

IEC 61000-4-39 の概要 — 近傍での放射電磁界に対する イミュニティ試験の方法

株式会社 e・オータマ 佐藤智典

2024 年 11 月 22 日

目次

1	概要	1
1.1	背景	1
2	一般	2
2.1	試験レベル、試験周波数	2
2.2	変調	3
3	磁界に対するイミュニティ	3
3.1	主な使用機器	3
3.1.1	9 kHz~150 kHz	3
3.1.1.1	120 mm 放射ループ	3
3.1.1.2	磁界センサ・ループ	4
3.1.1.3	信号発生器、増幅器	4
3.1.1.4	電流計	4
3.1.2	150 kHz~26 MHz	4
3.1.2.1	100 mm 放射ループ	4
3.1.2.2	磁界センサ・ループ	6
3.1.2.3	信号発生器、増幅器	6
3.1.2.4	方向性結合器、パワーメータ	6
3.2	レベル設定	6
3.2.1	9 kHz~150 kHz	6
3.2.2	150 kHz~26 MHz	8
3.3	試験	8
3.3.1	EUT の配置	8
3.3.2	試験箇所	9
3.3.3	試験の実施	10
4	放射 RF 電磁界に対するイミュニティ	10
4.1	主な使用機器	10
4.1.1	TEM ホーン・アンテナ	10
4.1.2	電界プローブ	11
4.1.3	信号発生器、増幅器	11
4.1.4	方向性結合器、パワーメータ	11
4.2	電界均一性の確認	11
4.3	レベル設定	11
4.4	試験	11
4.4.1	EUT の配置	11
4.4.2	試験箇所	12
4.4.3	試験の実施	13
5	補足	13
5.1	放射ループの特性	13
5.2	試験レベルの例	14
5.2.1	IEC 61000-4-39 Table B.1	14
5.2.2	IEC 60601-1-2	15
5.3	類似の試験	15
6	参考資料	15

1 概要

IEC 61000-4-39 は近傍での放射電磁界に対するイミュニティ試験の方法を定めた規格である。

この規格では、放射源からの距離が 26 MHz 以上については 200 mm 以下、26 MHz 以下については 500 mm 以下が近傍の範囲として想定されている。

本稿では、この規格の本稿の執筆の時点での最新版である IEC 61000-4-39:2017^[1] について解説する。

なお、本稿は規格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、規格についての正確な情報は規格そのもの^[1]を参照していただきたい。

1.1 背景

高周波の放射電磁界に対するイミュニティ試験の方法としては既に IEC 61000-4-3^[2] やその他のいくつかの規格が発行されているが、それらは主に遠方での無線送信の影響の模擬が意図されており、近傍での無線送信の影響の模擬にはあまり適さない。また、その種の規格の多くでは例えば RFID や非接触給電で用いられるような低い周波数の電磁界はカバーされていない。

一方、現代では携帯電話や無線 LAN のような小型の無線通信機器、RFID、非接触給電などが様々な場所で用いられるようになっており、そのような機器の近傍での使用の影響を評価する方法への高いニーズがある。

この規格は近傍からの 9 kHz~6 GHz の周波数範囲の無線放射の影響を模擬するものとして 2017 年に第 1 版が発行された。

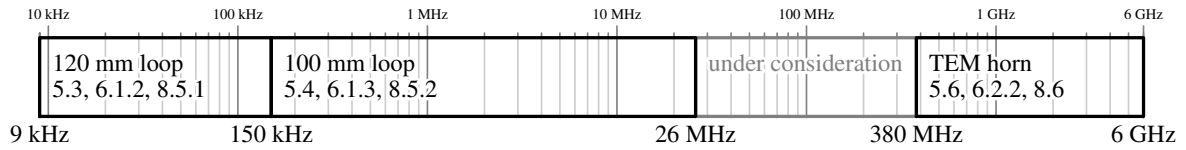


図 1: 周波数範囲と試験法

周波数範囲	9 kHz～150 kHz	150 kHz～26 MHz	380 MHz～6 GHz
送信アンテナ	120 mm 放射ループ (§3.1.1.1)	100 mm 放射ループ (§3.1.2.1)	TEM ホーン・アンテナ (§4.1.1)
磁界センサ、電界プローブ	40 mm 51 turn ループ (§3.1.1.2)	40 mm 1 turn ループ (§3.1.2.2)	単軸電界プローブ (§4.1.2)
レベル設定	$H = 75.6 \times I$ の関係による (§3.2.1)	置換法 (§3.2.2)	置換法 (§4.3)
試験距離	50 ± 3 mm (図 13)	50 ± 3 mm (図 13)	100 ± 5 mm (図 17)
ウィンドウ・サイズ	100×100 mm	80×80 mm	電界均一面に入る大きさ
変調	振幅変調 1 kHz, 80 % (図 3)	パルス変調 2 Hz or 1 kHz (図 4)	パルス変調 2 Hz, 217 Hz or 1 kHz (図 5)
最大周波数ステップ	10 kHz (表 2)	150 kHz～1 MHz — 100 kHz 1 MHz～26 MHz — 1000 kHz (表 2)	1 %
最小ドウェル・タイム	2 秒	2 秒	1 秒

表 1: 試験法の一覧

2 一般

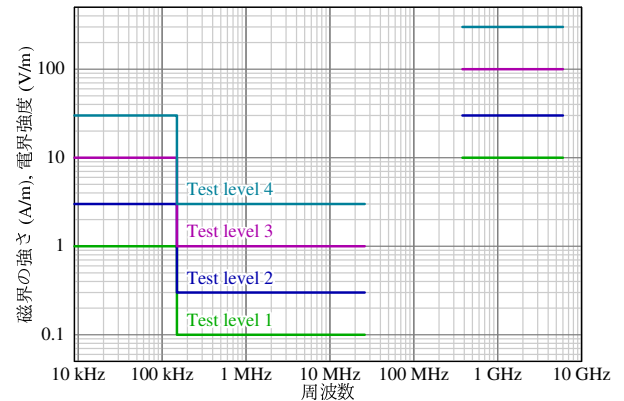
2.1 試験レベル、試験周波数

この規格では図 2 に示すような試験レベルが示されている。

だが、その全周波数範囲にわたって試験することが意図されているわけでも、試験する周波数範囲全体で同一のクラスの試験レベルを適用することが意図されているわけでもない。

実際の試験で適用すべき試験周波数が試験周波数範囲、及び試験レベルは、近傍での使用が予期される放射源の利用周波数、最大出力、また機器とのあいだの離隔距離に応じて製品群規格や試験計画書などで規定されるであろう。^{†1}

^{†1} だが、少なくとも現時点では多くの規格は近傍の無線デバイスを考慮したイミュニティ要求を含まない。また、規格にそのような要求が含まれているとしても可能性がある全ての無線デバイスがカバーされるとは限らず、新しい無線デバイスはおそらくカバーされず、またその特定の機器で起こりそうな最も厳しい使用状況がカバーされるとも限らない。従って、そのような無線デバイスによって引き起こされるかも知れない干渉の防止のためには、規格に対応する要求が含まれているかどうかに関わらず、その機器の実際の使用で生じるかも知れない無線デバイスの近接をカバーできるような形の試験を行なうことが望ましいかも知れない。

図 2: 試験レベルの例 — IEC 61000-4-39^[1] Table 2, Table 3 より)

試験周波数が試験周波数範囲で規定されている場合、これと異なる規定がないならば試験は次のように行なうことができる:

- 最大周波数ステップは、26 MHz 以下は周波数範囲に応じて表 2 に示した値、26 MHz 以上はその前の周波数の 1 % とする。
- スポット周波数で追加の試験を行なっても良い。

その周波数が試験周波数範囲に含まれる場合、潜在的に敏感な周波数 (例えばクロック周波数) は個別に分析することが推奨される。

- 特定の無線送信周波数帯での試験の場合、選択された周波数帯の中心から始めて、中心周波数から高い方向に 1 % ステップで、また中心周波数から低い方向に 1 % ステップで試験する。^{†2}

