

# IEC 61000-4-21 の概要 — リバブレーション・チャンバ試験法

株式会社 e・オータマ 佐藤智典

2026年4月20日

## 目次

1	概要	1
2	チャンバの検証	2
2.1	モード同調動作のためのリバブレーション・チャンバの検証	2
2.1.1	バリデーション: チャンバ電界均一性とローディングの検証	2
2.1.1.1	電界均一性の検証	2
2.1.1.2	均一性要求: 標準偏差 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma$	4
2.1.1.3	受信アンテナ検証係数 $AVF$ の算出	5
2.1.1.4	チャンバ挿入損失	5
2.1.1.5	チャンバ最大負荷の検証	5
2.1.2	バリデーション: EUT がある状態でのチャンバの検証	5
2.1.3	品質係数 $Q$ と時定数 $\tau$ の検証	6
2.2	モード攪拌動作のためのリバブレーション・チャンバの検証	6
2.2.1	攪拌速度の上限	7
3	放射イミュニティ試験	7
3.1	試験セットアップ	7
3.2	検証	8
3.3	試験手続き	8
3.3.1	チャンバ入力電力要求の決定	8
3.3.2	周波数掃引パラメータの選択	8
3.3.2.1	一般	8
3.3.2.2	離散周波数試験	8
3.3.2.3	周波数掃引試験	8
3.4	試験の実施	9
3.5	試験報告書	9
4	放射エミッション測定	9
4.1	試験セットアップ	10
4.2	検証	10
4.3	放射エミッション試験手続き	10
4.3.1	放射電力の特定	10
4.3.2	自由空間 (遠方) 電界の推定	11
4.3.3	EUT が発生する半自由空間 (遠方) フィールドの推定	11
4.3.4	最大方向性	12
4.4	試験報告書	12
5	参考資料	12

## 1 概要

IEC 61000-4-21 はリバブレーション・チャンバを用いた試験法に関する規格で、様々な試験法が扱われている:

- チューナ/スターラを各ステップで静止させるモード同調 (mode tuned) 動作<sup>1)</sup>に加え、チューナ/スターラを連続的に回転させるモード攪拌 (mode stirred) 動作での試験についても述べられている。
- 放射イミュニティ試験のみでなく、次のような試験法も含む:
  - 放射イミュニティ試験 (規定)
  - 放射エミッション測定 (規定)
  - ケーブル・アセンブリ、ケーブル、コネクタ、ウェーブガイド、(情報) 及び受動マイクロ波コンポーネントの遮蔽効果測定
  - ガasketと素材の遮蔽効果測定 (情報)
  - エンクロージャの遮蔽効果測定 (情報)
  - 等々...

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 61000-4-21:2011<sup>[1]</sup> のうち、チャンバの検証、及び放射イミュニティ試験法と放射エミッション測定法の概要を述べる。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<sup>[1]</sup>を参照していただきたい。

表 1: サンプリング要求

周波数範囲	検証と試験のために必要な最小サンプル数 <sup>a d</sup>	検証のために必要な最小周波数数 <sup>b</sup>
$f_s \sim 3 f_s$ <sup>c</sup>	12	20
$3 f_s \sim 6 f_s$	12	15
$6 f_s \sim 10 f_s$	12	10
$> 10 f_s$	12	20/decade

<sup>a</sup> 全ての周波数についてチューナの最小のステップ数は 12 である。多くのチャンバでは低い周波数ではチューナのステップ数を増やす必要があるだろう。チューナの最大ステップ数はそのチューナで発生可能な独立したサンプルの数である。この数は周波数によって変わり、チャンバの立ち上げに際して確認する必要がある。チャンバが均一性要求を満たさない場合、チューナのステップ数を独立したチューナ・サンプル数まで増やして良い。

