 0-50MHz and for RF sealers, " IEEE Trans. Biomed. Eng. 33,757-767.
- Ga86b Gandhi O. P. and Riazi A. , 1986, " Absorption of millimeter waves by human beings and its biological implications , "IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 34, 228-235.
- Ga87 Gandhi O. P. . 1987, " The ANSI radiofrequency safety standard: Its rationale and some problems , " IEEE Eng. Med. & Biol. Mag. , Mar. 1987, 22-25.
- Go86 Gordon C. J. , Long M. D. and Fehlner K.S., 1986, " Temperature regulation in the unrestrained rabbit during exposure to 600MHz radiofrequency radiation,"Int. J. Radiat. Biol. 49, 987-997.
- Go87 Gordon C. J. , 1987, "Normalizing the thermal effects of radiofrequency radiation : Body mass versus total body surface area , " Bioelectromagnetics, 8, 111-118.
- Gu86 Guy A. W. , and Chou C. K. ,"Specific Absorption Rate of Energy in Man Models Exposed to Cellular VHF Mobile-Antenna Fields " IEEE Trans. Microwave Theory Tech. , vol. MTT-34, pp.671-680, 1986.
- Hi85b Hill D.A. and Walsh J.A., 1985, "Radiofrequency Current through the feet of a grounded man ", IEEE Trans. Electromagn, Compat., EMC-27, 18-23.
- In88 International Non-Ionizing Radiation Committee (IRPA) , 1988, "Guide-lines on limits of exposure to radio frequency electromagnetic fields in the frequency range from 100kHz to 300GHz, "Health Phys. 54, 115-123.
- Kr84 Kraszewski A. , Stuchly M. A. , Stuchly S. S. , Harisgrove G. , and Adamski D. , " Specific Absorption Rate Distribution in a Full - Scale Model of Human at 350MHz " IEEE Trans. Microwave Theory Tech. , vol. MTT-32, pp779-783, 1984.

- Ku85 Kues H. A. , Hirst L. w. , Luty G. A. , D' Anna S. A. and Dunkelberger G. R. , 1985, " Effects of 2.45GHz microwaves on primate corneal endothelium, "Bioelectromagnetics 6, 177-188
- Na86 National Radiological Protection Board. " Advice on the Protection of Workers and Members of the Public from the Possible Hazards of Electric and Magnetic Fields with Frequencies below 300GHz: A Consultative Document ", Chilton, Didcot, Oxon. OX11 0RQ, England.
- NC86 National Council on Radiation Protection and Measurements, 1986, " Biological Effects and Exposure Criteria for Radiofrequency Electromagnetic Fields, " NCRP Report No. 86 (Bethesda, MD:NCRP)
- Ro76 Rosenthal S. W. , Birenbaum L. , Kaplan I. T. , Metlay W. , Snyder W. Z. and Zaret M. II. , 1976, "Effects of 35 and 107GHz CW Microwaves on the Rabbit Eye ", Biological Effects of Electromagnetic Waves Vol. 1. Jonson C. C. & Shore M. L. , Eds., HEW Publication (FDA) 77- 8010, Rockvill, Maryland, 110-128.
- Ro81 Rogers S. J. , 1981, "Radiofrequency Burn Hazards in the MF I HF Band ", Aeromedical Review, Proceedings of a Workshop on the Protection of Personnel Against Radiofrequency Electromagnetic Radiation , Mitchell J. C. , Ed. , Report Review 3-81 (U. S. Air Force School of Aerospace Medicine, Brooks Air Force Base, Texas), 76-89.
- Sa88 齊藤正男, 1988, "電磁界の生体への影響", テレビジョン学会誌42(9), 945-950.
- Sc83 Schwan H. P. , 1983," Biophysics of the interaction of electromagnetic energy with cells and membranes , " Grandolfo M. , Michaelson S. M. . and Rindi A. (Eds), Biological Effects and Dosimetry of Nonionizing Radiation. 213-231.
- Si89 Sienkiewicz Z. J. . O'Hagan J. B. , Muirhead C. R. and Pearson A. J. , 1989. " Relationship Between Local Temperature and Heat Transfer Through the Hand and Wrist". Bioelectromagnetics 10. 77-84.
- St85a Stuchly S. S. , Kraszewski A. , Stuchly M. A. , Hartagrove G. and Adamski D. , 1985," Energy Deposition in a Model of Man in the near-field, " Bioelectromagnetics 6, 115-129
- St85b Stuchly M.A. , Kraszewski A. and Stuchly S. S. , 1985. "Exposure of human

models in the near- and far-field. A comparison. " IEEE Trans. Biomed. Eng., BME-32, 609-816

St86 Stuchly S. S. , Stuchly M.A. , Kraszewski A. , and Hartagrove G. , " Energy Deposition in a Model of Man : Frequency Effects, " IEEE Trans. Biomed. Eng., vol BME-33, pp702-711, 1986.

St87a Stuchly M. A. , 1987, " Proposed revision of the Canadian recommendations on radiofrequency-exposure protection. " Health Phys. , 53, 649-665.

St87b Stuchly S. S. . Stuchly M. A. , Kraszewski A. , Hartagrove G. , and Spiegel R. J. , "R, F. Energy Deposition in a Heterogeneous Model of Man : Far - Field Exposure " IEEE Trans, Biomed. Eng. , vol. BME-34,pp951-957

St87c Stuchly M. A. , Stuchly S. S. , Kraszewski A. , Hartagrove G. , and Spiegel R. J. , " R, F. Energy Deposition in a Heterogeneous Model of Man : Near-Field Exposure " IEEE Trans. Biomed. Eng. , vol.BME-34, pp944-950, 1987.

Su87 Sullivan D. M. , Gandhi O. P. , and Taflove A. , " Use of the Finite Difference Time - Domain Method for Calculating EM Absorption in Man Models " IEEE Trans. Biomed. Eng. vol. BME-34, N0.2, ppl48-157, 1987.

Wa81 Way W. I., Kritikos H. and Schwan H. P. , 1981. " Thermoregulatory Physiologic responses in the human body exposed to microwave radiation, "Bioelectromagnetics 2. 341-356.

WHO81 World Health Organization ,1981, Radiofrequency and Microwaves, Environmental Health Criteria 16 (Geneva:WHO)

別紙2 電磁界強度の測定距離

ANSI C95.1 Draft#4(1989)において、電磁波源、金属物体等の近傍物体とアンテナ系との間の測定距離は20cm以上と規定されている。ANSI C95.1がその根拠としているG.S.Smith(1979)論文では、近接物体（完全導体）に起因する電界検出用ダイポールプローブ（プローブ全長：2h、プローブ直径：2a）の測定誤差（ ΔV ）について考察している。

そこでは測定誤差 ΔV は

$$\Delta V = \left[\frac{(|V| - |V_0|)}{|V_0|} \right]$$

と定義されており、また、 V と V_0 はそれぞれ近接物体がある場合とない場合の電圧値に対応している。

また、近接物体とプローブ間の相互結合に起因する測定誤差は、以下の傾向を有することが指摘されている。

- ① プローブ素子の全長（2h）又は素子直径（2a）の減小に伴い、測定誤差は小さくなる。
- ② プローブに接続される検出器の負荷アドミタンスを Y_L 、プローブの自己アドミタンスを Y とすると、 Y_L が Y に比べ十分小さければ（ $|Y_L| \ll |Y|$ ）、その測定誤差は逆の条件を満たす場合（ $|Y_L| \gg |Y|$ ）に比べて小さくなる。
- ③ 絶縁体装荷ダイポールプローブにおいては、 $|Y_L| \ll |Y|$ となると、同一素子長を有する通常の絶縁体非装荷ダイポールプローブに比べ、その測定誤差が少ない。

更に、近接物体が存在する場合の測定誤差 ΔV の最悪値（近接物体が完全導体の場合）を、表7のように整理している。

この近接物体とダイポールプローブとの間の相互結合をできる限り回避することを考慮すると、測定距離は300MHz未満の周波数領域においては20cm以上、また、300MHz以上の周波数領域においては10cm以上とするのが望ましい。

表7 測定距離（ S/λ ）と測定誤差（ ΔV ）の関係

		近接物体とプローブ間の測定距離 [S/λ]		
		0.025	0.050	$0.1 \leq (S/\lambda)$
測定誤差 [%]	$Y_L = \infty$	20	6.0	2.0以下
	$Y_L = 0$	3.2	1.3	0.5以下
備考		$(2h/\lambda) = 0.2$ 、 $(2a/\lambda) = 0.01$ 2h：プローブ全長、2a：プローブ直径 Y_L ：検出器の負荷アドミタンス S：近接物体とプローブ間の距離 λ ：自由空間波長		

<参考文献>

- (1) Rudge, A.W. and R.M.Knox (1970), "Near field instrumentation", Technical report BRH/DEP 70-26, Bureau of Radiological Health, U.S. Public Health Service, July [NTIS order number PB192748]
- (2) Schaubert, D.H., D.M. Witters and W.A.Herman (1982), "Spatial distribution of

- microwave oven leaks.”, *Journal of Microwave Power*, Vol.17, No.2, p.113-119
- (3) Smith, G.S. (1979), “The electric-field probe near a material interface with applications to the probing of fields in biological bodies.” , *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MIT-27, No.3
- (4) ANSI, “American National Standard Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3kHz to 300GHz”

別紙3 推定法に関する事項

3.1 中波放送局

Hertz Vectorを主項とする中波放送局アンテナ近傍の電磁界を解析する方法において、

- ①アンテナ型式：線状、頂部無負荷、垂直接地単一アンテナ
- ②電流分布：正弦波で伝搬係数は自由空間と等しい
- ③給電方式：基部給電
- ④大地定数：完全導体
- ⑤測定点：大地面上

の条件の下では6個の界成分 ($E_z \cdot E_\rho \cdot E_\phi$) 及び ($H_z \cdot H_\rho \cdot H_\phi$) のうち、 $E_\rho \cdot E_\phi \cdot H_\rho \cdot H_\phi$ はいずれも0となり、残る E_z 、 H_z は次式により求められる。

$$E_z = \frac{60I_0}{r} \sqrt{\left(\frac{r_\lambda}{r_{2\lambda}}\right)^2 - 2\left(\frac{r_\lambda}{r_{2\lambda}}\right) \cdot \cos 2\pi H_\lambda \cdot \cos 2\pi(r_{2\lambda} - r_\lambda) + \cos^2 2\pi H_\lambda}$$

$$= \frac{60I_0}{r} A_E$$

$$H_\phi = \frac{60I_0}{120\pi \cdot r} \sqrt{1 - 2\cos 2\pi H_\lambda \cdot \cos 2\pi(r_{2\lambda} - r_\lambda) + \cos^2 2\pi H_\lambda} = \frac{60I_0}{120\pi \cdot r} A_H$$