周波数範囲	ステップ (リニア)
9 kHz~150 kHz	10 kHz
150 kHz~1 MHz	100 kHz
1 MHz~26 MHz	1 MHz

表 2: 磁界に対するイミュニティ — 最大周波数ステップ

2.2 変調

これと異なる規定がない場合、試験では以下の変調を適用する:

- 9 kHz~150 kHz

変調周波数 1 kHz、変調度 80 % の振幅変調 (図 3)

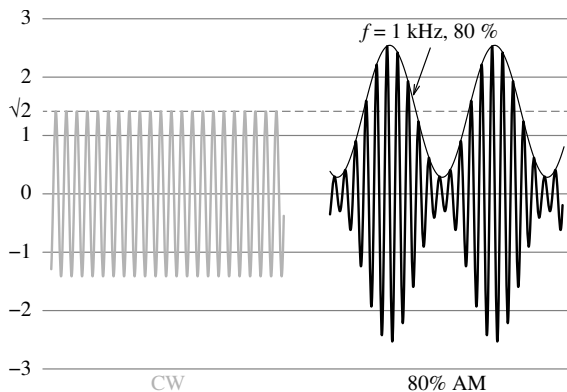


図 3: 1 kHz 80 % 振幅変調 (9 kHz~150 kHz の試験で適用)

- 150 kHz~26 MHz

デューティー 50 %、変調周波数 2 Hz、もしくは 1 kHz (製品群規格などで規定される)、オン/オフ比 20 dB 以上のパルス変調 (図 4)

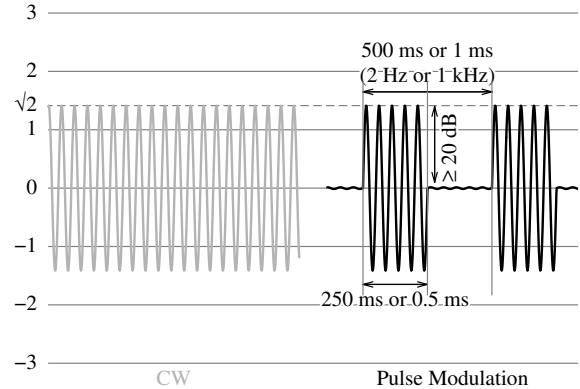


図 4: パルス変調 (150 kHz~26 MHz の試験で適用)
Note: 変調周波数は製品群規格などで規定される

- 380 MHz~6 GHz

デューティー 50 %、変調周波数 2 Hz、217 Hz、もしくは 1 kHz (製品群規格などで規定される)、オン/オフ比 20 dB 以上のパルス変調 (図 5)

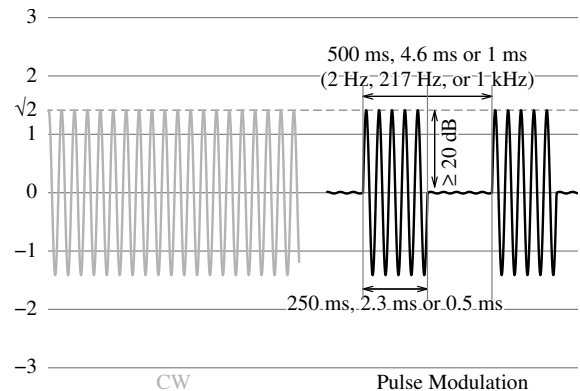


図 5: パルス変調 (380 MHz~6 GHz の試験で適用)
Note: 変調周波数は製品群規格などで規定される

3 磁界に対するイミュニティ

3.1 主な使用機器

3.1.1 9 kHz~150 kHz

3.1.1.1 120 mm 放射ループ

9 kHz~150 kHz の試験 (§3.3.3) に用いる放射ループは下記のようなもので、寸法の許容差が規定されていることを除き、MIL-STD-461G RS101^[3] や ISO 11452-8^[4] で示されているものと同様のものである:

^{†2} 最後のステップは試験周波数帯を超えるであろうが、試験周波数帯の境界の周波数で試験すれば良いだろう。

- 直径: (120 ± 10) mm
- 巻き数: 20
- ワイヤ径: 約 2 mm (AWG12)

この放射ループに電流 I (A) を流した時の中心軸上 50 mm の位置における磁界の強さは、

$$H = 75.6 \times I \text{ (A/m)}$$

から求めることができ^{†3}、120 mm 放射ループでの試験レベルの設定は §3.2.1 で述べるように放射ループに流す電流をこの関係から求めた電流、すなわち $I = H/75.6$ (A) として求めた電流 I に合わせるように調整することによって行なう。

参考のため、120 mm 放射ループからの磁界の強さの分布を推定したものを図 7 に、またこれに関係するいくつかの事項を §5.1 に示す。



図 6: 120 mm 放射ループ (左) とベリフィケーション用 40 mm センサ・ループ (右) の例 (写真は Schwarzbeck 社の厚意による)

3.1.1.2 磁界センサ・ループ

9 kHz～150 kHz での試験系の確認 (§3.2.1) に用いる磁界センサ・ループは標準的には以下のようなもので、これも寸法の許容差が規定されていることを除き MIL-STD-461G RS101^[3] や ISO 11452-8^[4] で示されているものと同様のものである。

^{†3} 電流 I が流された半径 r 、巻き数 N のコイルの軸上、コイルの中心から距離 z における磁界の強さは

$$H_z = \frac{Nr^2I}{2(r^2 + z^2)^{3/2}}$$

となり、この試験で使用する 120 mm 放射ループの軸上 50 mm での磁界の強さは $r = 0.06$ m、 $N = 20$ 、 $z = 0.05$ m として $H_z = 75.56 \dots \times I$ (A/m) となる。但し、実際の多巻のコイル (特にワイヤが太いものや巻き数が多いもの) では巻き毎に位置や径が変わることの影響などでこの単純な計算からは多少のずれを生じることがある。

- 直径: (40 ± 2) mm
- 巻き数: 51
- ワイヤ径: 約 0.07 mm
- シールド: 静電シールド
- 補正係数: センサ・ループの開放回路出力電圧から磁界の強さへの換算のための補正係数は製造業者のデータを参照^{†4}

だが、これよりも小さい任意の磁界センサを用いることもできる。

3.1.1.3 信号発生器、増幅器

試験で必要な周波数範囲で必要な電流や電圧を発生できるものを用いる。

負荷は誘導性で、また低い周波数範囲ではほぼ短絡状態となるため、増幅器はそのような負荷を安定して駆動できるのであることが必要となる。場合によっては直列に適切な抵抗値と電力定格の抵抗を接続するなどの対応が必要となるかも知れない。

3.1.1.4 電流計

9 kHz～150 kHz の試験レベルの設定 (§3.2.1) で必要となる電流の測定には、必要な周波数範囲 (9 kHz～150 kHz)、電流範囲、また真の実効値の電流測定に対応した任意の測定器、例えばクランプ式のプローブとオシロスコープ、真の実効値型電流計、シャント抵抗と真の実効値型電圧計などを用いることができる。

3.1.2 150 kHz～26 MHz

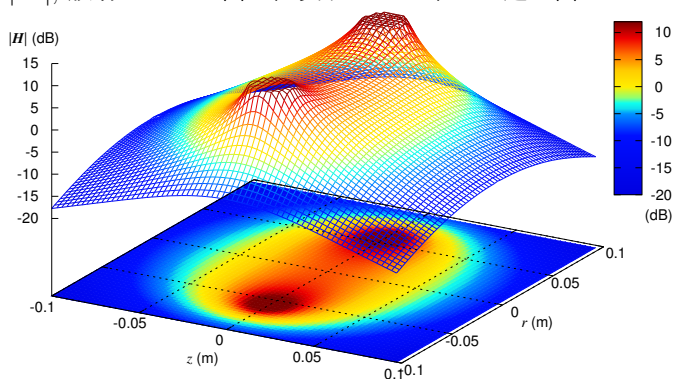
3.1.2.1 100 mm 放射ループ

150 kHz～26 MHz の試験 (§3.3.3) に用いる放射ループは下記のようなものである：

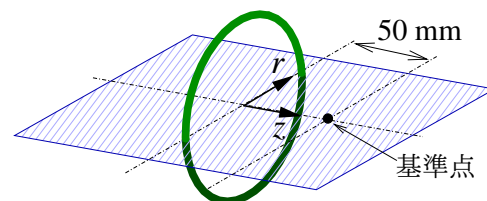
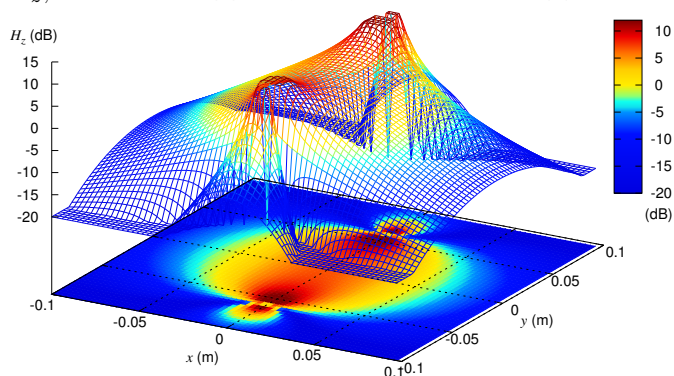
- 直径: (100 ± 10) mm
- 巻き数: 3
- ワイヤ径: 約 1 mm