<sup>b</sup> ログ間隔

<sup>c</sup>  $f_s$  は開始周波数

<sup>d</sup> チャンバの検証に用いられたチューナのシーケンスはそれ以降の試験と同一でなければならない。

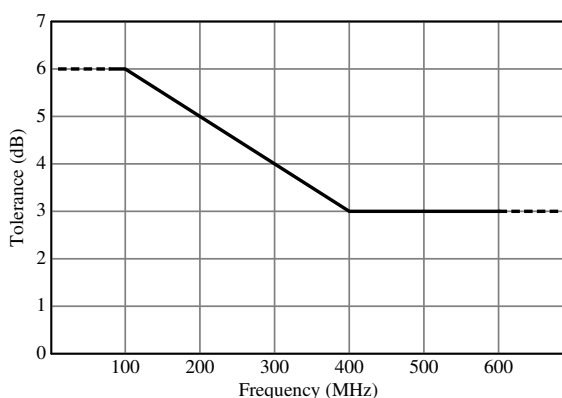


図 1: 電界均一性許容差要求 (IEC 61000-4-21 Table 2 より) — 標準偏差の上限

## 2 チャンバの検証

### 2.1 モード同調動作のためのリバブレーション・チャンバの検証

#### 2.1.1 バリデーション: チャンバ電界均一性とローディングの検証

##### 2.1.1.1 電界均一性の検証

図 2 に示すように、

- (1) ワーキング・ボリウムを空の状態とする。
- (2) 送信アンテナをワーキング・ボリウムの外の選択された位置に配置する。

送信アンテナはワーキング・ボリウムを直接照射してはならず、可能であればチャンバの

角に向けるべきである。このアンテナをチューナーに向けることも許容できる。<sup>†2</sup>

- (3) 最小試験周波数  $f_s$  から  $10f_s$  までの周波数範囲について、ワーキング・ボリウムの頂点の 8 箇所 ( $N = 8$ ) の電界プローブ位置それぞれ (位置  $i$ ,  $1 \leq i \leq N$ ) で、

- (a) 等方性電界プローブを選択された位置に置く。
- (b) 受信アンテナをワーキング・ボリウム内に置く。

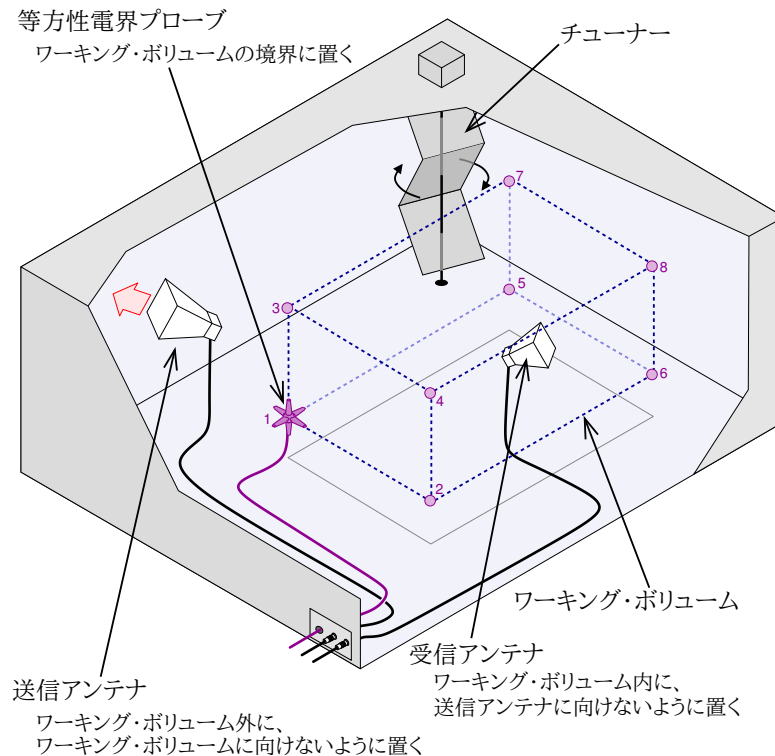
受信アンテナはプローブの位置のそれぞれの変更毎にワーキング・ボリウム内の新たな位置、それ以前の全ての位置から少なくとも  $\lambda/4$  (あるいはもし最低試験周波数で  $\lambda/4 > 1 \text{ m}$  ならば  $1 \text{ m}$ ) 離れた位置に動かすべきである。アンテナとプローブのあいだの距離にもこれと同じ最小距離を適用すべきである。

