

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 佐藤智典

2024 年 11 月 13 日

目次

1	はじめに	1
1.1	概要	1
2	主な使用機器	2
2.1	120 mm 放射ループ	2
2.2	ヘルムホルツ・コイル	4
2.3	磁界強度モニタ	5
2.4	信号発生器、増幅器	6
2.5	電流計	6
3	試験	6
3.1	共通事項	6
3.1.1	試験セットアップ	6
3.1.2	試験の実施	6
3.2	放射ループ法	7
3.2.1	放射ループの確認	7
3.2.2	DUT の試験	7
3.3	ヘルムホルツ・コイル法	7
3.3.1	ヘルムホルツ・コイルの確認	7
3.3.2	DUT の試験	7
4	補足	8
4.1	磁界の算出	8
4.1.1	放射ループ	8
4.1.2	ヘルムホルツ・コイル	9
4.2	人体の曝露	9
5	参考資料	10

1 はじめに

本稿では、ISO 11452 シリーズで定められた車載機器のイミュニティ試験の方法のうち、低周波磁界に対するイミュニティの試験法に関して定めた ISO 11452-8:2015^[1] の概要を述べる。

なお、本稿はこれらの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。規格についての正確な情報は該当する規格そのもの^[1] を参照されたい。

1.1 概要

車載機器は車両の内外の様々な発生源からの磁界に曝される可能性がある。

例えば送電線の下、発電/配電設備やその他の電力設備、鉄道施設の近傍などを走行している際には相当の強さの電源周波磁界に曝される可能性がある。また、電気自動車やハイブリッド自動車は高容量のバッテリーや強力なインバータやモータを搭載しているし、内燃機関駆動車両においても電力の使用は増大する傾向にあり、車両上のそのような機器やハーネスが発生する磁界がその車両上の他の機器に影響を与えることも考えられる。

この規格はこのような比較的低い周波数の磁界の影響の評価を目的としたものである。従来は 15 Hz ~ 150 kHz の交番磁界のみがカバーされていたが、ISO 11452-8:2015 では例えば電気自動車の直流電源系や磁石から発生するかも知れないような DC (0 Hz) の磁界もカバーされるようになっている。

一般的な電子回路はこのような周波数の磁界に対してそれほど敏感ではないので、この試験は磁界に対して敏感な部品や回路を使用しているものに対してのみ行なわれるかも知れない。磁界の影響を受けるかも知れないものの代表例は、磁気センサやピックアップ・コイルなどを用いて低レベルの磁界を検出しようとしているものである。



図 1: 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)

2 主な使用機器

2.1 120 mm 放射ループ

放射ループ法 (§3.2) で用いる放射ループは標準的には下記のようなもので、これは MIL-STD-461G RS101^[3] で用いられる放射ループと同様のものとなる:

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

このような放射ループ (及び 40 mm センサ・ループ (§2.3)) の例を図 1 に示す。

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る。ⁱ¹

この規格で示されている最大の試験レベル (図 8) は 3000 A/m でその発生に必要な電流は 40 A 程度、交番磁界については最大の試験レベルは 1000 A/m でその発生に必要な電流は 13 A 程度となる。

また、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 150 kHz で 10 A/m を発生させる時で、こ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、10 A/m を発生させるために必要な電流は 0.13 A 程度、従って必要な電圧は 10 V 程度と推定される (図 5)。

こ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) の分布を求めたものを 図 2 に示す。ここで、磁界の強さは中心軸

ⁱ¹ 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。

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。ⁱ²

この分布から、放射ループの面から 50 mm の距離での $|H|$ は 100 mm \times 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。この放射ループの中心軸に沿っての、すなわち DUT 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 4 に示すが、磁界を遮るものがない場合でも DUT 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ばそれに応じて得られる磁界も弱くなる。

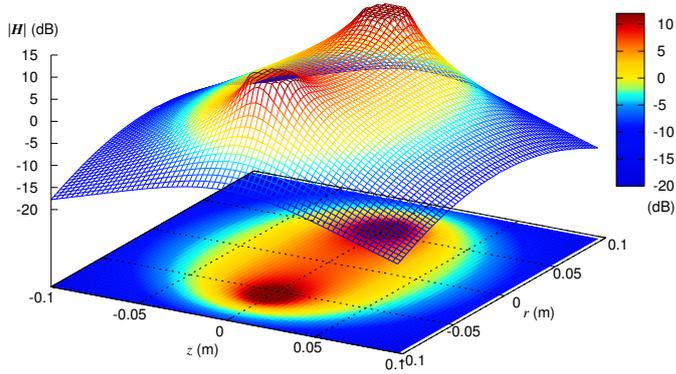
また、この種の放射ループは照射範囲内でループの面と直交する方向の磁界を発生するとみなされることがあるが、中心軸から離れるのに応じてその位置での磁界全体 (H) のうちに占めるループの面と直交する方向の成分 (H_z) の割合は低下し、従って目標レベルに近い H_z を得られる範囲はさらに狭くなる (図 2)。

従って、規格上はこの試験法は大きな DUT にも適用できるものの、磁界の影響を評価したい部分が大きな DUT の内側にある場合は放射ループをどの位置に置いても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。このため、この試験法を大きな DUT に適用しようとする場合、その方法で評価を意図したように行なえるかどうかを考慮することが望ましくそうである。