ここで、 r_λ ：アンテナ基部からの距離 [m] $r_\lambda = \frac{r}{\lambda}$
 $r_{2\lambda}$ ：アンテナ先端からの距離 [m] $r_{2\lambda} = \frac{r_2}{\lambda}$
 H_λ ：アンテナ高 [m] $H_\lambda = \frac{H}{\lambda}$
 λ ：波長 [m] I_0 ：アンテナ電流の波腹値

次に、放送機の出力Pと微小接地アンテナに対する利得Gを使用すると、次式の推定式が得られる。

$$E_z = \frac{300\sqrt{P}}{r} \frac{\sqrt{G}}{1 - \cos 2\pi H_\lambda} \cdot A_E = \sqrt{P} \cdot f_M \cdot B_E$$

$$H_\phi = \frac{300\sqrt{P}}{120\pi \cdot r} \frac{\sqrt{G}}{1 - \cos 2\pi H} \cdot A_H = \frac{1}{120\pi} \sqrt{P} \cdot f_M \cdot B_M$$

ここで、 B_E ：電界強度係数 P：放送機出力 [kW]
 B_H ：磁界強度係数 G：アンテナ利得
 f_M ：周波数 (MHz)

なお、この推定式ではアンテナ高として頂部負荷等を含めた等価長を採用している。また、推定精度は±4dBが期待できる。

電界強度の距離特性を図10から図12までに、また、磁界強度の距離特性を図13から図15まで示す。

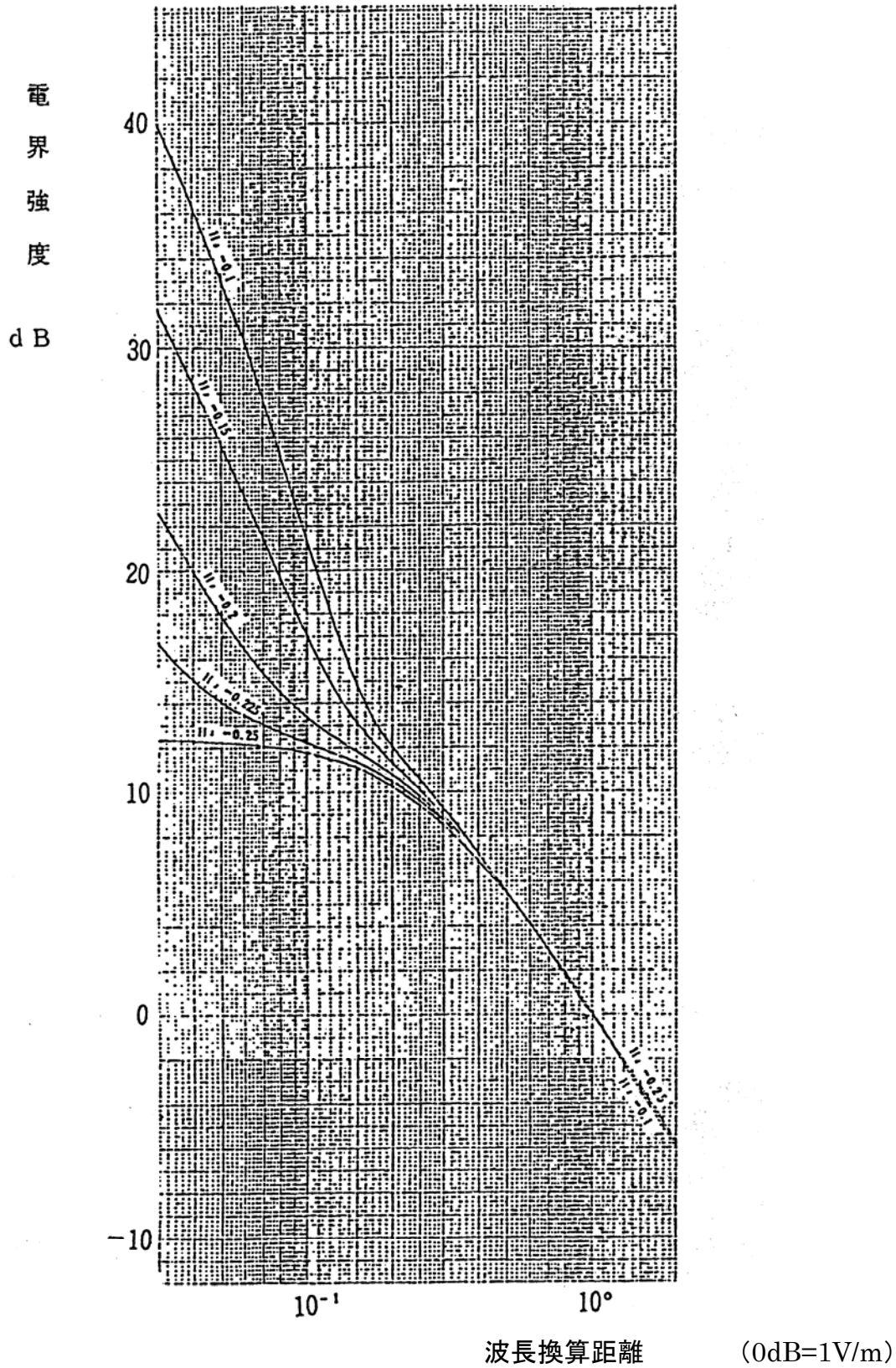
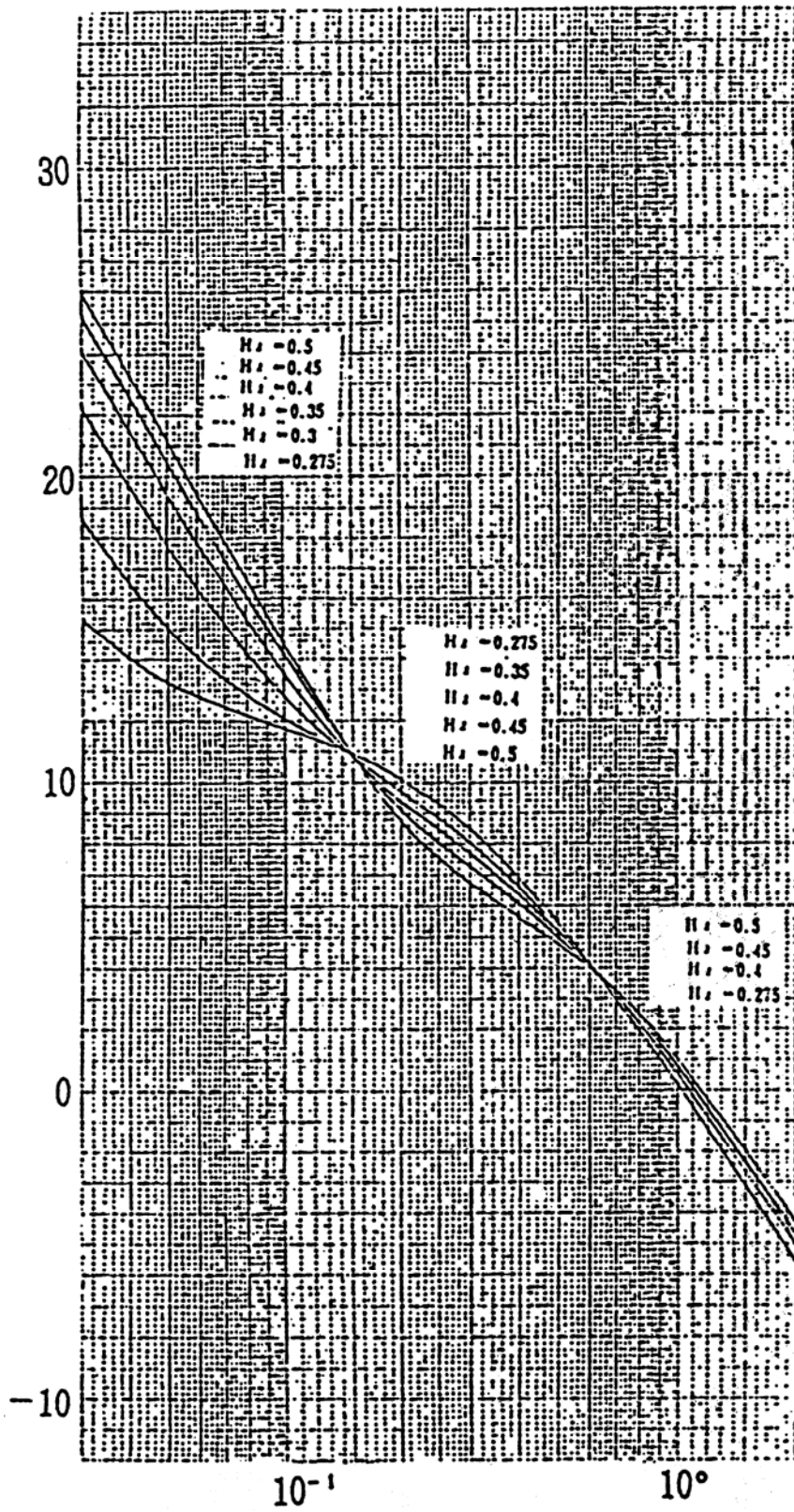


図10 電界強度距離特性 (送信電力1kW、周波数1MHz)

電
界
強
度

dB



波長換算距離

(0dB=1V/m)

图 1 1 電界強度距離特性 (送信電力1kW、周波数1MHz)