^{†4} 巻き数 N 、断面積 A (m²) のループ・センサを周波数 f (Hz)、磁束密度 B (T) の磁界に曝した時の開放回路出力電圧 U (V) は $U = 2\pi f N A B$ から求めることができる。この試験ではこの式から求めた係数は使用しないが、製造業者からのデータはこの式から求めた値とほぼ一致することが予想される。

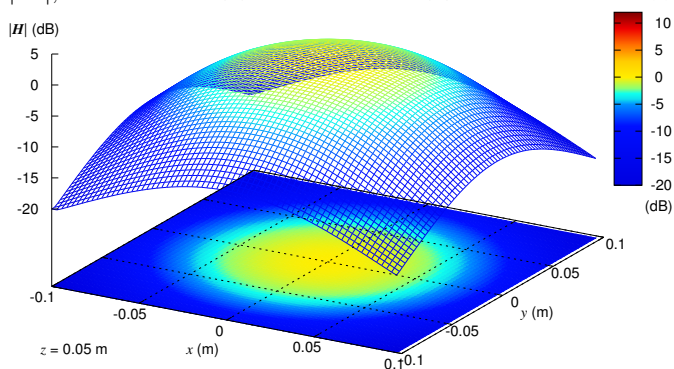
$|H|$, 放射ループの面と直交するその中心を通る面



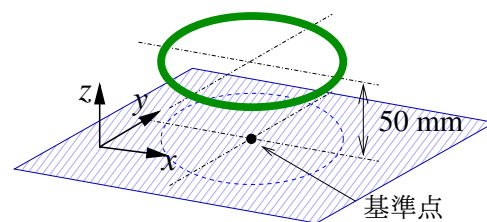
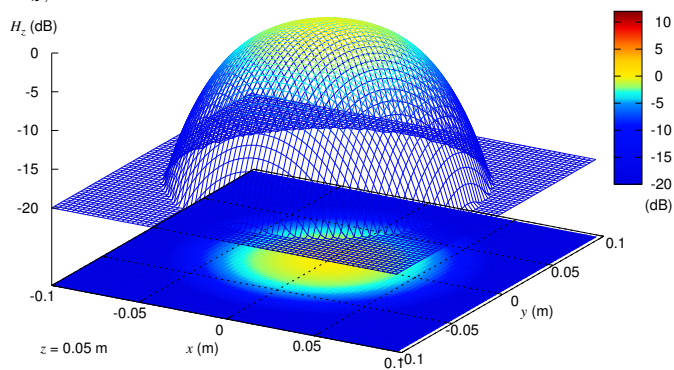
H_z , 放射ループの面と直交するその中心を通る面



$|H|$, 放射ループの面と平行するその面から 50 mm の距離の面



H_z , 放射ループの面と平行するその面から 50 mm の距離の面



3D 表示は [-20 dB, +12 dB] でクリップして図示

図 7: 120 mm 放射ループからの磁界の強さの分布

高い周波数で高いレベルの磁界を発生させようとするとかかなり高い電圧が必要となる (§5.1) であろうが、場合によっては適切な整合回路網を用いて必要な電圧を低減できるかも知れない。

この周波数範囲での試験レベルの設定は §3.2.2 で述べるように磁界センサ・ループ (§3.1.2.2) を基準とした置換法で行なう。^{†5}

参考のため、100 mm 放射ループからの磁界の強さの分布を推定したものを図8に、またこれに関係するいくつかの事項を §5.1 に示す。

3.1.2.2 磁界センサ・ループ

150 kHz～26 MHz での試験レベルの設定 (§3.2.2) に用いる磁界センサ・ループは標準的には以下のようなものである：

- 直径: (40 ± 2) mm
- 巻き数: 1
- ワイヤ径: 約 0.5 mm
- シールド: 静電シールド
- 補正係数: センサ・ループの出力電圧 (50 Ω で終端した状態での) から磁界の強さへの換算のための補正係数は製造業者のデータを参照^{†6}

だが、これよりも小さい任意の磁界センサを用いることもできる。

3.1.2.3 信号発生器、増幅器

試験で必要な周波数範囲で必要な電流や電圧を発生できるものを用いる。

負荷となる放射ループの整合は良くないかも知れず、増幅器はその動作条件でも正常に動作することが必要となる。場合によっては反射の影響の低減のために増幅器と放射ループのあいだに適切なアッテネータを挿入するなどの対応が必要となるかも知れない。

^{†5} †3 の式から $r = 0.05$ m、 $N = 3$ 、 $z = 0.05$ m として $H_z = 10.606 \dots \times I$ (A/m) となる。だが、26 MHz では自由区間中での電磁波の波長を考えると 10 m 強で、試験発生器と放射ループのあいだのケーブルだけでも電氣的に短いとは言えない長さになり、また寄生成分の影響も大きくなることが予想され、単純に電流で管理することは適切とは言えそうにない。おそらくはこの理由から、100 mm 放射ループのレベル設定はこの関係から求めた電流を用いるのではなく置換法で、制御パラメータとして進行波電力を用いて行なうように規定されており (§3.2.2)、120 mm 放射ループの場合と異なり試験ではこの関係から求めた電流は用いられない。

^{†6} §3.1.1.2の場合と異なり、この係数を単純な計算で求めることはできない。

3.1.2.4 方向性結合器、パワーメータ

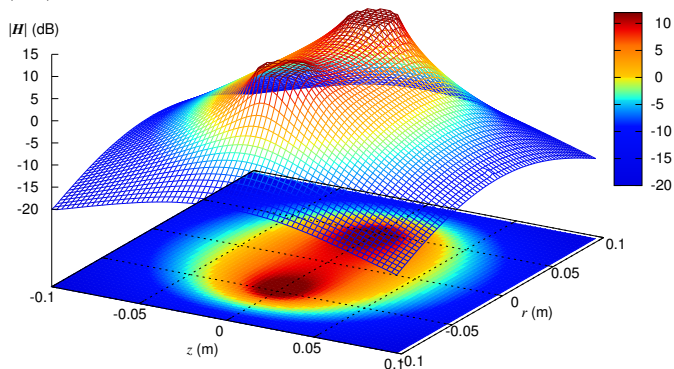
150 kHz～26 MHz の試験レベルの設定 (§3.2.2) では制御パラメータとして進行波電力が用いられる。規格ではこれについての詳細は述べられていないが、進行波電力の測定は適切な方向性結合器とパワーメータを用いて行なうことができる。

3.2 レベル設定

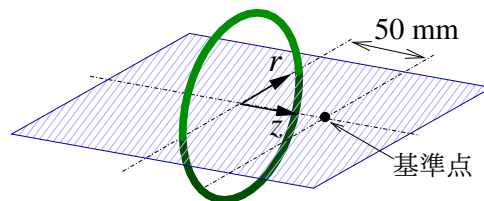
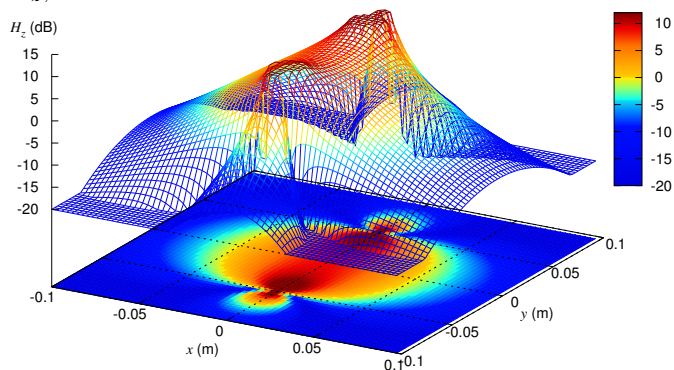
3.2.1 9 kHz～150 kHz