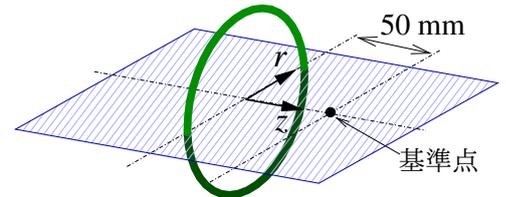
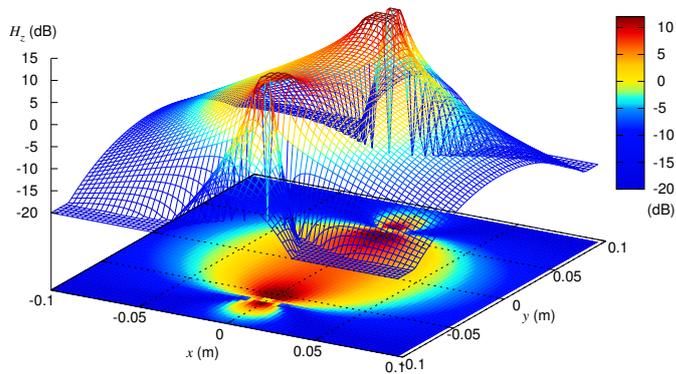
規格ではこれと異なる放射ループの使用も許容されてはいるが、ループの大きさが異なると磁界の分布も異なったものとなるため、異なる大きさの、特にこれよりも小さい放射ループ (磁界の拡がりの方が小さくなる) の使用は好ましくないように思われる。

ⁱ² 放射ループやヘルムホルツ・コイル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。^[6]

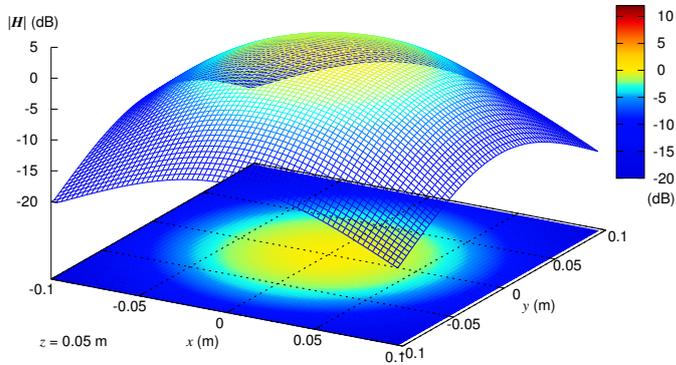
$|H|$, 放射ループの面と直交するその中心を通る面



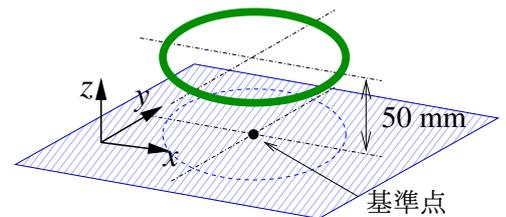
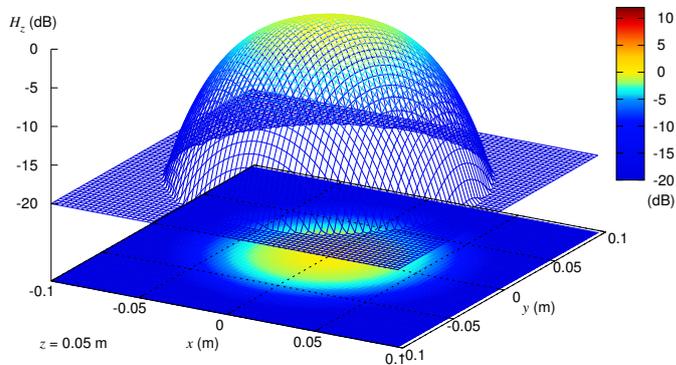
H_z , 放射ループの面と直交するその中心を通る面



$|H|$, 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 2: 120 mm 放射ループからの磁界の強さの分布