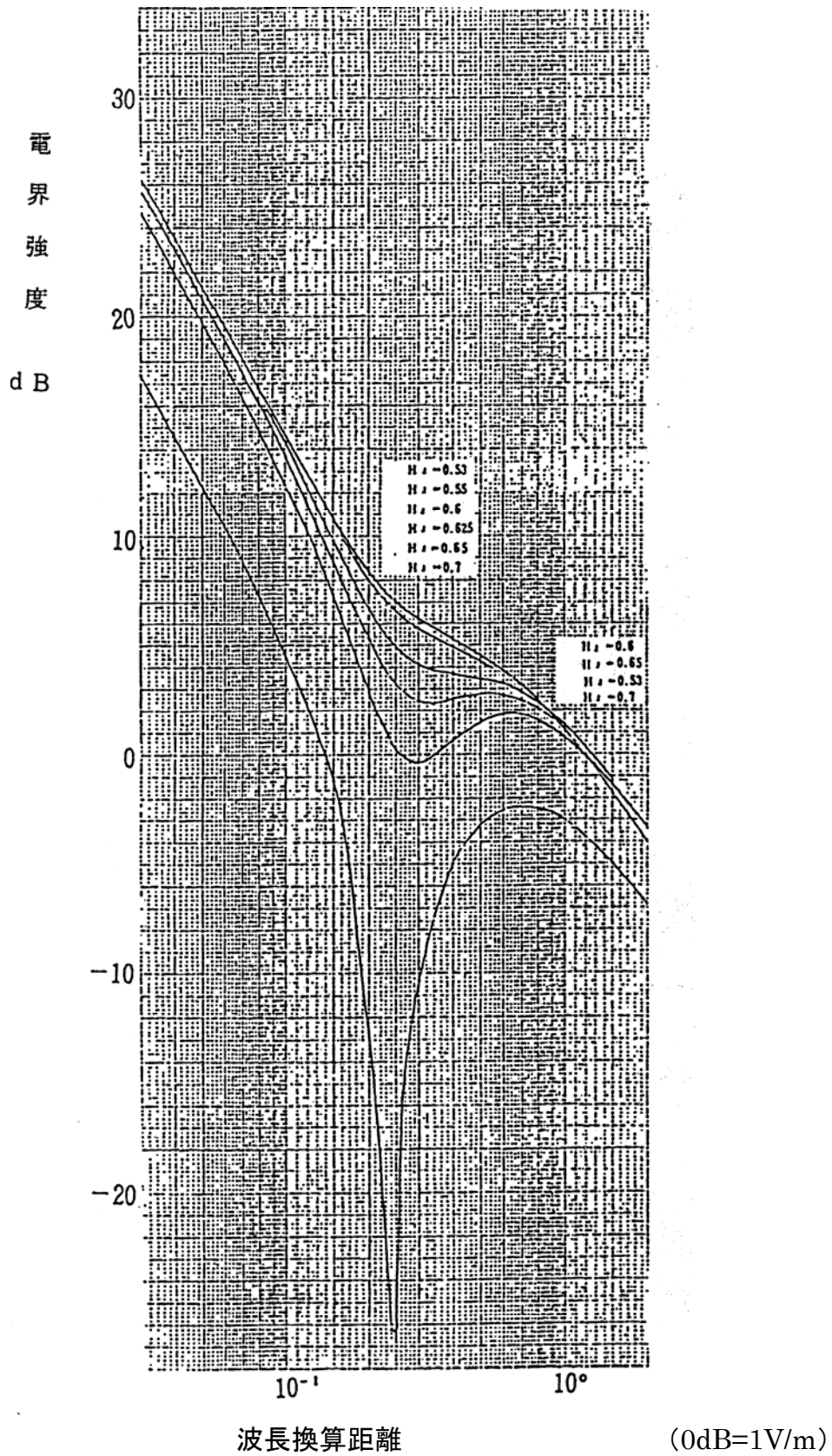


図 1 2 電界強度距離特性 (送信電力1kW、1MHz)

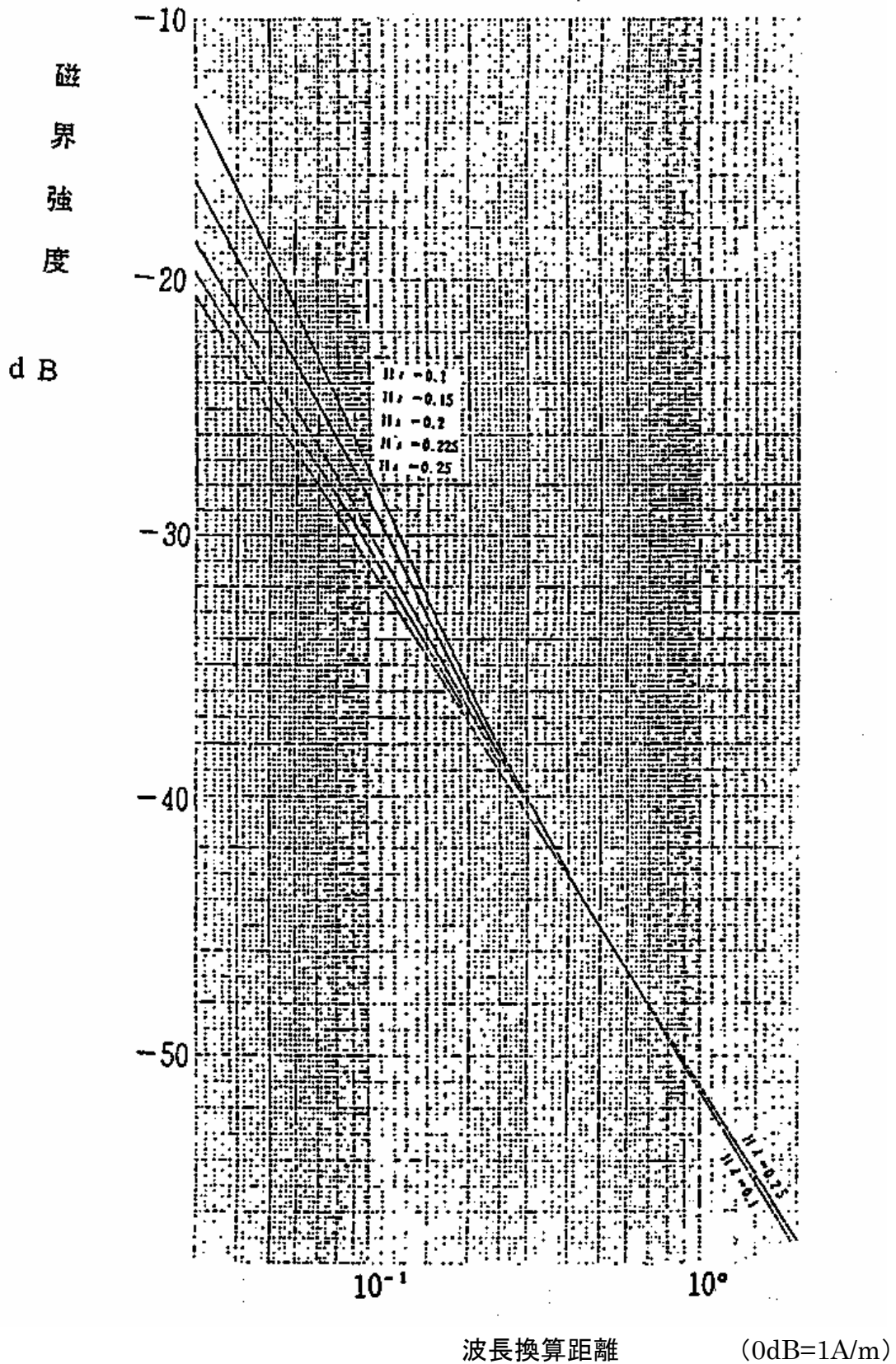


图 1 3 磁界強度距離特性 (送信電力1kW、周波数1MHz)

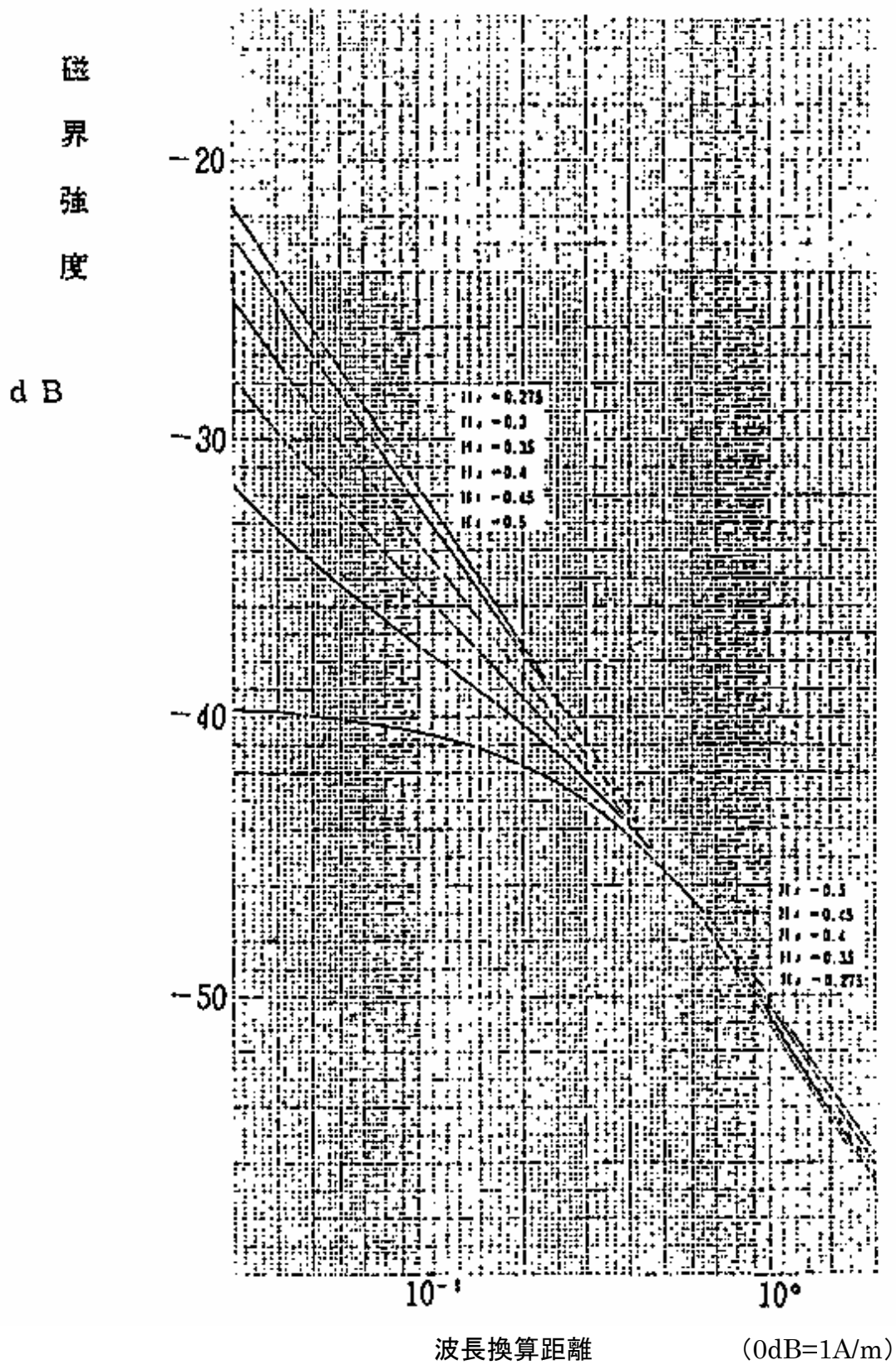


图 1 4 磁界強度距離特性 (送信電力1kW、周波数1MHz)