アンテナはチャンバの軸に対して新たな向き (各軸について少なくとも  $20^\circ$ ) に向けるべきでもある。

- (c) 表 1 で示した対数間隔のステップの各評価周波数について、
  - i. 信頼できるプローブの読みを得るために適切な入力電力を送信アンテナ

<sup>†1</sup> ISO 11452-11<sup>[4][5]</sup> で用いられるものと同様のもの。

<sup>†2</sup> [6] では送信アンテナの位置や向きはあまり重要ではないことを示唆するデータが示されている。また、偏波はランダム化されるので、アンテナの偏波面は任意の方向に向けることができる。



NOTE 1: リバブレーション・チャンバ内の電界の検証は 8 つのプローブ位置で行なうべきである。

NOTE 2: これらの位置はチャンバの「ワーキング・ボリューム」として知られる空間を囲む。ワーキング・ボリュームを囲む面はチャンバのいずれの面、電界発生アンテナ、またチューナ・アセンブリから 1 m よりも近くないことが推奨される。検証や監視のための受信アンテナはワーキング・ボリューム内の任意の位置に置いて良い。送信アンテナは可能であればチャンバの隅に向けてのべきであり、このアンテナをチューナに向けることも許容できる。送信アンテナの位置は検証と試験で同一のままとすべきである。

NOTE 3: ワーキング・ボリュームはチャンバの最大ワーキング・ボリュームに合わせた大きさとしても試験されるアイテムに合わせた大きさとしても良い。ワーキング・ボリュームを最大ワーキング・ボリュームに合わせた大きさとするのが推奨される; さもなくば、より大きなアイテムを試験しようとするならば新たな検証が必要となるであろう。ワーキング・ボリュームは直方体である必要はない。任意形状のためには、そのワーキング・ボリュームを正しく規定するために検証ポイントを追加することが必要となるかも知れない。

NOTE 4: 検証の実施のためには 3 軸それぞれへのアクセスが可能な等方性プローブを用いるべきである。それぞれの測定箇所についてそのダイポール・アンテナが 3 つの互いに直交する向きに置かれる限り、校正された電氣的に短い (すなわち  $\lambda/3$  よりも短い) ダイポール・アンテナで代用できる。ダイポールが接続ケーブルの影響を受けないことを確かとするように注意すべきである。光絶縁された測定系 (等方性プローブやダイポール) が推奨される。

NOTE 5: その離隔が最小試験周波数での  $\lambda/4$  よりも大きい限り、最小離隔距離を小さくしても良い。いかなる場合も  $\lambda/4$  よりも小さい離隔距離は推奨されない。

図 2: チャンバ検証のためのプローブ位置

- に注入するように RF 発生器を調整する。
- ii. それぞれのステップで受信アンテナで受信された信号レベルと電界プローブでの測定値を取り込むために必要な時間以上ドウェルさせながら、チューナを少なくとも 表1 で示した等間隔のステップで  $360^\circ$  の範囲でステップさせる (モード同調動作)。
  - iii. チューナが 1 回転するあいだの以下の値を記録する:
    - 受信アンテナで受信された信号の最大と平均 (リニア・アベレージ、すなわち dBm ではなく W) の電力 ( $P_{\text{MaxRec } i}$ ,  $P_{\text{AveRec } i}$ )
    - 電界プローブの各軸の最大電界強度 ( $E_{\text{Max } x, i}$ ,  $E_{\text{Max } y, i}$ ,  $E_{\text{Max } z, i}$ )
    - 入力電力の平均値 ( $P_{\text{Input } i}$ )
  - iv. 電界プローブの各軸で測定された最大値  $E_{\text{Max } x, i}$ ,  $E_{\text{Max } y, i}$ ,  $E_{\text{Max } z, i}$  を送信アンテナへの平均進行波電力  $P_{\text{Input } i}$  の平方根で正規化し、各軸の電界の測

定値の正規化された最大値  $\ddot{E}_{x,i}$ ,  $\ddot{E}_{y,i}$ ,  $\ddot{E}_{z,i}$  を得る:

$$\ddot{E}_{x,i} = \frac{E_{\text{Max } x,i}}{\sqrt{P_{\text{Input } i}}}$$

$$\ddot{E}_{y,i} = \frac{E_{\text{Max } y,i}}{\sqrt{P_{\text{Input } i}}}$$

$$\ddot{E}_{z,i} = \frac{E_{\text{Max } z,i}}{\sqrt{P_{\text{Input } i}}}$$

- (4)  $10f_s$  から上の周波数範囲について、ワーキング・ボリュームの中心を含む 3 箇所 ( $N = 3$ ) の電界プローブ位置それぞれで (3) からと同様の作業を繰り返す。