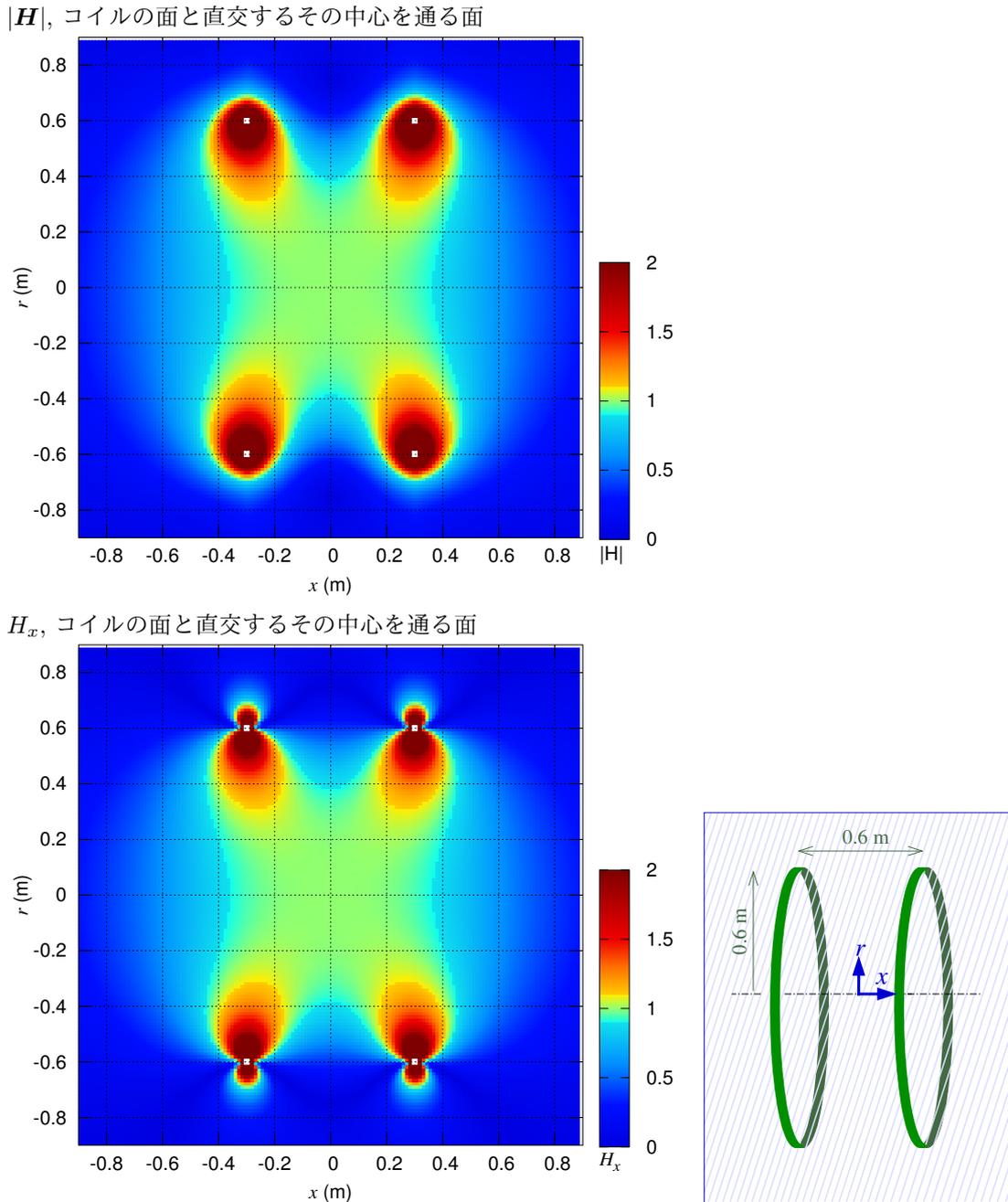


図 3: 直径 1200 mm のヘルムホルツ・コイルの磁界の強さの分布

2.2 ヘルムホルツ・コイル

ヘルムホルツ・コイル法 (§3.3) では試験に必要な要求 (主に、均一磁界領域の大きさ、また周波数範囲と発生可能な磁界の強度) を満たす任意の大きさのヘルムホルツ・コイルを使用することができる。

ヘルムホルツ・コイルは同一形状のコイル 2 つを適切な距離離して平行に配置したもの^{†3}で、その内

側の空間にかなり均一性の高い、またほぼ軸方向の成分のみから成る磁界を発生させることができる。

ヘルムホルツ・コイルの中心における磁界の強さ H (A/m) は、コイルに流す電流を I (A)、コイルの半径 (= コイル間の距離) を R (m)、各コイルの