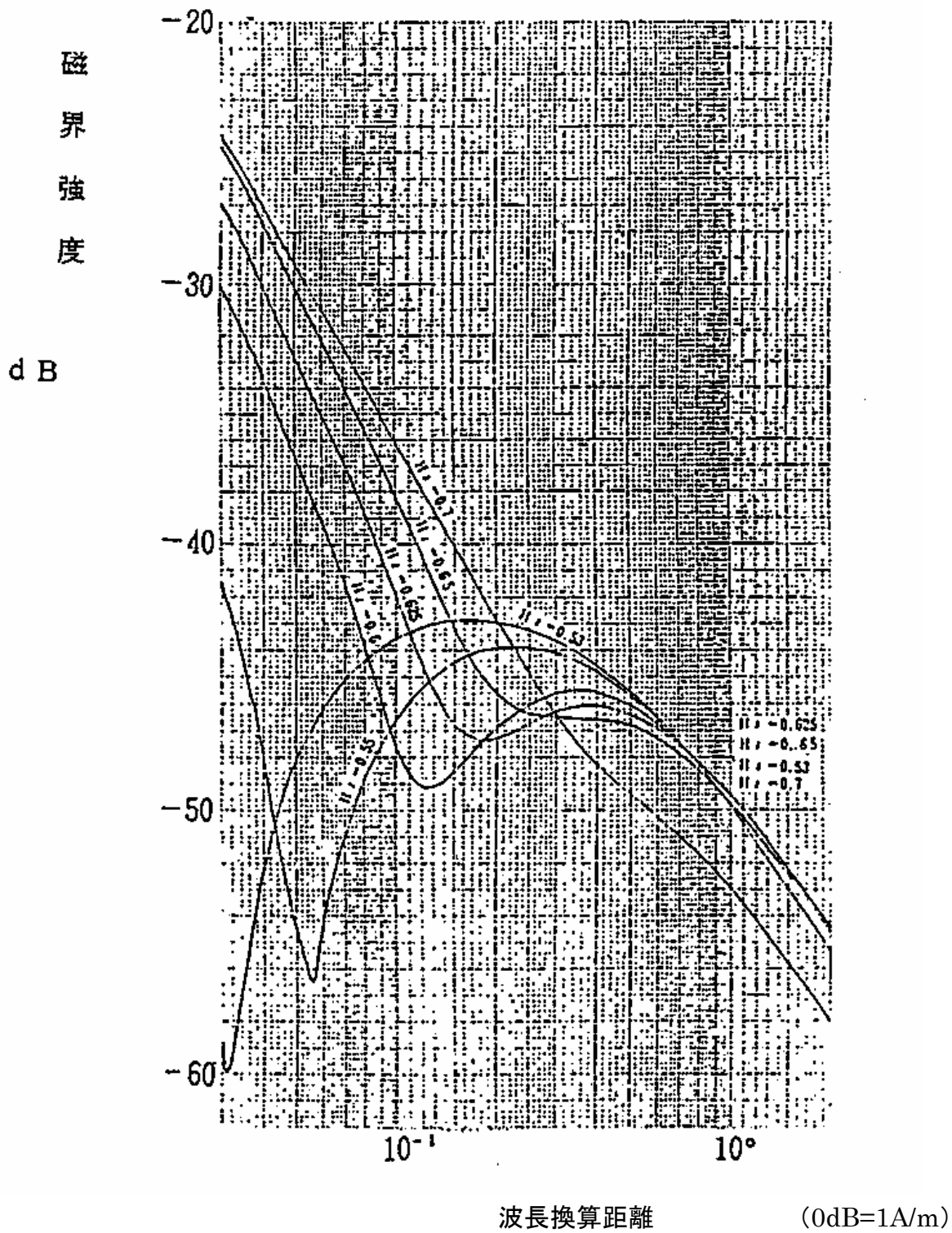


图 1 5 磁界強度距離特性 (送信電力1kW、周波数1MHz)

3.2 短波放送局

3.2.1 推定式

短波放送局の施設の近傍電磁界については、カーテンアンテナでの推定手法がある。この概要は以下のとおりである。

(1) アンテナ前方における電磁界強度

カーテンアンテナを図16のようにモデル化する。このとき、

- ・ 折り返し反射素子 (Z=600Ω) は半波長ダイポール
- ・ 素子には同位相等電力給電
- ・ 反射器と大地は完全導体

と仮定する。

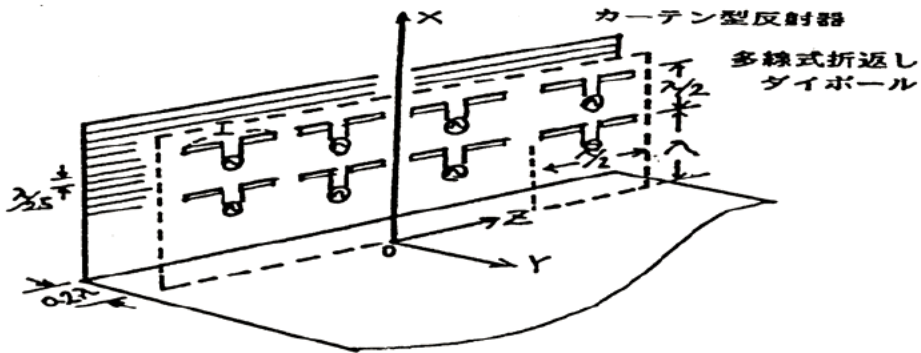


図16 カーテンアンテナのモデル

1個の半波長等価ダイポールによる電磁界は次式で与えられる。このときのパラメータは図17に示す。

$$E_z = -\frac{jkI}{4\pi\omega\epsilon} \left(\frac{e^{-jkr_1}}{r_1} + \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \right)$$

$$E_d = \frac{jI}{4\pi d} \left[\left(X + \frac{\lambda}{4} \right) \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} + \left(X - \frac{\lambda}{4} \right) \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \right]$$

$$H_\phi = \frac{jI}{4\pi d} (e^{-jkr_1} + e^{-jkr_2})$$

ここで、 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

λ : 使用波長、a : すだれの線間隔、d : 線の直径

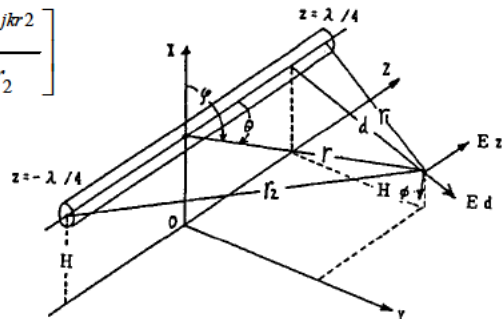


図17 ダイポール近傍界の座標系

なお、等価ダイポールの素子電流は、

$$I = 2 \times \sqrt{\frac{P}{Z}}$$

で与えられる。ここで、

$$P = \frac{P_0}{n} \quad P_0 : \text{空中線電力} \quad n : \text{折り返し素子数}$$

前方における電磁界は、それぞれの放射素子のほか、反射器、大地による鏡像素子による成分を合成することで求める。

(2) アンテナ後方での電磁界強度

無限に広いすだれの導線に平行に平面波の電界が到来すると仮定し、電界の振幅透過率Kに放射電界の水平成分を乗じて推定する。

一式のカーテンアンテナからの例が示されているが、実際にはその時点に運用されている放送スケジュールより、電力・周波数・使用されているアンテナを特定し、このとき運用されているアンテナについて検討する必要がある。

$$K = \frac{j \frac{2a}{\lambda} \ln \frac{a}{\pi d}}{1 + j \frac{2a}{\lambda} \ln \frac{a}{\pi d}}$$

<参考文献>

「短波国際放送送信所周辺における電磁環境の測定と推定（EMCJ-88-21）徳重ほか」

3.3 超短波（FM）放送局・テレビジョン（TV）放送局

これらの放送局のアンテナの多くは多段で用いられ、また、配列寸法も大きいため、周波数、アンテナの設置状況によっては鉄塔の直下付近は、近傍界となる場合がある。

アンテナの中心からの距離R、アンテナ部の寸法Lとすると、以下の条件で推定できる。

(1) $R \geq (2L^2/\lambda)$ の場合

$$E = 7m\sqrt{(EIRP)} \cdot F / R$$

F：対象地点における主ビームに対する電界強度の比（実質効率）

m：反射係数（通常は1.6。完全反射の場合は2）

なお、ERIP（実効輻射電力）は、次の値を適用する。

・FM放送：ERP

・TV放送： $k \times VERP + AERP$

ただし、k：変調信号によって異なる。通常は0.4であるが、カラーバースト変調時では0.35程度である。

VERP：映像実効輻射電力

AERP：音声実効輻射電力

また、放送局の推定地点におけるアンテナの水平指向特性G（推定対象地点におけるEIRPを求めるため）及びアンテナの垂直指向特性Fを把握しておく必要がある。

なお、遠方界となる場合は、電界Eと磁界Hの間には、 $E=120\pi H$ の関係式が成り立つので、E又はHのいずれかを知ることにより相互に換算できる

(2) $R < (2L^2/\lambda)$ の場合

アンテナを構成する各素子を1個のダイポールに置き換えて、各素子ごとに推定対象地点における電界強度を求め、それらを合成して電界強度を求める方法が適用できる。

$$E'_z = -j30I_1 \left(\frac{e^{-jk_{r1}}}{r_1} + \frac{e^{-jk_{r2}}}{r_2} - 2 \cos kl \frac{e^{-jk_{r3}}}{r_3} \right)$$

$$k = (2\pi)/\lambda$$

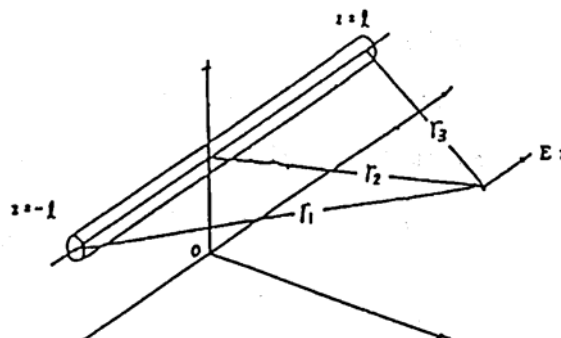
で表される。ここで、

$$I_1(z) = I_1 \sin k(l - |z|) \quad |z| \ll l$$

なお、 I_1 は素子数、電力配分比などから、それぞれの素子について求める。

Eは、各素子の寄与を合成することで求める。

$$E = \sum_{i=1}^N E_{zi}$$



[参考] 放送周波数帯域

		周波数範囲	電力範囲	使用されるアンテナ
中波放送		531～1602kHz	100W～500kW	基部絶縁形支線アンテナ等
短波放送	国内	3, 6, 9MHz	10kW, 50kW	ダビール、コナルモノール
	国際	5950～21750kHz	100kW, 300kW	カーテン形、ロケペリ形
FM放送		76～90MHz	1W～10kW	スーパーターンスタイル、スーパーゲイン
TV放送	VHF	90～108MHz 170～222MHz	0.1W～50kW "	反射板付ダビール、八木アンテナ
	UHF	470～770MHz	0.1W～50kW	双ループ、コーナレフレクタ、ヘリカル多素子リングアンテナ