1. 放射ループ (§3.1.1.1) を EUT などから 2 m 以上離して置き、磁界センサ・ループ (§3.1.1.2) を放射ループの中心軸上 (50 ± 3) mm の距離 (ループの中心間の距離) に放射ループと平行に置く (図9)。
2. 信号発生器か電力増幅器 (使用する場合) の出力を電流測定器を通して放射ループに接続し、また磁界センサ・ループの出力を高インピーダンス電圧計に接続する。
3. 試験周波数範囲の下限から上限まで (例えば 9 kHz から 150 kHz まで) の、表2 で示した値を超えない周波数ステップのそれぞれの周波数について:
 - (a) 信号発生器の周波数をその周波数に設定する。変調は掛けない。
 - (b) 試験レベルに対応する電流を §3.1.1.1 で示した関係から算出し、放射ループに流す電流をその電流に調整する。
 - (c) 磁界センサ・ループに誘起した電圧を読み取る。
 - (d) その電圧に磁界センサ・ループのその周波数での開放回路出力電圧に対する補正係数を適用して磁界の強さの測定値を算出し、それが試験レベルの ±10 % の範囲内にあることを確認する。
4. 最大の周波数で試験信号に変調 (図3) を掛け、試験信号が正しく変調されていることを確認する。

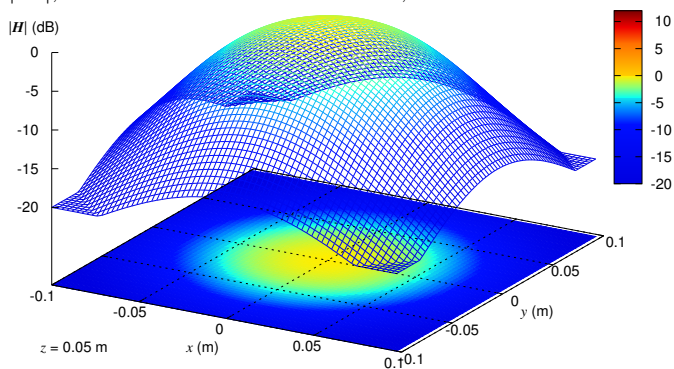
$|H|$, 放射ループの面と直交するその中心を通る面



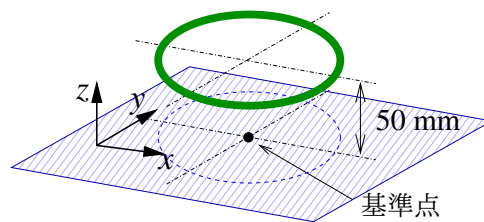
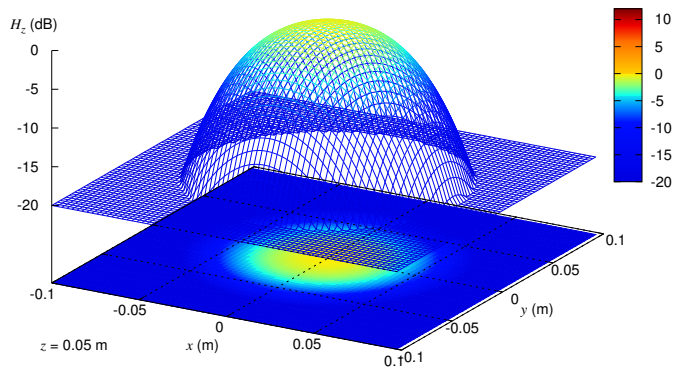
H_z , 放射ループの面と直交するその中心を通る面



$|H|$, 放射ループの面と平行する面, $z = 50$ mm



H_z , 放射ループの面と平行する面, $z = 50$ mm



3D 表示は $[-20 \text{ dB}, +12 \text{ dB}]$ でクリップして図示

図 8: 100 mm 放射ループからの磁界の強さの分布

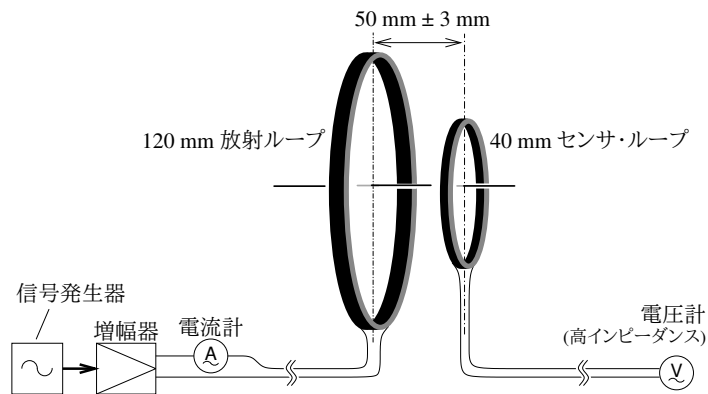


図 9: 120 mm 放射ループの確認のセットアップの例

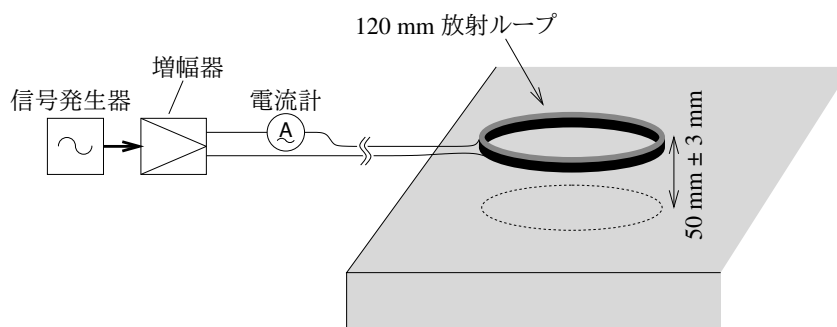


図 10: 120 mm 放射ループでの試験構成の例 (9 kHz~150 kHz)

3.2.2 150 kHz~26 MHz

- (a) 放射ループ (§3.1.2.1) を EUT などから 2 m 以上離して置き、磁界センサ・ループ (§3.1.2.2) を放射ループの中心軸上 (50 ± 3) mm の距離 (ループの中心間の距離) に放射ループと平行に置く (図 11)。
- (b) 信号発生器か電力増幅器 (使用する場合) の出力を放射ループに、また磁界センサ・ループの出力をパワーメータや測定用受信機に接続する。
- (c) 試験周波数範囲の下限から上限まで (例えば 150 kHz から 26 MHz まで) の、表 2 で示した値を超えない周波数ステップのそれぞれの周波数について:
 - (a) 信号発生器の周波数をその周波数に設定する。変調は掛けない。
 - (b) 磁界センサ・ループの出力電圧にその周波数での終端状態での出力電圧に対する補正係数を適用して算出した磁界の強さを所定の試験レベルに合わせるように放射

ループに注入する信号のレベルを調整し、その進行波電力を記録する。

- (d) 最大の周波数で試験信号に変調 (図 4) を掛け、試験信号が正しく変調されていることを確認する。

3.3 試験

3.3.1 EUT の配置

放射ループは EUT と床を除く全ての金属面 (試験発生器、周辺機器など) から 1 m 以上離すべきである。^{†7}

機器は非導電性かつ低透磁率の台の上に通常の使用と同様に配置すべきである。卓上型、可搬型、あるいは壁面取り付け型の機器の場合はこの台の高さは (0.80 ± 0.05) m とする。床置き機器はその垂直の面を床面上 (100 ± 50) mm まで下げて試験することができる。