^{†3} ヘルムホルツ・コイルは教義では同一半径のコイル 2 つを半径と同じ距離離して平行に配置したものを指すが、コイルの

あいだの距離を半径とは異なる (通常は半径よりも大きい) 距離としたものや矩形のコイル 2 つを用いたものなどが用いられることもある。

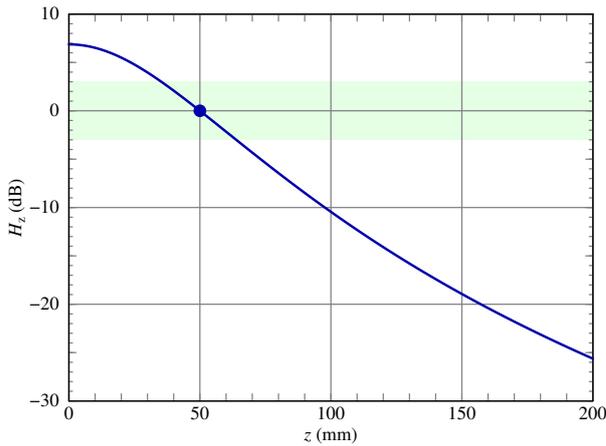


図 4: 120 mm 放射ループの中心軸に沿った磁界の強さの変化

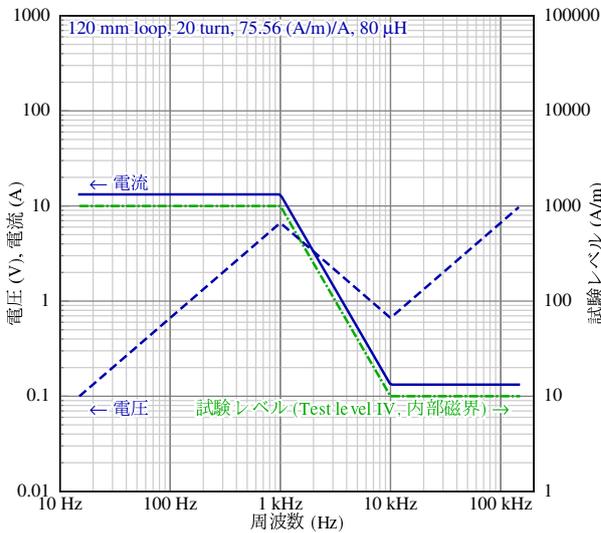


図 5: 120 mm 放射ループの駆動電圧、電流の例 (Test level IV)

巻き数を N として、

$$H = 0.7155 \times NI/R$$

から求めることができる。

寸法が同じ場合、巻き数を増やせば低い電流で高い磁界を発生させられるようになるが、インダクタンスが増加するため高い周波数での駆動に必要な電圧が高くなり^{†4}、自己共振周波数も低下するため、高い周波数での使用に適さなくなる可能性がある (図7)。市販のヘルムホルツ・コイルの仕様にはこれに関連する情報も含まれていると思われる。

^{†4} 同じ磁界を得るために必要な電流は巻き数に反比例して低下するが、インダクタンスは (従ってリアクタンスは) 巻き数の自乗に比例して増加し、従って同じ磁界を得るために必要な電流は巻き数に比例して増加する。



図 6: ヘルムホルツ・コイルの例 (写真は Schwarzbeck 社の厚意による)

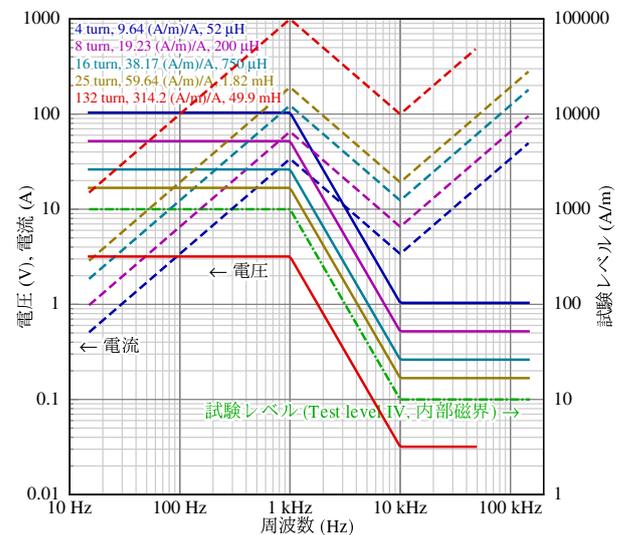


図 7: 直径 600 mm のヘルムホルツ・コイルの駆動電圧、電流の例 (Test level IV) — 市販のヘルムホルツ・コイルの仕様に基づくが、電流や電圧の許容限度は無視している

ヘルムホルツ・コイルの例を図6に示す。また、半径 0.6 m、コイル間隔 0.6 m のヘルムホルツ・コイルが発生する磁界の強さの分布を推定したものを図3に示すが、コイルに囲まれた領域の多くで中心における磁界の強さの $\pm 10\%$ の範囲内の磁界を得られることがわかるだろう。

2.3 磁界強度モニタ

試験システムの確認 (§3.2.1, §3.3.1) に用いる磁界強度モニタは以下のようなものである:

- DC 磁界

ホール・センサを用いた適切な磁界測定器

- 交番磁界 ($f \geq 15$ Hz)

次のような、MIL-STD-461G RS101^[3] で示されているものと同様のセンサ・ループの使用が推奨される:

- 直径: 40 mm
- 巻き数: 51
- ワイヤ径: 約 0.071 mm (41 AWG×7 本)
- 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 (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^{†5}

2.4 信号発生器、増幅器

試験に必要な周波数範囲に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することが必要となる。場合によっては直列に適当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。

DC の磁界の発生では、可変定電流電源を、あるいは可変低電圧電源を必要に応じて適当な抵抗値と電力定格の抵抗とともに用いることができるだろう。

2.5 電流計

電流の測定には、必要な周波数範囲、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。

^{†5} 巻き数 N 、断面積 A (m^2) 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。

3 試験

3.1 共通事項

3.1.1 試験セットアップ

放射ループやヘルムホルツ・コイルはそのコイルの面がそれと平行する金属面から 1 m 以上離れるように配置する。また、試験機器 (信号源など) から 2 m 以上離すべきである。^{†6}

この試験では DUT の下にグランドプレーンがある必要はない。また、DUT を置く台の高さも規定されておらず、DUT を適当な位置に (例えばヘルムホルツ・コイル法の場合はヘルムホルツ・コイルの中央付近に) 置くために必要な高さの非導電性、低誘電率の台を用いれば良い。金属面 (例えばグランドプレーンの床) の上で放射ループ法で DUT の上面からの照射を行なう場合は、その上に下を向けて置かれる放射ループを金属面から 1 m 以上離すために DUT は 1 m 弱の台の上に置くことが必要となるだろう。