<参考文献>

FCCの基準に基づく電波照射安全基準の評価方法 (OST Bulletin No.65 October 1985)

3.4 車載用及び携帯用無線機

(1) 推定式

実際にはここで対象とする無線機のアンテナは、自動車の屋根又はフェンダー及び無線機筐体のような限定された面積の導体上に設置されているが、推定式では、図18に示すように、無限長完全導体上に設置したホイップ・アンテナをモデルとした。

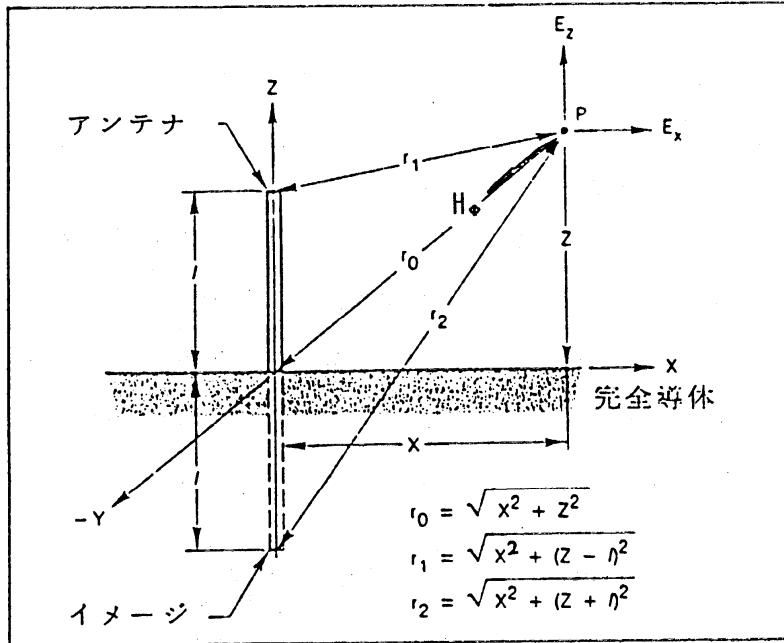


図18 Brown Analysisのためのモデル

$$E_z = -\frac{30I}{\sin kl} \left[\left(\frac{\sin kr_1}{r_1} + \frac{\sin kr_2}{r_2} - 2 \cos kl \frac{\sin kr_0}{r_0} \right) + j \left(\frac{\cos kr_1}{r_1} + \frac{\cos kr_2}{r_2} - 2 \cos kl \frac{\sin kr_0}{r_0} \right) \right] \quad [\text{V/m}]$$

$$E_x = \frac{30I}{x \sin kl} \left[\left(\frac{Z-l}{r_1} \sin kr_1 + \frac{Z+l}{r_2} \sin kr_2 - 2z \cos kl \frac{\sin kr_0}{r_0} \right) + j \left(\frac{Z-l}{r_1} \cos kr_1 + \frac{Z+l}{r_2} \cos kr_2 - 2z \cos kl \frac{\cos kr_0}{r_0} \right) \right] \quad [\text{V/m}]$$

$$H_\phi = \frac{I}{4\pi \sin kl} \left[(\sin kr_1 + \sin kr_2 - 2 \cos kl \sin kr_0) + j(\cos kr_1 + \cos kr_2 - 2 \cos kl \cos kr_0) \right] \quad [\text{A/m}]$$

ここで、アンテナは整合されているものとする、 $I=P/Z$ [A]

また、 Z_a : アンテナ・インピーダンス [Ω]

$k=2\pi/\lambda$

P : 送信機出力電力 [W]

(2) 適用範囲

現在、推定式を検証するための測定値が少なく、350MHz、835MHz及び900MHzの周波数で使用されている $\lambda/4$ ホイップ・アンテナ及び $\lambda/2$ スリーブ・アンテナについてのみ比較確認を行った。

また、車載用無線機で運転者が車内でさらされる電磁界強度及び車体の陰における電磁界強度は、伝搬モードが複雑となるために推定式では考慮されていない。

推定値と実測値を比較することによって、無線機の $\lambda/4$ ホイップ・アンテナ又は $\lambda/2$ スリーブ・アンテナから数波長分の一の距離以遠での電界強度を推定することができる。

(3) 計算値と測定値の比較

アンテナ長を $\lambda/4$ として、この推定式を用いて、それぞれアマチュア無線機及びパーソナル無線業務で使用される周波数に近い150MHz、400MHz及び800MHzについてグラウンド・プレーンから2cm又は4cmの高さ及びグラウンド・プレーン上における電界強度距離特性を計算した。なお、電界強度値は出力電力1W当たりの値とし、 $\sqrt{E_z^2 + E_x^2}$ を算出し、その結果を図19～図21に示す。この場合、グラウンド・プレーン上でのX成分電界強度は0となる。

(1)の推定式から求めた電界強度距離特性を測定値と比較するために、参考文献(1)及び参考文献(2)によって報告された測定データを引用した。ここでも電界強度値はすべて出力電力1W当たりの値とした。

参考文献(1) より：

図22 350MHz車載用無線機 ($\lambda/4$ ホイップ・アンテナ)

図23 900MHz携帯用無線機 ($\lambda/2$ スリーブ・アンテナ)

参考文献(2) より：

自動車の屋根及びトランクに取り付けた835MHz用アンテナからの電力密度を、車内及び車外でアンテナからの距離を変えて測定した結果が報告されている。これらの結果を簡便なために自由空間インピーダンスを用いて相対電界強度に変換して比較した。