#### 2.1.1.2 均一性要求: 標準偏差 $\sigma_x$ , $\sigma_y$ , $\sigma_z$ , $\sigma$

- (1)  $f \leq 10f_s$  となる各周波数、またプローブの各軸について、 $N = 8$  箇所のプローブ位置における各軸の電界の測定値の正規化された最大値  $\ddot{E}_x$ ,  $\ddot{E}_y$ , 及び  $\ddot{E}_z$  の平均  $\langle \ddot{E}_x \rangle_N$ ,  $\langle \ddot{E}_y \rangle_N$ , 及び  $\langle \ddot{E}_z \rangle_N$  を求める:


$$\langle \ddot{E}_x \rangle_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ddot{E}_{x,i}$$

$$\langle \ddot{E}_y \rangle_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ddot{E}_{y,i}$$

$$\langle \ddot{E}_z \rangle_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ddot{E}_{z,i}$$

- (2) 各軸 (すなわちそれぞれの直交成分) に同じ重み付けをしての全ての電界プローブ測定値の正規化された最大値の平均値、 $\langle \ddot{E} \rangle_{3N}$  ( $f \leq 10f_s$  では  $N = 8$ ,  $10f_s < f$  では  $N = 3$ ) は:

$$\langle \ddot{E} \rangle_{3N} = \frac{1}{3N} \left( \sum_{i=1}^N \ddot{E}_{x,i} + \sum_{i=1}^N \ddot{E}_{y,i} + \sum_{i=1}^N \ddot{E}_{z,i} \right)$$

- (3)  $f \leq 10f_s$  となる各周波数について以下のように標準偏差を求め、 に図示した許容値と比較する:

- (a) 各軸の電界の測定値の正規化された最大値  $\ddot{E}_{x,i}$ ,  $\ddot{E}_{y,i}$ , 及び  $\ddot{E}_{z,i}$  ( $1 \leq i \leq N$ ,  $N = 8$ ) の標準偏差  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  は:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left( \ddot{E}_{x,i} - \langle \ddot{E}_x \rangle_N \right)^2}{N-1}}$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left( \ddot{E}_{y,i} - \langle \ddot{E}_y \rangle_N \right)^2}{N-1}}$$

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left( \ddot{E}_{z,i} - \langle \ddot{E}_z \rangle_N \right)^2}{N-1}}$$

- (b) また、それら全ての標準偏差  $\sigma$  は:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left( \left( \ddot{E}_{x,i} - \langle \ddot{E}_x \rangle_N \right)^2 + \left( \ddot{E}_{y,i} - \langle \ddot{E}_y \rangle_N \right)^2 + \left( \ddot{E}_{z,i} - \langle \ddot{E}_z \rangle_N \right)^2 \right)}{3N-1}}$$


- (c) 平均値に対するこれらの標準偏差の対数での表現  $\sigma_x$  (dB),  $\sigma_y$  (dB),  $\sigma_z$  (dB),  $\sigma$  (dB) は:

$$\sigma_x \text{ (dB)} = 20 \log_{10} \left( \frac{\sigma_x + \langle \ddot{E}_x \rangle_N}{\langle \ddot{E}_x \rangle_N} \right)$$

$$\sigma_y \text{ (dB)} = 20 \log_{10} \left( \frac{\sigma_y + \langle \ddot{E}_y \rangle_N}{\langle \ddot{E}_y \rangle_N} \right)$$

$$\sigma_z \text{ (dB)} = 20 \log_{10} \left( \frac{\sigma_z + \langle \ddot{E}_z \rangle_N}{\langle \ddot{E}_z \rangle_N} \right)$$

$$\sigma \text{ (dB)} = 20 \log_{10} \left( \frac{\sigma + \langle \ddot{E} \rangle_{3N}}{\langle \ddot{E} \rangle_{3N}} \right)$$

- (d)  $\sigma_y$  (dB)、 $\sigma_z$  (dB)、及び  $\sigma$  (dB) が  に図示した許容差の範囲内であればそのチャンバは均一性要求を満たすとみなされる。