周辺機器は DUT から離して、テスト・プランでそのように指定されていればグランドプレーンの上に配置する。ISO 11452 シリーズの他の規格の多くと異なり、この試験に関しては AN (artificial network) の使用の要求はない。

3.1.2 試験の実施

他の条件が規定されていない限り、それぞれの位置で、下記のそれぞれの周波数で所定の強さの磁界 (図 8) をあらかじめ規定したドウェル・タイムのあいだ照射する:

- DC (0 Hz)、16.67 Hz、50 Hz、60 Hz、150 Hz、及び 180 Hz のそれぞれについて、また
- 15 Hz から 150 kHz までの周波数範囲を表 1 で示した周波数ステップを超えないステップでリニアで、あるいは対数で掃引して。

この規格では変調の適用は規定されていない。

ドウェル・タイムは最小 1 秒とし、妨害に対する DUT の応答を確実に確認できるように必要に応じて長くする。

^{†6} 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。

規格にはそれに関する記載は見当たらなかったものの、DC (0 Hz) の磁界の照射は双方の極性で行なうべきであろう。

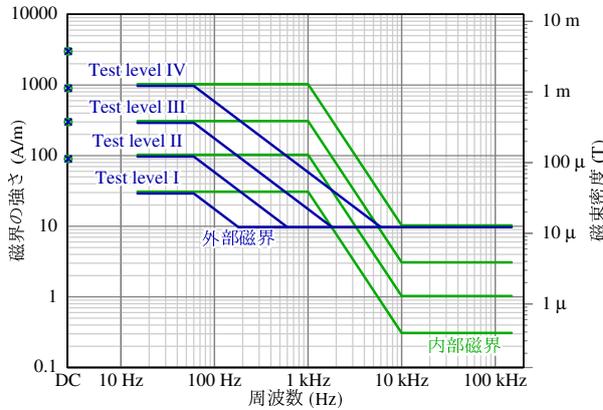


図 8: 試験レベルの例

周波数範囲 (kHz)	リニア・ステップ (kHz)	対数ステップ (%)
0 (d.c.)	—	—
0.015~0.1	0.01	10
0.1~1	0.1	10
1~10	1	10
10~150	10	10

表 1: 周波数ステップ

3.2 放射ループ法

放射ループ法では DUT の外面の様々な位置から 50 mm の距離に放射ループ (§2.1) を置いて磁界の照射を行なう。

3.2.1 放射ループの確認

放射ループ (§2.1) の確認は、放射ループの中心軸上、50 mm の距離に磁界強度モニタ (§2.3) を置き、単一の周波数 (例えば 1 kHz)、及び直流で所定の磁界を得るために必要な電流を測定し記録することによって行なう (図 9)。

3.2.2 DUT の試験

放射ループ (§2.1) をそれぞれの試験箇所の表面から 50 mm の距離に置き (図 10)、§3.1.2 で述べた

ようなそれぞれの周波数で試験レベルに対応した電流を放射ループに流して磁界を発生させ、DUT への影響を確認する。

DUT の面は、図 13 のように 100 mm × 100 mm よりも大きくないウィンドウに分割し、それぞれの位置に放射ループを置いて試験する。

また、DUT のそれぞれのコネクタの位置に、そもそも磁気センサが含まれていればその位置に放射ループを置いて試験する。

3.3 ヘルムホルツ・コイル法

ヘルムホルツ・コイル法での試験ではヘルムホルツ・コイル (§2.2) の内側の均一磁界領域に DUT を置いて磁界に曝す。

この試験法では DUT の全体をかなり均質な、また任意の方向の磁界 (通常は直交する 3 つの方向の) に曝すことができ、DUT 全体をカバーするために位置を変えて試験を繰り返す必要もない。だが、大きな DUT の試験のためには大きなヘルムホルツ・コイルが必要となる。また、インダクタンスが大きく、また自己共振周波数が低くなる傾向があり、高い周波数までの使用には適さない。

3.3.1 ヘルムホルツ・コイルの確認

ヘルムホルツ・コイル (§2.2) の確認は、ヘルムホルツ・コイルの中心に磁界強度モニタ (§2.3) を置き、所定の磁界を得るために必要な電流を測定し記録することによって行なう (図 11)。

3.3.2 DUT の試験

ヘルムホルツ・コイル (§2.2) の均一磁界領域に DUT を置き (図 12)、§3.1.2 で述べたようなそれぞれの周波数で試験レベルに対応した電流をヘルムホルツ・コイルに流して磁界を発生させ、DUT への影響を確認する。

この試験は直交する 3 つの方向 (X, Y, Z) で行なう。

一般に、コイルの半径の 1/1.5 程度の直径、また厚さの領域を均一磁界領域として扱うことができ、この領域では ±10 % よりも良い均一性のほぼ軸方向の成分から成る磁界を得ることができる (図 3)。