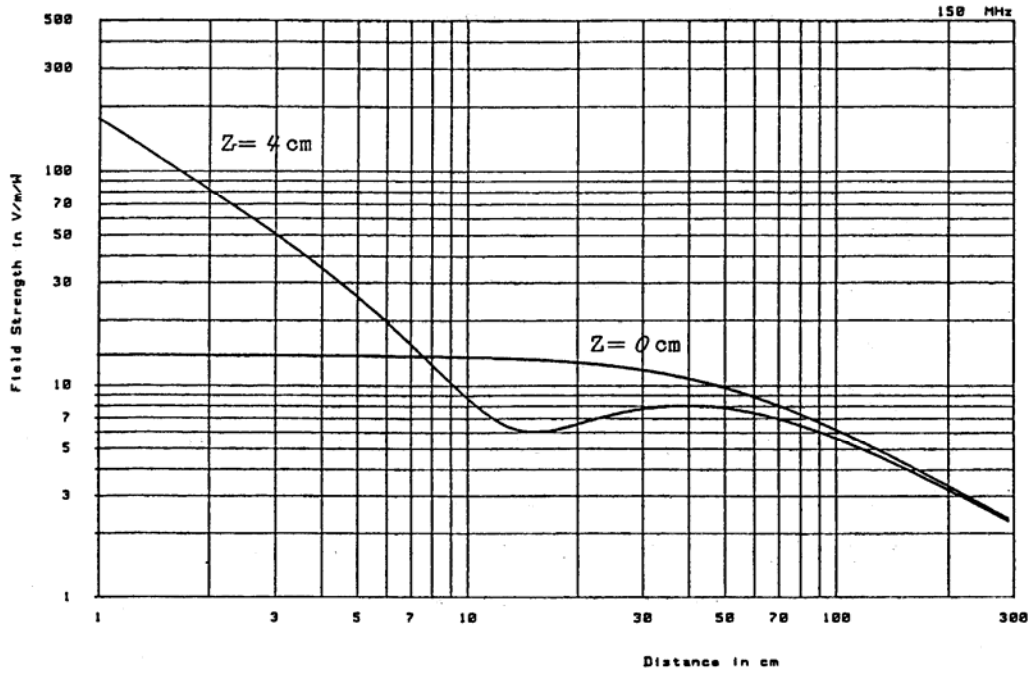


图 19 電界強度距離特性

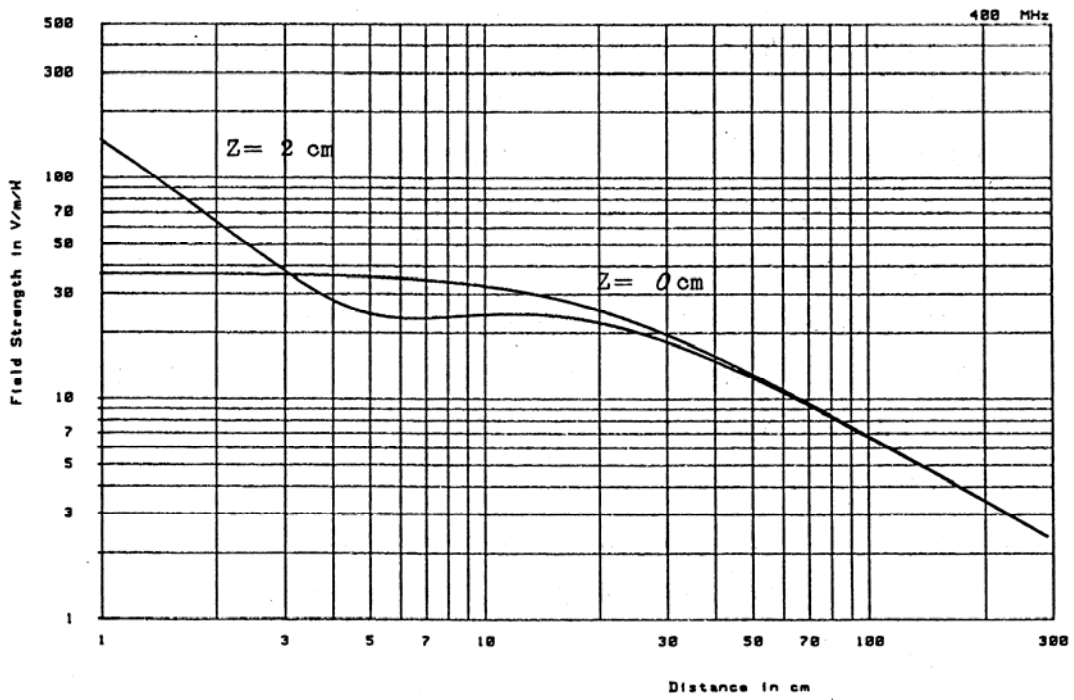


图 20 電界強度距離特性

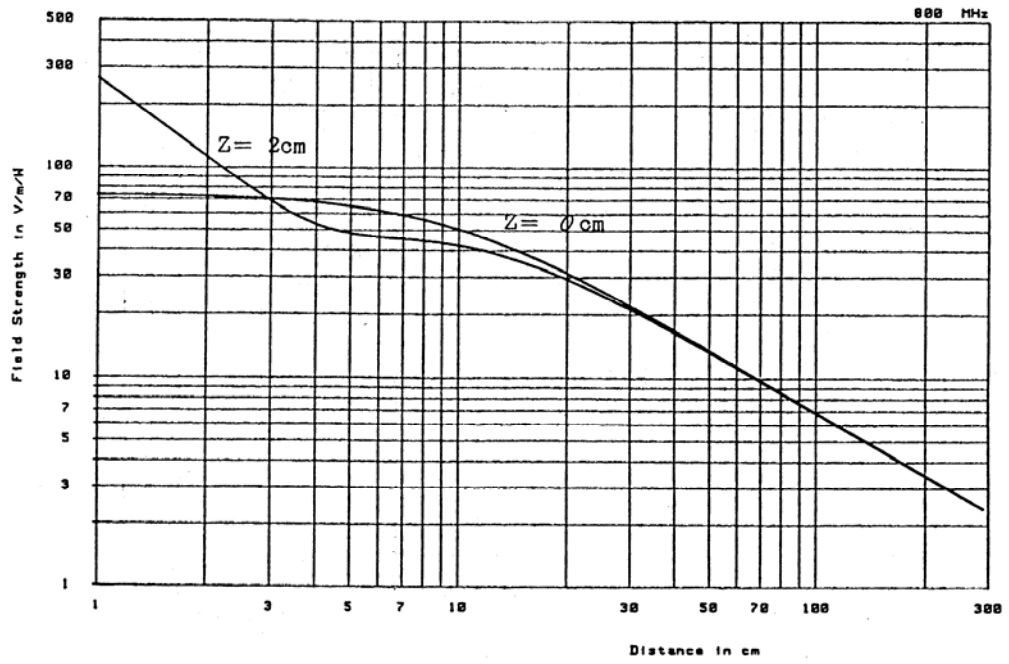


图 2 1 電界強度距離特性

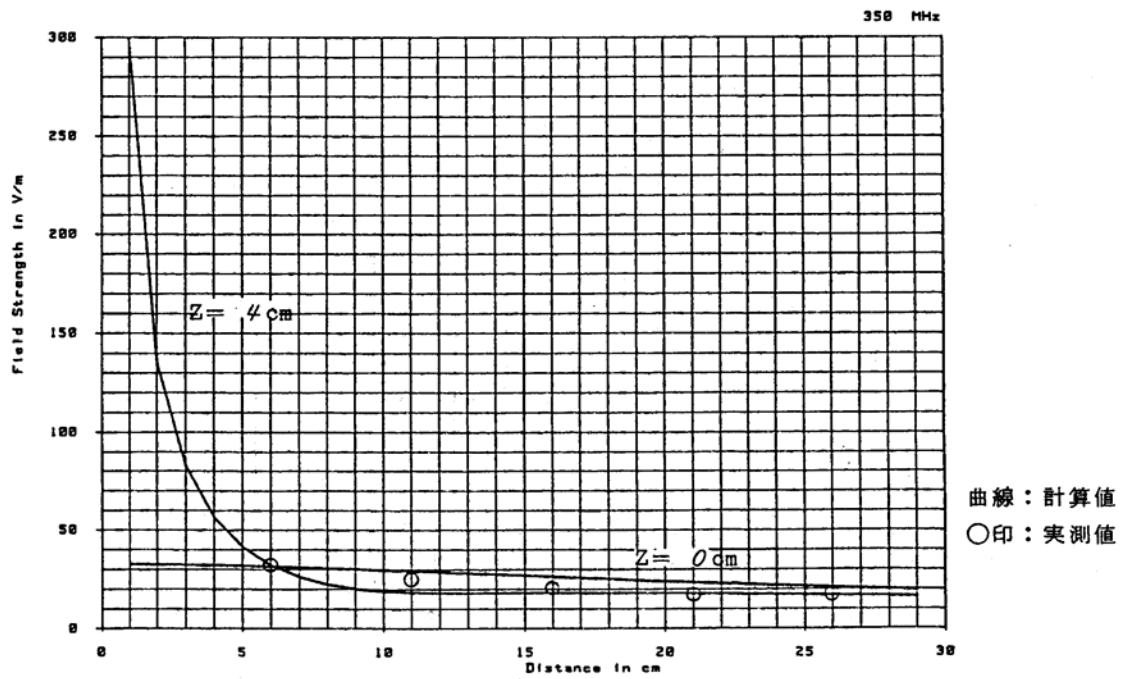


图 2 2 電界強度距離特性

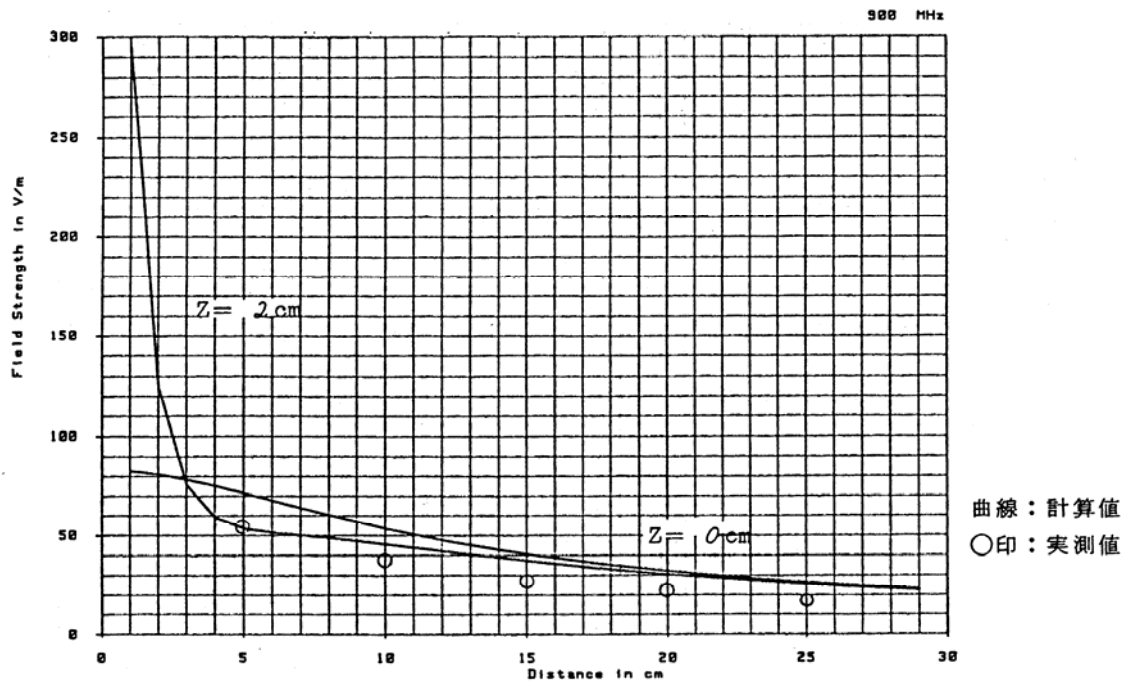


図 2 3 電界強度距離特性

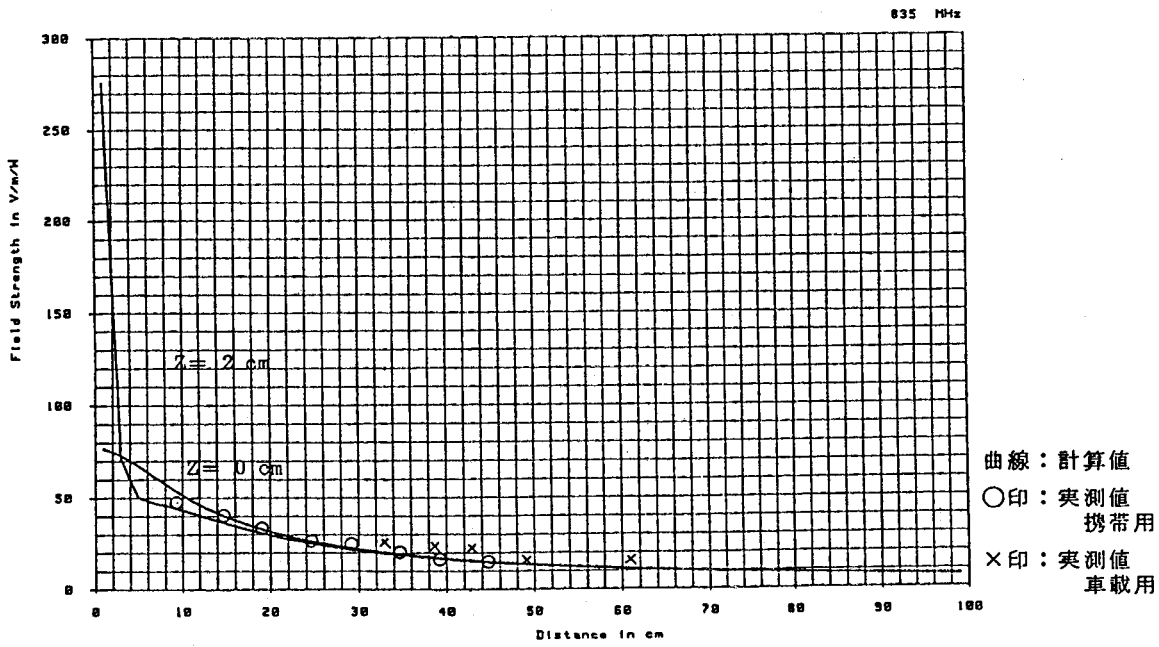


図 2 4 電界強度距離特性

図 2 4 車の屋根に取り付けた $\lambda/2$ スリーブ・アンテナ（×印）
車のトランクに取り付けた $\lambda/2$ スリーブ・アンテナ（○印）

実測データ数が少ないために、これらの結果から一般的な推定精度を考察することは困難であるが、上記の推定式を用いることによって、車載用無線機及び携帯用無線機からの電界強度を約 ± 3 dBの誤差を含んで推定することができる。さらに推定精度を高めるためには、無限導体上の計算モデルの指向性と実際の有限導体の場合の指向特性の補正及びアンテナ利得の補正が必要となる。

<参考文献>

- (1) 上村、山中、上瀧、「携帯無線機の近傍における人体頭部の電磁界曝露について」
1989 International Symposium on Electromagnetic Compatibility
- (2) W.Guy and Chung-Kwang Chou, “Specific Absorption Rates of Energy in Man Models Exposed to Cellular UHF Mobile-Antenna Fields”, IEEE Trans. MTT34 No.6,1986
- (3) Edwin L.Bronaugh, William S.Lamdin “Electromagnetic Interference Test Methodology and Procedure”, A Handbook Series on Electromagnetic Interference and Compatibility
- (4) Donald L.Lamdin “An Investigation of Energy Desities in the Vicinities with Mobile Communications Equipment and Near a Hand-Held Walkie Talkie”, March 1979, PB-298 251
- (5) ブライトン会議資料、1989 IEC 12F(Co)154, “Technical Report – Guide for Safe Handing and Operation of Mobile Radio Equipment”