^{†7} その種のものの使用は減っているが、磁界の影響を受けやすいかも知れないもの、例えば指示計器、陰極線管オシロスコープ、ブラウン管式モニターなどには特に注意が必要かも知れない。

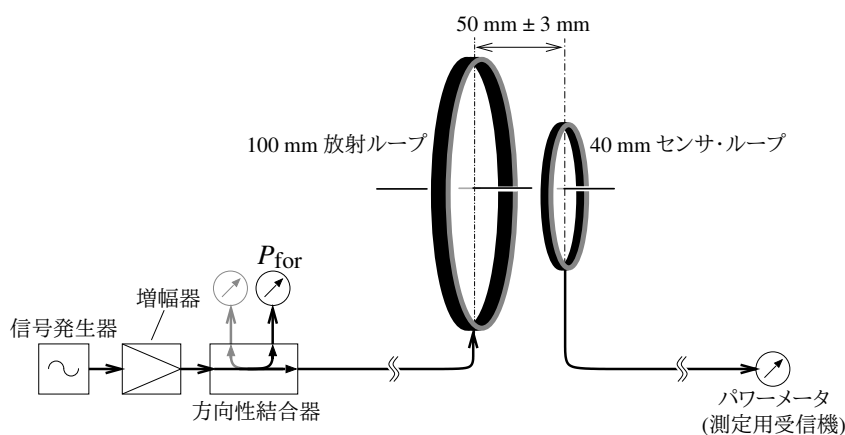


図 11: 100 mm 放射ループのレベル設定のセットアップの例

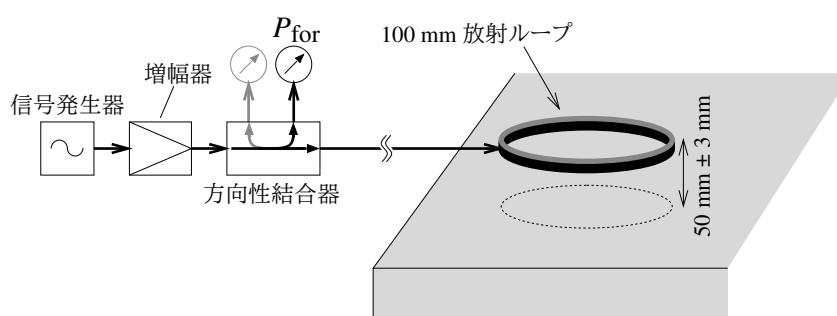


図 12: 100 mm 放射ループでの試験構成の例 (150 kHz~26 MHz)

機器のケーブルは可能な限り典型的な設置を再現するように配置する。ケーブルの種類やコネクタは製造業者の規定に従い、配線の規定がない場合にはシールドされていない平行の導体を用いる。

筐体の接地は製造業者の推奨に合わせる。接地ありと接地なしの双方の構成が可能な場合、双方で試験する。

3.3.2 試験箇所

通常の使用で磁界の照射に曝される面を試験する。可能な場合は卓上機器や可搬型機器の全ての面を試験することが推奨されるが、床置き機器の底面は試験すべきではない。

製品群規格などで規定されない限り、磁界に対する入力ポートとして見ることができる箇所や面のみを磁界に曝す。

次のような箇所の試験は不要である:

1. 機器の外側の固定式バリアが機器の表面から 0.25 m 以内に磁界の発生源が近付くことを妨げる箇所;

2. 機器内部の磁界の影響を受けるかも知れないコンポーネント^{†8}(センサ、ケーブル、プリント基板など)の 0.25 m 以内に磁界の発生源が近付くことを妨げるように構成されている面 (例えばその内部に空間がある、あるいは機構部のみを覆うプラスチックのハウジング);
3. 設置後、あるいは使用指示に従った後はもはや磁界の発生源を近付けることができない箇所や面;
4. ループの直径の 150 % よりも大きい、一体の均質な強磁性材料 (厚さ > 0.25 mm) から成る面;^{†9}
5. 保守点検中にのみ可搬型送信デバイスからの電磁界に曝される面や領域。

^{†8} 規格では「能動 (active) コンポーネント」という表現が用いられているが、この表現は好ましくないように思われる。

^{†9} 例えば純鉄の場合、比抵抗率 $\rho = 1 \times 10^{-7} (\Omega \cdot \text{m})$ 、比透磁率 $\mu_r = 1000$ 程度で、表皮深さ $\delta = 1/\sqrt{\pi f \mu \sigma}$ は 10 kHz において 0.05 mm 程度となると、従って 0.25 mm の厚みはこの表皮深さの 5 倍程度に相当すると推定される。一方、非磁性 ($\mu_r \approx 1$) であるアルミニウムの場合、比抵抗率 $\rho = 2.65 \times 10^{-8} (\Omega \cdot \text{m})$ 程度で、表皮深さ δ は 0.8 mm 程度と推定される。

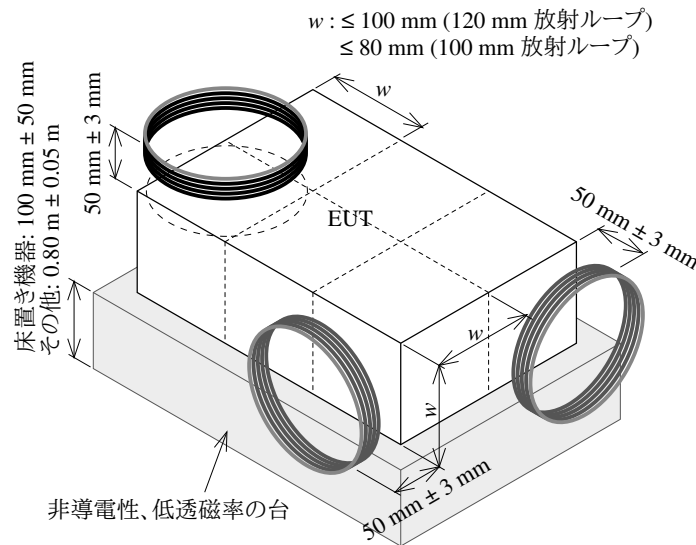


図 13: 試験時の 120 mm 放射ループや 100 mm 放射ループの配置の例

3.3.3 試験の実施

試験対象とする面を、9 kHz～150 kHz は 100 mm × 100 mm の、150 kHz～26 MHz は 80 mm × 80 mm のウィンドウに分割し、それぞれのウィンドウの中心、EUT の面から (50 ± 3) mm の距離 (ループの中心から機器の表面までの距離) に機器の面と平行に放射ループを置き、それぞれの試験周波数で所定のレベルの磁界を照射して EUT への影響を確認する (図 10, 図 12, 図 13)。

この規格では 図 2 のような試験レベルが示されているが、実際の試験で適用すべき試験レベルは製品群規格や試験計画書などで規定されるであろう。

EUT や試験セットアップの制限 (例えば機器の外形) のために放射ループの位置を許容差内に入れることが容易でない場合は逸脱が許容されるが、これは試験報告書に記載する。

例えば機器の外形 (突起部など) や取り付けられたケーブルのためにそのように配置できない場合、可搬型送信デバイスの近接に関して最も重要な箇所を同定し、試験する。この特別な扱いは試験報告書に記載する。

それぞれのウィンドウで、試験周波数範囲のそれぞれの周波数 (§2.1) について、それぞれの周波数で信号レベル (電流、もしくは進行波電力) の調整を行なった上であらかじめ決められたドウェル・タイムのあいだ変調された妨害を印加する。

それぞれの周波数でのドウェル・タイムは 2 秒以上で、機器の応答時間や EUT の動作に必要な時間

に応じて長くする。ドウェル・タイムは試験報告書に記載する。

他の変調の使用が規定されていない限り、変調は 9 kHz～150 kHz は振幅変調 (図 3)、150 kHz～26 MHz はパルス変調 (図 4) を用いる。

4 放射 RF 電磁界に対するイミュニティ

4.1 主な使用機器

4.1.1 TEM ホーン・アンテナ

規格の Annex A で述べられた、次のようなアンテナ:^{†10}

- 周波数範囲: 380 MHz～6 GHz (複数のアンテナでカバーしても良い)
- VSWR: 3:1 以内
- 電界分布: アンテナから (100 ± 5) mm の距離で +0～-4 dB の均一性の要求を満足する範囲 (電界均一面; §4.2) が確認されていること