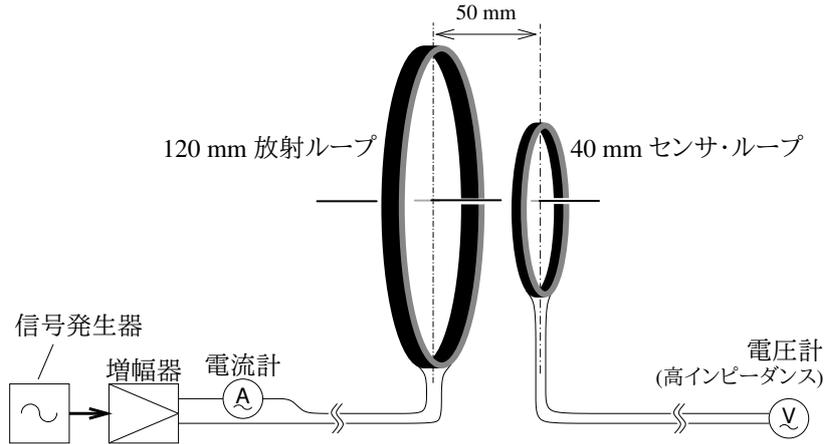


図 9: 120 mm 放射ループの確認のセットアップの例

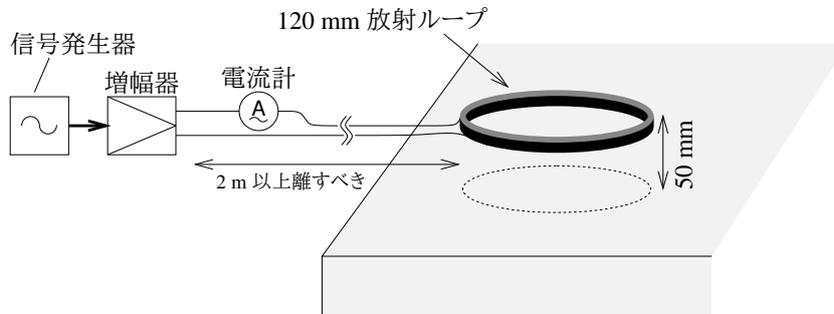


図 10: 放射ループ法 — 試験セットアップのイメージ

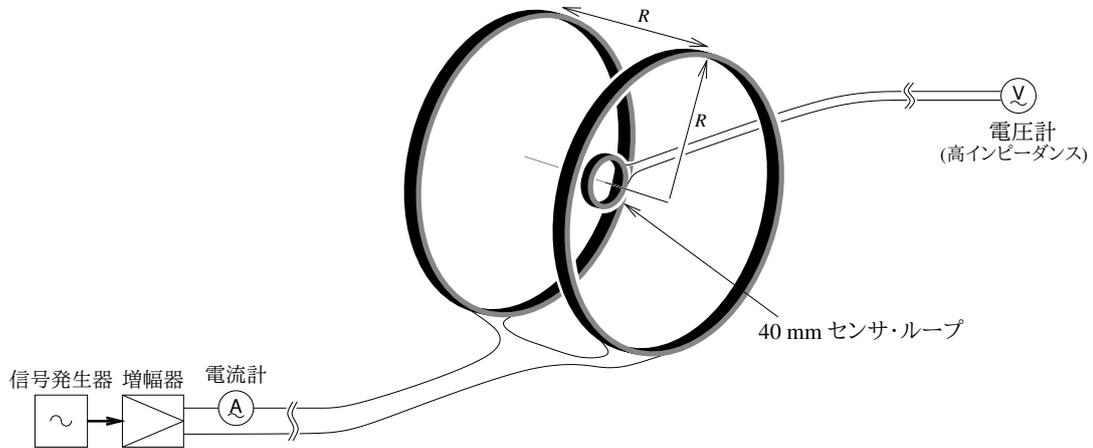


図 11: ヘルムホルツ・コイルの確認のセットアップの例

4 補足

4.1 磁界の算出

4.1.1 放射ループ

図 14 で図示したような、電流 I が流れる半径 a のループの中心から軸方向の距離 x 、中心軸からの距離 r の点 P における軸方向の磁界の強さ H_x 、及

び半径方向の磁界の強さ H_r は [6]、

$$H_x = H_0 \frac{1}{\pi\sqrt{Q}} \left[E(k) \frac{1 - \alpha^2 - \beta^2}{Q - 4\alpha} + K(k) \right]$$

$$H_r = H_0 \frac{\gamma}{\pi\sqrt{Q}} \left[E(k) \frac{1 + \alpha^2 + \beta^2}{Q - 4\alpha} - K(k) \right]$$