3.5 地球局

衛星通信回線などの地球局施設及びその周辺領域における電磁環境の推定には、開口面アンテナの放射特性を解析する方法が有効である。その開口面アンテナの放射電磁波界は図25に示すように3つの領域に区分され、それぞれの領域における最大電力密度は、次式により推定される。

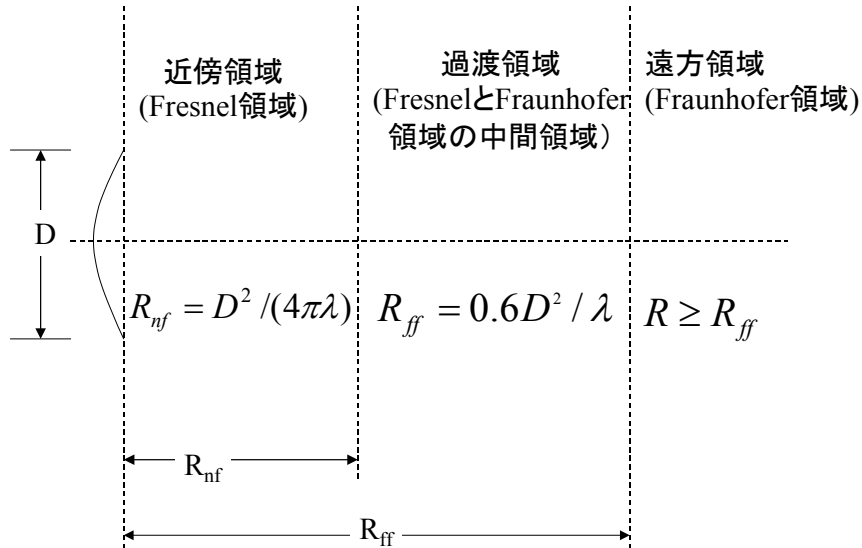


図25 開口面アンテナの放射領域区分

(1) アンテナの近傍領域 (Fresnel領域)

- ・ この領域での最大電力密度 S_{nf} は

$$S_{nf} = 16\eta P / (\pi D^2) \quad [\text{W/m}^2]$$

ここに、近傍領域とみなせる範囲 R_{nf} は、

$$R_{nf} = D^2 / (4\pi\lambda) \quad [\text{m}]$$

(2) アンテナの遠方領域 (Fraunhofer領域)

- ・ この領域での最大電力密度 S_{ff} は、

$$S_{ff} = 2.47 S_{nf} (R / R_{nf})^{-2} = PG / (4\pi R^2) \quad [\text{W/m}^2]$$

ここに、遠方領域と見なせる範囲 R_{ff} は、

$$R_{ff} = 0.6 D^2 / \lambda \quad [\text{m}]$$

(3) アンテナの過渡領域 (FresnelとFraunhofer領域の中間領域)

- ・ この領域での最大電力密度 S_{if} は、

$$S_{if} = S_{nf} (R / R_{nf})^{-1} \quad [\text{W/m}^2]$$

(ただし、 $R_{nf} \leq R < R_{ff}$)

ここに、

- S_{nf} : 近傍領域での最大電力密度
- η : 開口効率 (通常、 $0.5 < \eta < 0.75$)
- P : アンテナへの給電電力 [W]

D : アンテナ開口径 [m]
 R : アンテナからの距離 [m]
 G : アンテナの絶対利得
 測定結果の一例を表 8 に示す。

<参考資料>

- (1) The Radiofrequency Radiation Environment : Environmental Exposure Levels and RF Radiation Limiting Source, EPA#520, July 1986
- (2) W.W.Munford : Some Technical Aspects of Microwave Radiation Hazards, PROCEEDING OF THE IRE, p.427, February 1961

表 8 推定結果の一例

Diameter (ft)	(m)	Frequency (GHz)	λ (cm)	Gain (dBi)	P (W)	R_{nf} (m)	R_{ff} (m)	η	R_{nf} ($\mu W/cm^2$)
60	18.3	8.15	3.68	60.8	4×10^3	2.27×10^3	5.45×10^3	0.5	3.0×10^3
210	64.0	2.38	12.6	61.9	225×10^3	8.13×10^3	1.95×10^4	0.61	1.7×10^4
105	32.0	6.18	4.86	64.0	5×10^3	5.27×10^3	1.26×10^4	0.57	1.46×10^3
32.8	10	5.96	5.03	53.6	2×10^2	4.97×10^2	1.19×10^3	0.59	6.0×10^2

3.6 レーダー施設

推定式とその条件

平均電力 $P_{av}(W)$ は、レーダ設備のピーク出力（電力） $P_p(W)$ が分かれば、パルス波の周期 $T(S)$ とパルス幅 $\Delta t(S)$ の比（デューティサイクル）から、次式で求められる。

$$P_{av} = P_p \times (\Delta t / T) \quad [W]$$

次に、この P_{av} とアンテナ利得 G 、パルス波の波長 $\lambda [m]$ から、アンテナからの距離 $R(m)$ の点における平均電力密度 $S(W/m^2)$ の推定値を算出する。推定式は距離 R の地点から近傍域（フレネル領域）、過渡領域、遠方界領域（フランフォーファ領域）のいずれにあるかにより異なり、各領域の判別式とそれぞれに対する推定式は以下のとおりである。ただし、ここで定める領域の判別式は定義にあるものとは異なり、あくまでも以下の推定式を用いるときのみのものである。

- ・近傍界領域の平均電力密度（ S_{nf} ）

$$S_{nf} = 12.6 P_{av} / G \lambda^2 \quad [W/m^2]$$

$$\text{ただし、} R \leq 5.07 \times 10^{-2} G \lambda \quad [m]$$

- ・過渡領域の平均電力密度（ S_{if} ）

$$S_{if} = S_{nf} (R / R_{nf})^{-1} \quad [W/m^2]$$

$$\text{ただし、} 5.07 \times 10^{-2} G \lambda \leq R \leq 1.22 \times 10^{-1} G \lambda \quad [m]$$

- ・遠方領域の平均電力密度（ S_{ff} ）

$$S_{ff} = P_{av} G / 4\pi R^2 \quad [W/m^2]$$

$$\text{ただし、} R \geq 1.22 \times 10^{-1} G \lambda$$

ここで、 R_{nf} は近傍界とみなすべき範囲を示す距離であり、また、推定式ではアンテナの開口効率 η を0.5と仮定している。

次に、このままではレーダーの回転又は往復等の動作が考慮されていないので、推定値は真値よりも過大なものとなる。これを補正するための係数（ f ）を乗じてやる。

$$S' = S \cdot f$$

補正係数 f は近傍界、遠方界の別に次式により与える。

$$\text{近傍界の場合：} f_{nf} = L / R \theta_m$$

$$\text{遠方界の場合：} f_{ff} = \theta_{half} / \theta_m$$

ただし、 $L (m)$ はアンテナ実長、 $\theta (rad)$ は単位時間当たりの走査角度及び θ_{half} はアンテナ半値幅である

この考え方並びに推定式は、主に大型のレーダーで、ビームのタイプもペンシルビームのものを対象としている。

レーダー施設の場合は、一般に設置場所が山頂や空港・港湾といった日常生活には関係の薄い環境であり、施設周辺への立ち入り等も規制されている場合が多いために、施設近傍での電磁界環境が問題となることは稀であると考えられる。しかし、なかには漁船に搭載されているレーダーのように、設備と作業場が近接している状態もあり、このようなときには近傍界での推定式の誤差の程度が問題となる。

上記の推定式による値及び実測値との比較を表9に示すが、一部の値は他の推定法によるものと思われる。この推定式では電磁界環境の評価が大きめに見積もられている。この推定値が管理指針値を下回る場合は問題ないが、指針値を大きく超える場合はアンテナパターンを用いてさらに検討を行う必要がある。

漁船等に多いファンビームレーダーは、水平面内の指向性に比べて垂直面内の指向性を緩やかにするためにアンテナの形状が非対称である。このような場合にも、近傍界における補正係数 f_{nf} によって推定値をより見積もるおそれがあると考えられる。

<参考文献>

- (1) The Radiofrequency Radiation Environment : Environmental Exposure Levels and RF Radiation Limiting Sources (IPA:1988)
- (2) W.W.Munford : Technical Aspect of Microwave Radiation Hazards (PROCEEDINGS OF THE IRE,1961 Feb.)
- (3) 社団法人 電子通信情報学会監修 「レーダー技術」 (コロナ社)

表9 追跡・管制レーダーの電磁界環境（電力密度）の推定と実測

システム名	アンテナ寸法 (ft)	周波数 (GHz)	平均電力 (kW)	電力密度 (mW/cm ²)	推定距離 (m)	測定距離 (m)	スキャンニング 減衰係数
TPS-10	4×15	1.3	0.492	10	10 (14)	7.6	1.1×10 ⁻²
M-33Acq.	3.92×14.33	3.1-3.5	1.39	6	65 (79.7)	61	1×10 ⁻²
M33 C-band	8 (diam.)	5.45-5.82	3.8×10 ⁻²	0.2 (0.32)	—	95	—
M-33 X-band	8 (diam.)	8.50-9.60	4.8×10 ⁻²	0.65 (0.54)	—	95	—
SCR-584	8 (diam.)	2.70-2.90	2.9×10 ⁻²	0.65 (0.46)	—	81	—

() : 本文推定式による値

3.7 高周波利用設備

高周波利用設備の推定は、設備の多様性と作業性から推定モデルの策定は各設備ごとに対応する必要がある。

3.7.1 工業加熱設備

(1) 誘導加熱設備

金属又は半導体内に流れる電流によって発生するジュール熱によって加熱する設備であり、高周波利用の中で比較的低い周波数（数十kHz～数百kHz）を使用する大電力（数kW～数千kW）の設備である。これらの設備は次の特徴を持つ。

- ① 一般人が設備周辺へ立ち入ることはほとんどなく。管理条件が設定されている条件Pの設備と考える。
- ② 作業場所は装置から数m以内が多い。この領域における詳細な推定を行うに当たっては、設備周辺の電磁界ベクトル分布を知る必要がある。
- ③ 電磁界強度は利用周波数が低く、かつ、作業場所が装置の近傍であるため設備周辺では $E=120\pi H$ の関係が成立しない。電磁波は主として加熱部の加熱コイル又は電極から発生するが、その形状は設備及び用途に応じてさまざまである。また、設備周辺の電磁環境は周波数・電力の大きさ・被加熱剤の状態等の関数となり複雑さを増す。