^{†10} この試験で用いられる TEM ホーン・アンテナは、アンテナに近い距離から、平面波を近似する 377 Ω に近いインピーダンスの電磁界を、比較的広い領域にわたり概ね均一な強度で発生することが意図されたものとなる。^{[7][8]} これは近距離での試験のための使用が意図されたものではあるが、実際の無線送信機が近距離で 377 Ω に近いインピーダンスの平面波に似た電磁界を発生するというわけではなく、従って TEM ホーン・アンテナによる試験はそのような距離で動作している実際の無線送信機からの影響を素直に模擬するものというわけではない。

4.1.2 電界プローブ

必要な周波数範囲 (例えば 380 MHz~6 GHz) に対応した、TEM ホーン・アンテナの開口の最小寸法の 1/3 以下の寸法の検出素子を用いた、単一の偏波の電界強度の測定が可能なもの。

4.1.3 信号発生器、増幅器

試験に必要な周波数範囲で必要な信号を発生できるもの。所定の強度の電磁界の発生のために必要な出力は使用する TEM ホーン・アンテナ (§4.1.1) のデータシートとケーブルの損失から推定できる。

4.1.4 方向性結合器、パワーメータ

制御パラメータとして用いる進行波電力 (また反射波電力) の測定は適切な方向性結合器とパワーメータを用いて行なうことができる。

4.2 電界均一性の確認

TEM ホーン・アンテナ (§4.1.1) の電界均一面は +0 dB から -4 dB の範囲の電界を得られる領域で、これは電波暗室内で次のような方法を用いて確認できる (図 15):

1. 中心 (TEM ホーン・アンテナの中心軸上) から始まり所望の電界均一面をカバーする 25 mm × 25 mm のグリッドを作る。
2. グリッドの中心の点、TEM ホーン・アンテナの面から (100 ± 5) mm の距離に電界プローブ (§4.1.2) を置く。
3. 所定の電界強度レベルを用いて、所定の周波数範囲の 1 % を超えない周波数ステップの各周波数での進行波電力と電界強度の読みを記録する。
4. 他のグリッド点についてその測定を繰り返す。
5. それぞれの周波数について、それぞれのグリッド点で記録された進行波電力の値 (定電界強度の場合)、あるいは電界強度の値 (定電力の場合) を降順に並べ替える。

6. その TEM ホーン・アンテナの使用可能な電界均一面はその中の全てのプローブ位置で最大電界強度の +0 dB から -4 dB の範囲内となる領域である。

アンテナの製造業者が電界均一性のデータを提供している場合、その情報を試験に用いて良い。^{†11}

4.3 レベル設定

1. 電波暗室の中で、TEM ホーン・アンテナの中心軸上 (100 ± 5) mm の距離に電界プローブ (§4.1.2) を置く。
2. 試験周波数範囲の下限から上限まで (例えば 380 MHz から 6 GHz まで) の、1 % を超えない周波数ステップのそれぞれの周波数について:
 - (a) 信号発生器の周波数をその周波数に設定する。変調は掛けない。
 - (b) 目標の試験レベルを発生させるように進行波電力を調整し、進行波電力と電界強度の読みを記録する。
3. 最大の周波数で試験信号に変調 (図 5) を掛け、試験信号が正しく変調されていることを確認する。

4.4 試験

4.4.1 EUT の配置

試験は適切にシールドされた場所、通常は十分な広さの電波暗室で行ない、壁や天井の影響を最小限とするために EUT の面は壁や天井から 0.8 m 以上離すようにする。妨害の影響を防ぐため、EUT 以外の機器はその部屋の外に置くべきである。

EUT は例えば予備試験、工学的分析、あるいはリスク分析に基づいて同定された最も重要な用途や動作を代表する構成で試験する。

機器のケーブルは可能な限り典型的な設置を再現するように配置する。ケーブルの種類やコネクタは製造業者の規定に従い、配線の規定がない場合にはシールドされていない平行の導体を用いる。

^{†11} 試験距離が短いため、環境 (電波暗室の特性など) の影響は限定的となることが期待される。

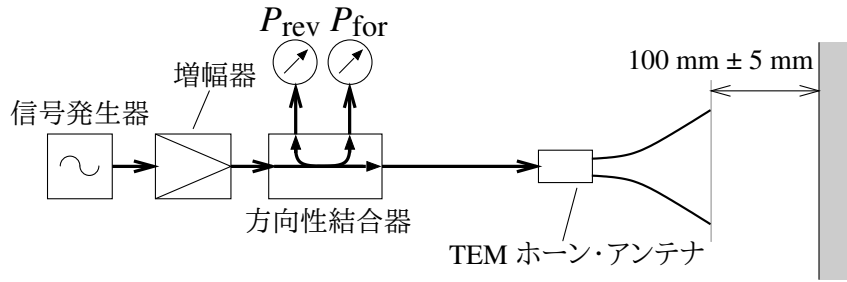


図 14: TEM ホーン・アンテナ — 試験システムの構成の例

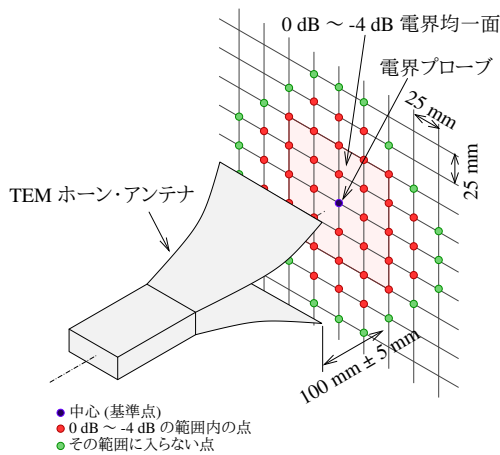


図 15: TEM ホーン・アンテナ — 電界均一性評価の確認のイメージ

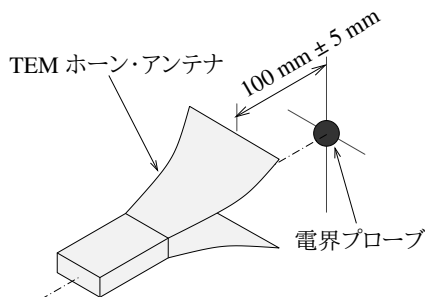


図 16: TEM ホーン・アンテナ — レベル設定のセットアップの例

筐体の接地は製造業者の推奨に合わせる。接地ありと接地なしの双方の構成が可能な場合、双方で試験する。

卓上型、可搬型、あるいは壁面取り付け型の機器は非導電性の台の上に配置する。床置き機器は高さ (100 ± 50) mm の台の上に置くべきである。

4.4.2 試験箇所

通常の使用で EUT の近傍で使用される可搬型送信デバイスからの電磁界に曝される全ての面を試験する。可能な場合は卓上機器や可搬型機器の全ての面を試験することが推奨されるが、床置き機器の底面は試験すべきではない。

製品群規格などで規定されない限り、近傍で使用されるデバイスからの電磁界に対する入力ポートとして見る事ができる箇所や面のみを電磁界に曝す。

次のような箇所の試験は不要である：

1. 機器の外側の固定式バリアが機器の表面から 0.25 m 以内に磁界の発生源が近付くことを妨げる箇所；
2. 機器内部の電磁界の影響を受けるかも知れない^{†8} コンポーネント (センサ、ケーブル、PCB など) の 0.25 m 以内に電磁界の発生源が近付くことを妨げるように構成されている面 (例えばその内部に空間がある、あるいは機構部のみを覆うプラスチックのハウジング)；
3. 設置後、あるいは使用指示に従った後はもはや可搬型 RF 送信デバイスを近付けることができない箇所や面；
4. TEM ホーンの電界均一面 (§4.2) の 150 % よりも大きい、一体の均質な金属材料 (厚さ > 0.25 mm) から成る面；^{†12}
5. 保守点検中にのみ可搬型送信デバイスからの電磁界に曝される面や領域。