但し、

$$\bullet \alpha = \frac{r}{a}, \beta = \frac{x}{a}, \gamma = \frac{x}{r}$$

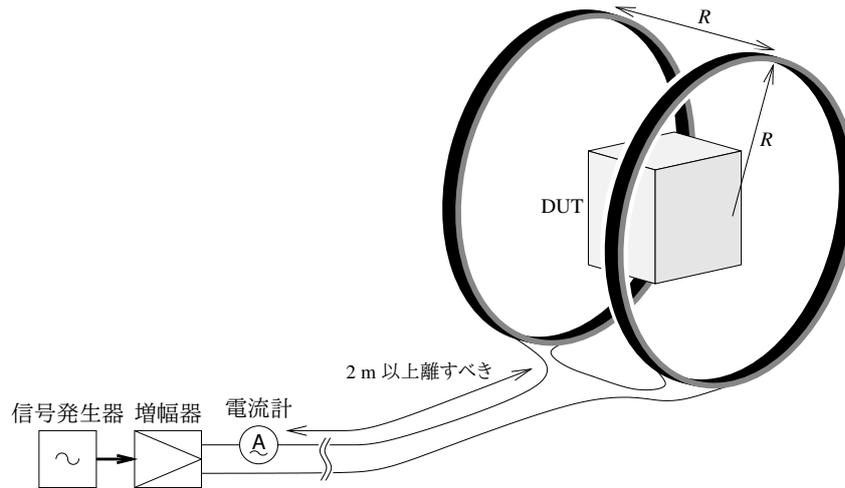


図 12: ヘルムホルツ・コイル法 — 試験セットアップのイメージ

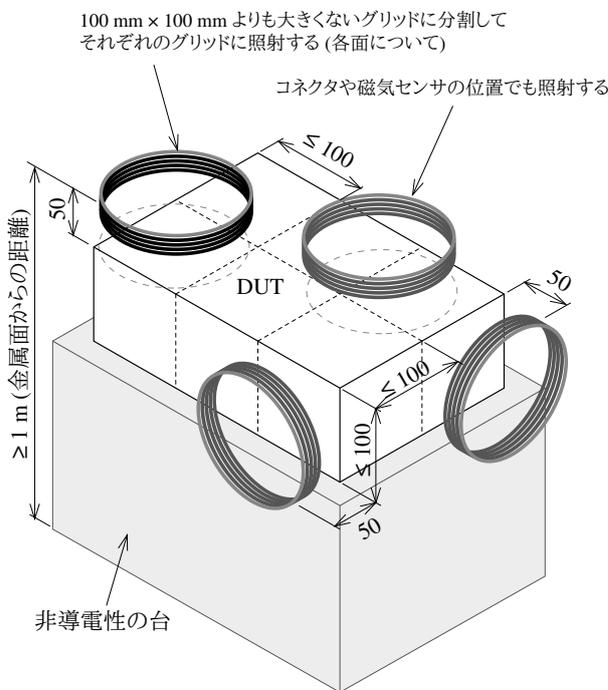


図 13: 放射ループ法 — 試験時の放射ループの配置の例

- $Q = [(1 + \alpha)^2 + \beta^2]$
- $k = \sqrt{\frac{4\alpha}{Q}}$
- H_0 はループの中心の磁界の強さで、 $H_0 = \frac{I}{2a}$
- $K(k)$ は第 1 種完全楕円積分で、

$$K(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta}}$$
- $E(k)$ は第 2 種完全楕円積分で、

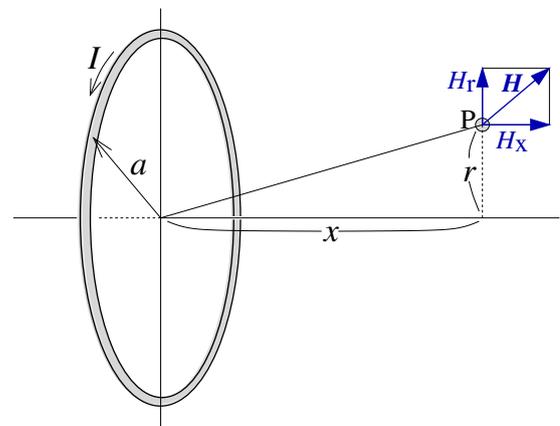


図 14: 放射ループが発生する磁界

$$E(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta} d\theta$$

点 P における磁界は $\mathbf{H} = \mathbf{H}_x + \mathbf{H}_r$ で、その大きさは $|\mathbf{H}| = \sqrt{H_x^2 + H_r^2}$ となる。

4.1.2 ヘルムホルツ・コイル

ヘルムホルツ・コイルの内部や周囲における磁界は、前項で述べたような単一のコイルからの磁界の加算として求めることができる。

4.2 人体の曝露

この規格で示されている低周波磁界に対する試験レベル (図 8) は ICNIRP ガイドライン^[4] で示されている参考レベルを超えることが、(図 15)、そして

放射源の近傍ではそれよりも強い磁界が発生する可能性がある。

磁界の放射源が 120 mm 放射ループのように小さい場合には磁界がそのような強いものとなるのは放射源のごく近傍のみの、非常に局所的なものとなる (図 16)。従って、電流を流した放射ループを頭部や体幹に近付けるのは避けた方が良くであろうが、それさえ気をつけていれば試験中の (図 1 のような放射ループの軸を手で持って照射を行なったとしても) 作業者の曝露を過度に心配する必要は低そうに思われる。

だが、ヘルムホルツ・コイル法では通常はかなり大きなコイルが用いられ、このようなコイルはより広い空間に高いレベルの磁界を発生する (例えば直径 1200 mm のヘルムホルツ・コイルで試験レベル 1000 A/m の放射を行なうと概ね半径 1 m の球状の空間の中の磁界が 200 A/m を超える — 図 17) ので、そのようなコイルで高いレベルの試験を行なおうとする場合は人がコイルに近付かないように注意した方が無難だろう。