(2) 誘導加熱設備

非金属物体（ビニール、木材など）が有する誘電損失を利用して加熱する設備である。誘電加熱設備に比べ利用電力は小さいが高い周波数（数百kHz～数十MHz）が用意される。ウェルダ―や接着設備などでは、作業者が電極近傍に位置して常に電磁環境にさらされているケースが多い。この場合、設備としては能率的作業性の確保の点から電極など電磁波源の遮蔽が極めて難しい。より正確な界強度の推定が望まれる。

(3) 推定に必要なパラメータ

推定に当たっては次の条件を考慮する必要がある。

- ア 使用している周波数と出力電力の大きさ
- イ 運転条件（連続運転か間欠運転か、また、その運転周期など）
- ウ 作業位置
- エ 作業者の接地条件
- オ 周囲環境（設備の遮蔽、接地状態・電磁波反射の有無・他設備との距離等

(4) 推定式

設備の種類に応じて、微少ダイポール（図26）あるいは微少ループ（図27）を放射モデル化して、それぞれ次に示す計算・推定する。線電流誘導加熱設備、開口部を持つ誘導加熱設備は微少ダイポールモデルを、円筒巻コイルによる誘導加熱設備は微少ループモデルを適用する。ただし、両設備とも給電部は、その形状によっていずれかのモデルを用いて加算する。

$$E_r = \frac{60Il}{k} \left[\frac{k}{r^2} + j \left(-\frac{1}{r^3} \right) \right] e^{-jkr} \cos \theta$$

$$E_\theta = \frac{30Il}{k} \left[\frac{k}{r^2} + j \left(-\frac{1}{r^3} + \frac{k^2}{r} \right) \right] e^{-jkr} \sin \theta$$

$$H_\phi = \frac{Il}{4\pi} \left(\frac{1}{r^2} + j \frac{k}{r} \right) e^{-jkr} \sin \theta$$

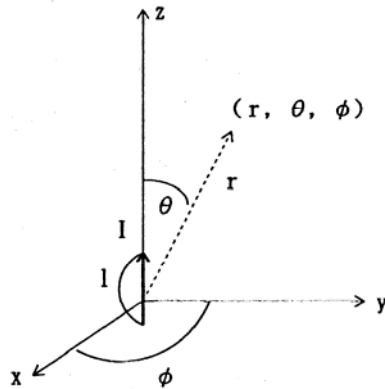


図26 微少ダイポールモデルと推定式

$$H_r = \frac{a^2 I}{2} \left(\frac{1}{r^3} + j \frac{k}{r^2} \right) e^{-jkr} \cos \theta$$

$$H_\theta = \frac{a^2 I}{4} \left[\left(\frac{1}{r^3} - \frac{k^2}{r} \right) + j \frac{k}{r^2} \right] e^{-jkr} \sin \theta$$

$$E_\phi = 30\pi a^2 I k \left[\frac{k}{r} + j \left(-\frac{1}{r^2} \right) \right] e^{-jkr} \sin \theta$$

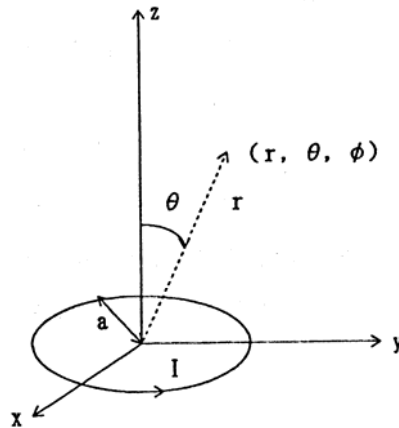


図27 微少ループモデルと推定式

ここで、I：ループ回路全電流 [A]、r：波源からの距離 [m]、
 a：ループ半径 [m]、l：電源の長さ、等価ギャップ [m]、
 k：波長=2π/λ、λ：波長 [m]

円筒巻コイル式誘導加熱設備にて、コイル巻回数n、コイル電流i_cの場合は次のとおりとする。

ループ回路全電流 I = n · i_c [A]

(5) 推定精度

加熱コイル、電極部及び給電部形状と寸法及び電流を決め、近傍電磁界推定には空間の適当な点での電界と磁界との比を実測値と理論値が一致するように決める（波動インピーダンス補正）。

上記の条件を入れることで実測値と推定値は概ね一致する。

高周波ウェルダの例では、テーブルの上下で対称になってしまうこと、金属部分による電気力線の乱れがないことが実際とは異なるが、作業者の中心位置ではあまり問題ないと考える。使用環境が著しく異ならない限り、足踏み式の高周波ウェルダのほとんどに適用できる。ただし、電極のごく近傍では微少ダイポール近似が成り立たず、精度は悪くなると予想される。

3.7.2 その他の設備

(1) 設備の概要と推定方法

① 高周波マシン

高周波の出力は0.5kW～1kWで、使用する周波数は40～60MHzである。装置の構造は工業用非金属高周波ウェルダと同じであり、出力が違うのみである。したがって、推定方法もそれに準拠して行うことができる。

② 電磁調理器

出力が数kW以下で、使用する周波数も100kHz以下と小さく、分単位の使用である。設備構成上から、基本的には工業用誘導加熱装置と同じ推定法が適用できる。

③ 超音波加湿器・超音波洗浄器

3.7.2(1)②超音波治療器に準じて行うことができる。

3.7.3 実測との比較

(1) ビニール加工用高周波ウェルダ（足踏み式 3kW-40MHzの事例）

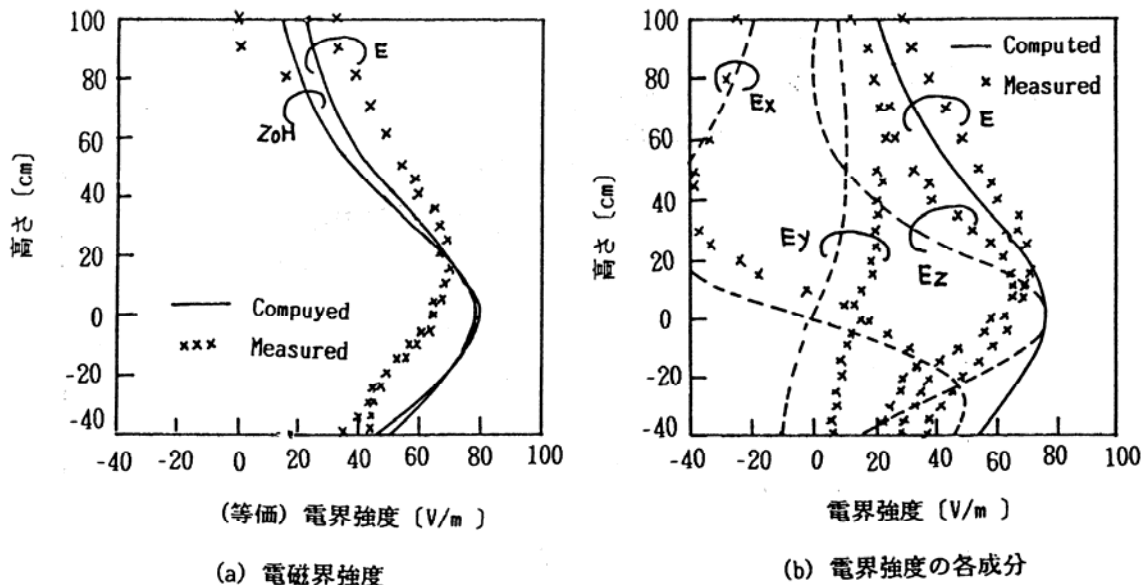


図 28 電磁界分布の実測値と推定値の比較

(2) 円筒巻コイル式誘導加熱設備

表 10 供試誘導加熱設備例

実測例	1	2	3
用途	鉄加熱	鉄加熱	鉄棒加熱
電源容量 kW	40	4.75	75
周波数 kHz	106.4	26.1	10
加熱コイル寸法 mm	φ 135-L1200	φ 100-L1200	φ 210-L1275
コイル巻回数 ターン	13	14	13
コイル電流 A	480	100	490
測定器	ループアンテナ型電界強度計		

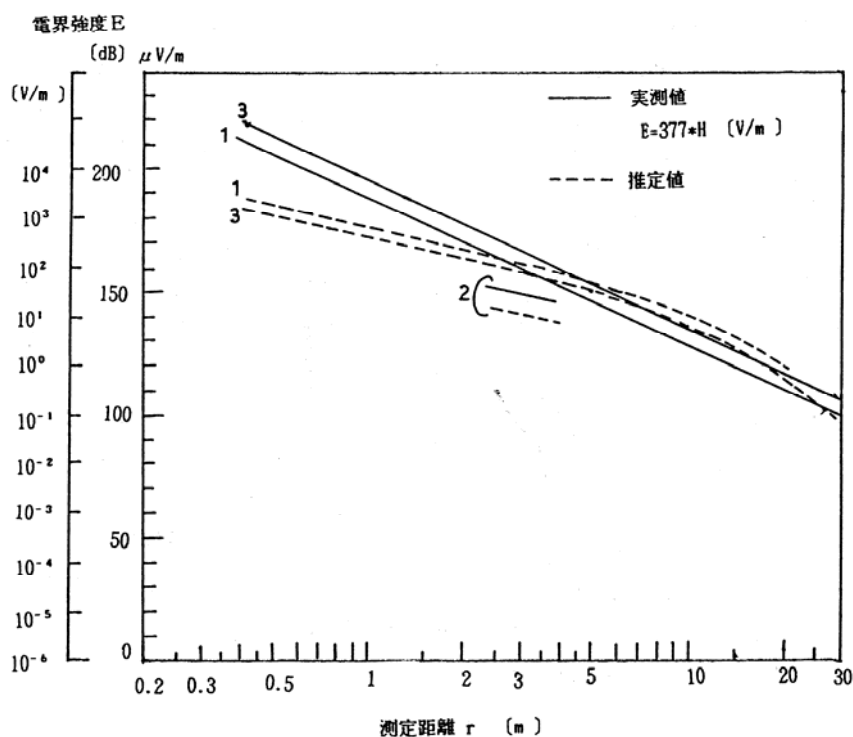


図 29 測定距離による実測値と推定値の比較

<参考文献>

- (1) 上村、徳重、“高周波利用設備近傍の電磁界分布測定法とその応用”、郵政省通信総合研究所研究発表会予稿、昭63. 10
- (2) Chatterjee I., Wu D. And Gandhi O.P, “Human body impedance and threshold currents for perception and pain for Contact Hazard Analysis in the VLF-MF Band,” IEEE Trans. Biomed. Eng.33,p486-494, 1986
- (3) AH-6, “超音波応用機器の漏洩電界強度測定法”、日本電子機器工業会規格
- (4) JIS C9250, “電子レンジ”