^{†12} 磁界での試験 (§3.3.2) の場合と異なり、強磁性材料である必要はない。一般に、このような高い周波数の電磁界に対しては、このような金属板は透磁率と無関係にかなり良好なシールド性を示す。大きな機器 (例えば制御盤やラックのような) で側面などが大きな金属板でカバーされているものも多いが、そのような面は金属板の継ぎ目や開口 (例えば通気口のような) の周囲のみに照射すれば良さそうである。

4.4.3 試験の実施

試験対象とする面を使用する TEM ホーン・アンテナの電界均一面 (§4.2) でカバーされる大きさ (電界均一面の大きさは周波数によって異なることが予期される) のウィンドウに分割し、それぞれのウィンドウの中心、EUT の面から (100 ± 5) mm の距離に、機器の面に向けて TEM ホーン・アンテナを置き、所定の強さの電磁界を垂直偏波、及び水平偏波で照射する (図 17)。

この規格では 図 2 のような試験レベルが示されているが、実際の試験で適用すべき試験レベルは製品群規格や試験計画書などで規定されるであろう。

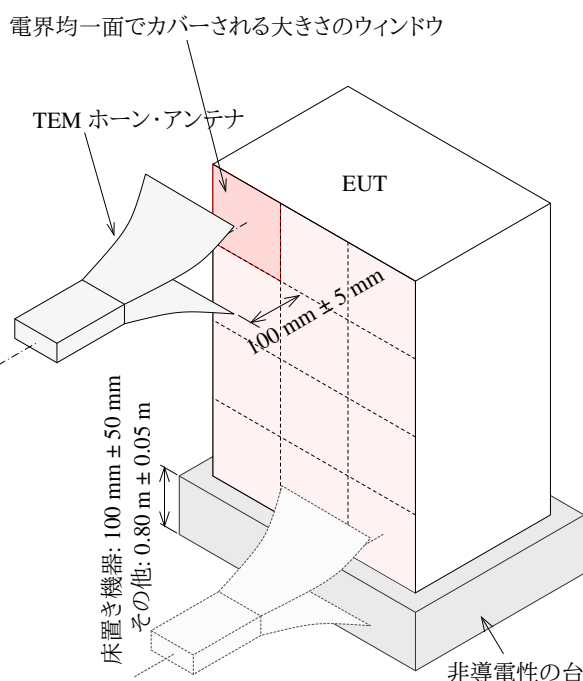


図 17: TEM ホーン・アンテナ — 試験時のアンテナの配置の例

EUT の面が平坦でない場合、それぞれのウィンドウに対する試験距離はウィンドウ内の EUT の最も近い箇所が (100 ± 5) mm となるように調整する。

それぞれのウィンドウ、また双方の偏波で、試験周波数範囲のそれぞれの周波数 (§2.1) について、それぞれの周波数で信号レベル (進行波電力) の調整を行なった上であらかじめ決められたドウェル・タイムのあいだ変調された妨害を印加する。

それぞれの周波数でのドウェル・タイムは 1 秒以上で、機器の応答時間や EUT の動作に必要な時間に応じて長く、またそれぞれの周波数で少なくとも

変調の完全な 2 サイクルが印加されるようにする。ドウェル・タイムは試験報告書に記載する。

他の変調の使用が規定されていない限り、変調はパルス変調 (図 5) を用いる。

5 補足

5.1 放射ループの特性

この規格で 120 mm 放射ループ (§3.1.1.1) を用いた試験に関して示されている最大の試験レベル (図 2) は 30 A/m でその発生に必要な電流は 0.4 A 程度、その放射ループのインダクタンスは 80 μ H 程度で 150 kHz におけるインピーダンスは 75 Ω 程度、従って必要な電圧は 30 V 程度と推定される。

他の変調の使用が規定されない場合は 80 % 振幅変調 (図 3) が用いられ、従って試験発生器はその 1.8 倍程度の電流と電圧を有意な歪みなしに出力できることが必要となる。

IEC 60601-1-2:2014+A1:2020 (ed. 4.1)^[6] では 134.2 kHz についてこの規格の Test level 4 での 30 A/m よりも高い 65 A/m という試験レベルが示されている。その発生のためにはさらに高い電流や電圧が必要となるが、変調としてパルス変調が示されているため、その影響は幾分かは緩和される。

また、高い周波数ではこの計算からは外れることが予期されるが、単純計算ではこの規格で示されている試験レベルを発生させるために必要となる電圧が最大となるのは 26 MHz で 3 A/m を発生させる時で、その放射ループのインダクタンスは 2.2 μ H 程度で 26 MHz におけるインピーダンスは 360 Ω 程度、3 A/m を発生させるために必要な電流は 0.4 A 程度、従って必要な電圧は 100 V 程度と推定される (図 18)。

IEC 60601-1-2:2014+A1:2020 (ed. 4.1)^[6] では 13.56 MHz についてこの規格の Test level 4 での 3 A/m よりも高い 7.5 A/m という試験レベルが示されている。その発生のためにはさらに高い電流や電圧が必要となるが、この軽減のため、しばしばそれに合わせた整合回路網が用いられる。

これらの放射ループの面と直交するその中心を通る面、及びループの面と平行するその面から 50 mm の距離の面の中での磁界の強さ (大きさ $|H|$ 、及びループの面に直交する成分の大きさ H_z) の分布を

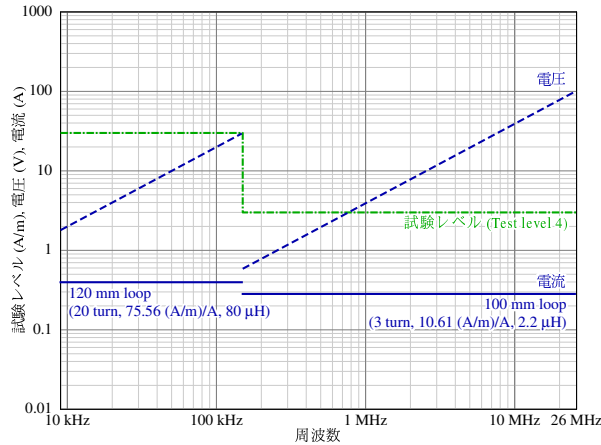


図 18: 放射ループの駆動電圧、電流の例

求めたものを 図7、及び 図8 に示す。ここで、磁界の強さは中心軸上 50 mm の距離における磁界の大きさを 0 dB として示している。^{†13}

この分布から、120 mm 放射ループの面から 50 mm の距離での $|H|$ は 100 mm × 100 mm の範囲の多くでその目標レベルの -3 dB を下回らない程度のレベルとなるであろうことが、だがその外側や深さ方向への磁界の拡がりはかなり限られることがわかるだろう (図7)。この放射ループの中心軸に沿っての、すなわち EUT の深さ方向での磁界の強さ (中心軸上では $|H| = H_z$ となる) をグラフ化したものを 図19 に示すが、磁界を遮るものがない場合でも EUT 表面から 20 mm ($z = 70$ mm) の深さで -4 dB 程度に、50 mm ($z = 100$ mm) の深さでは -10 dB 以下に低下するであろうことがわかるだろう。これは最も強い磁界を得られる放射ループの中心軸に沿ってのものであり、放射ループの中心軸から離れればそれに応じて得られる磁界も弱くなる。

100 mm 放射ループからの放射もこれと似た形となるが、ループが小さいことを反映して磁界の拡がりはさらに小さくなる (図7)。

また、この種の放射ループは照射範囲内でループの面と直交する方向の磁界を発生するとみなされることがあるが、中心軸から離れるのに応じてその位置での磁界全体 (H) のうちに占めるループの面と直交する方向の成分 (H_z) の割合は低下し、従って目標レベルに近い H_z を得られる範囲はさらに狭くなる (図7, 図8)。

従って、この規格では大きな機器に対してもこの

^{†13} 放射ループからの磁界の計算に用いたプログラムは <https://tiggerntatie.github.io/emagnet/offaxis/elliptic.c.htm> に由来する。^[9]