磁界はペースメーカーや除細動器などの植え込み型医用機器にも影響を与えることがある (しばしば 5 ガウス (0.5 mT, 約 400 A/m) という値が通常の使用環境の上限として示されている) ので、植え込み型医用機器を使用している人の接近にも注意すべきである。^{†7} また、腕時計^{†8} や磁気カードなどもコイルに近付けないようにした方が良くだろう。

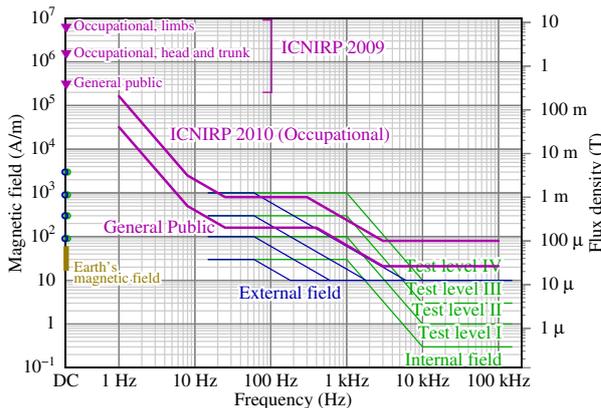


図 15: 試験レベル (図 8) と ICNIRP LF ガイドライン (2010)^[4] 参考レベル及び ICNIRP 静磁界ガイドライン (2009)^[5] 曝露限度

^{†7} この種のデバイスは強い磁気を受けるとマグネット・モードと呼ばれる特殊なモードに入っていることも多い。

^{†8} JIS B 7001 (時計 — 試験方法) では 1600 A/m の耐磁性が求められている。

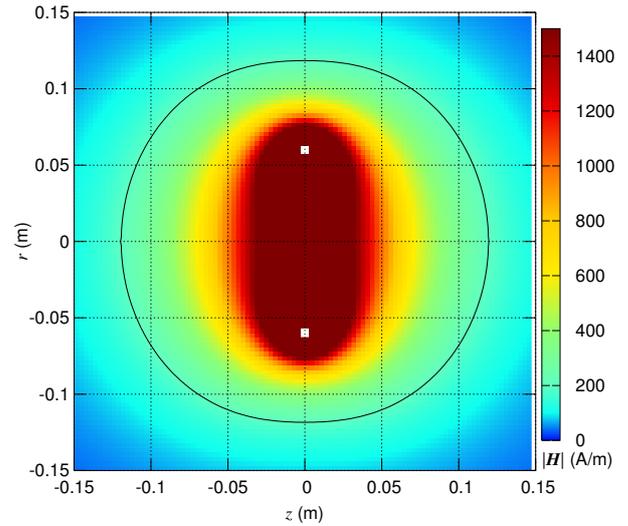


図 16: 試験レベル 1000 A/m (Test level IV, 1 kHz) での 120 mm 放射ループの周囲の電磁界 — 実線は 200 A/m のラインで、概ねこれよりも外は ICNIRP 2010 LF ガイドライン (2010)^[4] の 1 kHz の磁界に対する労働者に対する参考レベル (図 15) を下回る

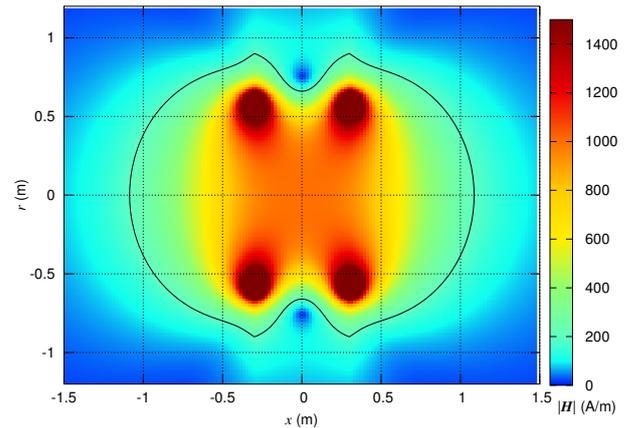


図 17: 試験レベル 1000 A/m (Test level IV, 1 kHz) での直径 1200 mm のヘルムホルツ・コイルの周囲の電磁界 — 実線は 200 A/m のラインで、概ねこれよりも外は ICNIRP 2010 LF ガイドライン (2010)^[4] の 1 kHz の磁界に対する労働者に対する参考レベル (図 15) を下回る

5 参考資料

- [1] ISO 11452-8:2015, *Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 8: Immunity to magnetic fields*
- [2] ISO 11452-1:2015, *Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — General principles and terminology*

- [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] *Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz – 100 kHz)*, Health Physics 99 (6): 818-836, ICNIRP, 2010,
<https://www.icnirp.org/en/publications/>
- [5] *ICNIRP Guidelines on Limits of Exposure to Static Magnetic*, Health Physics 96 (4): 504-514, ICNIRP, 2009,
<https://www.icnirp.org/en/publications/>
- [6] *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)