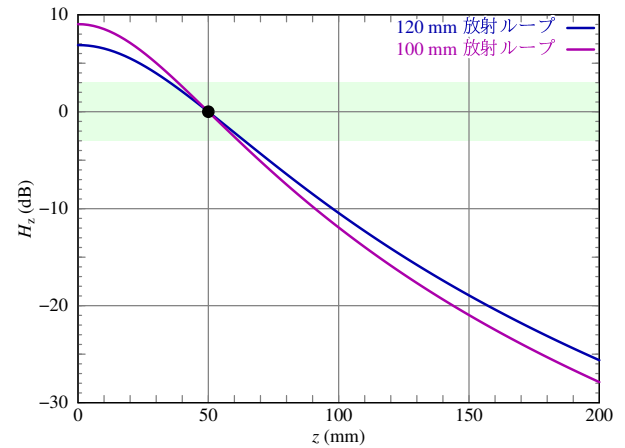


図 19: 120 mm 放射ループ、及び 100 mm ループの中心軸に沿った磁界の強さの変化

試験法が用いられるものの、磁界の影響を評価したい部分が大きな機器の内側にある場合は放射ループをどの位置に置いてその部分をあまり磁界に曝せない可能性がある。また、浅い部分もほぼその面と直交する方向の磁界のみに曝される形となり、角の近く以外は他の方向の磁界に曝すことは難しい。

模擬しようとしている妨害源が近接型の RFID リーダのように小さいコイルを用いてごく近距離での通信を行なうものの場合、実際の妨害源からの磁界もこれと似た挙動を示すことが期待され、この制約は問題とはなりそうにない。だが、例えば盗難防止ゲートのようにかなり長い到達距離を持つように意図された放射源からの、あるいは単に大きなコイルからの磁界の大きな機器への影響を模擬しようとしているような場合、この試験法で意図した評価を行なえるかどうかは別途検討することが望ましいかも知れない。

5.2 試験レベルの例

5.2.1 IEC 61000-4-39 Table B.1

この規格の Annex B.3 (Table B.1) には特定の RF 無線通信機器を、また最小 0.1 m の離隔距離を想定しての周波数範囲、変調、電界強度などがガイダンスとして示されており、その情報の一部を 図20 に図示する。

これと別に Annex B.2 で 9 kHz ~ 26 MHz の周波数範囲の放射源の例も列挙されているが、こちらについては放射の強度などの情報は示されていない。

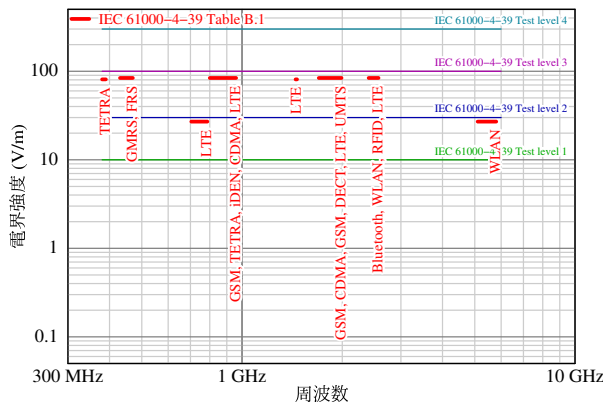


図 20: 試験レベルの例 — IEC 61000-4-39 Table B.1

5.2.2 IEC 60601-1-2

IEC 60601-1-2:2014+A1:2020 (ed. 4.1)^[6] で示されている試験レベルの例を参考として 図 21 に図示する。

但し、この規格では高い周波数範囲については試験法としてこの規格ではなく IEC 61000-4-3^[2] が参照されている。

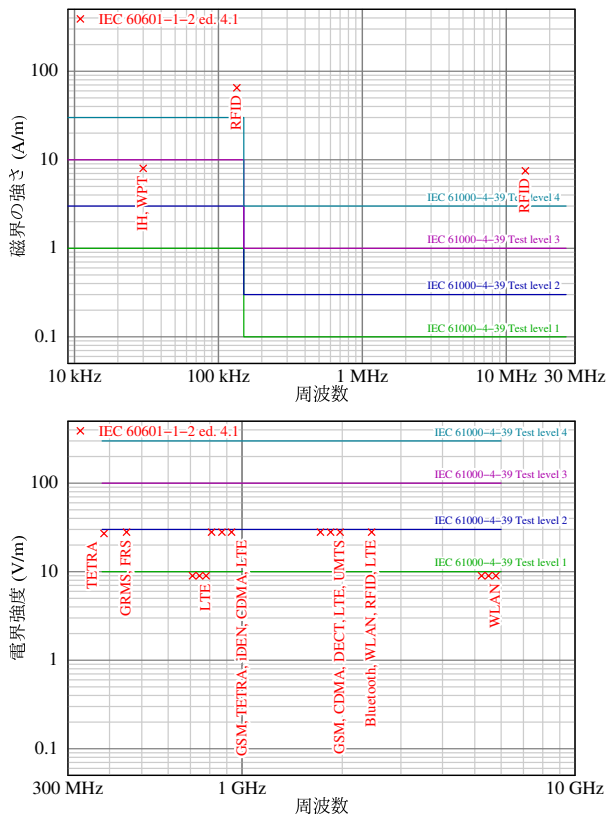


図 21: 試験レベルの例 — IEC 60601-1-2:2014+A1:2020 (ed. 4.1)

5.3 類似の試験

MIL-STD-461G RS101^[3] や ISO 11452-8^[4] はこの規格の磁界に対する試験と似た試験を含む。

ISO 11452-9^[5] もこの規格の放射 RF 電磁界に対する試験と同様に近傍での無線送信の影響の評価のための使用が意図されているが、この規格では少なくとも現時点では高い周波数範囲のみがカバーされている。また、試験法も試験用アンテナもこの規格のものとは全く異なり、照射される電磁界についても、インピーダンスは 377Ω に近くなるようにされており、その分布は不均一で、周波数による、また距離による挙動の変化も大きなものとなることが予期される。^{[8]†14}

6 参考資料

- [1] IEC 61000-4-39:2017, *Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-39: Testing and measurement techniques — Radiated fields in close proximity — Immunity test*
- [2] IEC 61000-4-3 の概要 — 無線周波放射電磁界に対するイミュニティ試験の方法, 株式会社 e・オータマ 佐藤, 2024, <https://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html>
- [3] 軍需機器の EMC — MIL-STD-461G の概要 — Part 2: 主なサセプティビリティ要求 (CS101, CS109, CS114, CS115, CS116, CS118, RS101, RS103), 株式会社 e・オータマ, 2021, <https://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html>
- [4] ISO 11452-8 の概要 — 車載機器のイミュニティ試験 (磁界), 株式会社 e・オータマ, 2024, <https://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html>
- [5] ISO 11452-9 の概要 — 車載機器のイミュニティ試験 (可搬型送信機), 株式会社 e・オータマ, 2024, <https://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html>
- [6] IEC 60601-1-2:2014+A1:2020 (ed. 4.1) の概要, 株式会社 e・オータマ, 2017–2023, <https://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html>

†14 ISO 11452-9 では試験対象の機器の近傍に置かれた試験用のダイポール・アンテナやスリーブ・アンテナからの照射が行なわれ、そのアンテナと似た挙動を示すアンテナを用いた無線機送信機がそれと同等の位置に置かれた状況を素直に模擬するものが見ることができるかも知れない。だが、この試験法では電磁界のインピーダンスやパターンは周波数や機器との位置関係などに応じて様々に変化し、その影響で変則的な挙動を生じるかも知れない。

- [7] 近接放射イミュニティ試験に用いる TEM ホーンの開発, 張間 勝茂 他, 情報通信研究機構研究報告 Vol.69 No.1 (2023),
https://www.nict.go.jp/publication/shuppan/kihou-journal/houkoku69-1_HTML/2023E-02-02.pdf
- [8] *Radiation Characteristics of TEM Horn and Broadband Sleeve Antennas Used for Near-Field Radiated Immunity Test*, Takayuki Kubo et al., EMC Japan/APEMC Okinawa, 2024,
<https://doi.org/10.23919/EMCJapan/APEMCOkinaw58965.2024.10585147>
- [9] *Technical article: Coil off axis magnetic field using elliptic integrals and Maxwell method with C++ code*, Javier Luis López, 2014, DOI: [10.13140/2.1.4571.3926](https://doi.org/10.13140/2.1.4571.3926)