チャンバが均一性要求を満たさないならばそのチャンバをそれよりも下の周波数で使うことはできない。もしチャンバが均一性要求を満たさない程度が小さいならば所望の均一性を次の方法で得ることができるかも知れない:

- i. サンプル数 (すなわちチューナ・ステップ) を 10 % から 50 % 増やす;
- ii. データを平均正味チャンバ入力電力 ( $P_{\text{Net}} = P_{\text{Input}} - P_{\text{Reflected}}$ ) に正規化する;
- iii. ワーキング・ボリュームを小さくする。

### 2.1.1.3 受信アンテナ検証係数 $AVF$ の算出

負荷がかかったチャンバとの比較 (§2.1.2) の基礎として空のチャンバの受信アンテナ検証係数  $AVF$  を決定する。

それぞれの周波数の  $AVF$  は以下の式を用いて計算する:

$$AVF = \left\langle \frac{P_{AveRec\ i}}{P_{Input\ i}} \right\rangle_N$$

ここで、 $f \leq 10f_s$  では  $N = 8$ 、 $10f_s < f$  では  $N = 3$  で、 $P_{AveRec\ i}$  と  $P_{Input\ i}$  はプローブ位置  $i$  において §2.1.1.1 の (3)(c)iii で得た平均受信電力と平均入力電力である。

$AVF$  はアンテナでの測定におけるアンテナ効率を含むいくつかの影響の補正のために必要である。

### 2.1.1.4 チャンバ挿入損失

空のチャンバに対するチャンバ挿入損失  $IL$  は例えば放射エミッションの測定で用いられる。

それぞれの周波数の  $IL$  は以下の式で求められる:

$$IL = \left\langle \frac{P_{MaxRec\ i}}{P_{Input\ i}} \right\rangle_N$$

ここで、 $N$  と  $P_{Input\ i}$  は前項と同様で、 $P_{MaxRec\ i}$  はプローブ位置  $i$  において §2.1.1.1 の (3)(c)iii で得た最大受信電力である。

### 2.1.1.5 チャンバ最大負荷の検証

チャンバの「負荷」となる EUT によってチャンバが悪影響を受けないかどうかの確認のため、模擬された負荷条件でのチャンバ電界均一性の確認を行なう。

- (1) チャンバに少なくとも通常の試験で予期されるレベルまでの負荷をかけるためにワーキング・ボリウム内のランダムな位置に十分な数の吸収体を設置する (図 3)。

$AVF$  の 16 倍 (12 dB) の変化を通常の試験での負荷の目安として考えるべきである。それぞれのチャンバはユニークであり、必要な吸収体の量の決定の最も容易な方法は試行錯誤によるものである。

- (2) 電界プローブの位置 8 箇所 (§2.1.1.1) で述べた検証を繰り返す。

電界プローブと受信アンテナがどの吸収体からも  $\lambda/4$  よりも大きい距離を保つことを確かとるように注意すべきである。

チャンバに負荷がかけられた状態で §2.1.1.1 の (3) で述べた均一性要求を満たさない場合、チャンバは許容できないポイントまで負荷がかけられている。

この場合、吸収体の量を減らしてチャンバ負荷を減らしてこの評価を繰り返さなければならない。

- (3) 空のチャンバと「負荷」がかけられたチャンバのアンテナ検証係数  $AVF$  (§2.1.1.3) との比較によってチャンバ負荷を特定する。

$$Loading = \frac{AVF_{EmptyChamber}}{AVF_{LoadedChamber}}$$

### 2.1.2 バリデーション: EUT がある状態でのチャンバの検証

試験に先立って、チャンバ内に EUT や補助機器がある状態で以下の手続きに従ってバリデーションを行なう。

- (1) 受信アンテナをワーキング・ボリウム内に、EUT、補助機器などから 1 m (あるいは最小試験周波数における  $\lambda/4$ ) の距離を保って配置する。
- (2) それぞれの試験周波数について以下の作業を行なう:
  - (a) 送信アンテナに適度な入力電力 ( $P_{Input}$ ) を注入するように RF 信号源のレベルを調整する。
  - (b) 空の状態でのチャンバ検証 (§2.1.1) で決定された条件を考慮してチャンバとチューナを動作させる。
  - (c) 受信アンテナで受信された信号の最大値  $P_{MaxRec}$  と平均値  $P_{AveRec}$ 、また入力電力の平均値  $P_{Input}$  を記録する。
  - (d) 次の式を用いてそれぞれの周波数のチャンバ検証係数  $CVF$  を求める:

$$CVF = \frac{P_{AveRec}}{P_{Input}}$$

$CVF$  は 1 箇所の受信アンテナ位置での結果から求めれば良いが、複数の位置での平均として求めても良い。

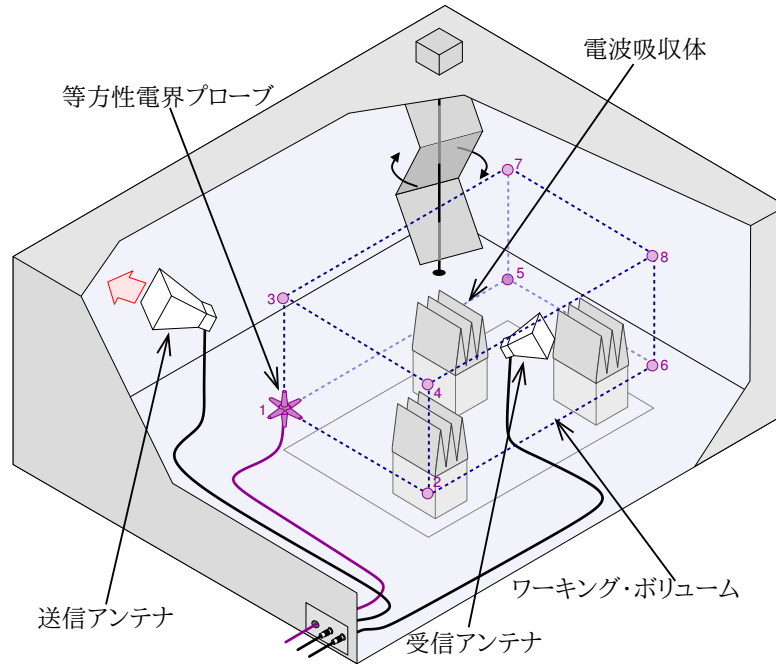


図 3: チャンバ最大負荷の検証のセットアップのイメージ (§2.1.1.5)

- (e) 上で求めたチャンバ検証係数  $CVF$  と §2.1.1.3で求めたアンテナ検証係数  $AVF$  とからチャンバ負荷係数  $CLF$  を求める:

$$CLF = \frac{CVF}{AVF}$$

もしチャンバ負荷係数の大きさの逆数が §2.1.1.5で求められた *Loading* を測定系の不確かさから予期される範囲よりも大きく超えたならば、チャンバに負荷がかかり過ぎて電界均一性が影響を受けている可能性がある。

そのような場合、§2.1.1.1で述べた電界均一性の検証を EUT がある状態で、あるいは EUT に相当する模擬された負荷でやり直さなければならない。

### 2.1.3 品質係数 $Q$ と時定数 $\tau$ の検証

チャンバの応答速度がパルス波形試験に対応するのに十分に早いことを確認するため、チャンバ時定数の特定を以下のように行なう。

- (1) §2.1.2の (2)dで求めた  $CVF$  を使い、品質係数  $Q$  を以下の式を用いて求める:

$$Q = \left( \frac{16\pi^2 V}{\eta_{Tx} \eta_{Rx} \lambda^3} \right) CVF$$

ここで、

$\eta_{Tx}$   $\eta_{Rx}$  送信アンテナと受信アンテナのアンテナ効率で、(不明であれば) 控えめには対数周期アンテナは 0.75、ホーン・アンテナは 0.9 と仮定できる。

$V$  チャンバの容積 ( $m^3$ )

- (2) それぞれの周波数について次の式を用いてチャンバ時定数  $\tau$  (s) を求める:

$$\tau = \frac{Q}{2\pi f}$$

- (3) もしチャンバ時定数が試験周波数の 10 % よりも多くで試験パルス幅の 0.4 倍よりも大きいならば、チャンバに吸収体を加えるかパルス幅を増やさなければならない。

吸収体を加える場合、最小限の吸収体で時定数要求が満足されるまでチャンバの検証 (§2.1.2) と  $Q$  や  $\tau$  の算出を繰り返す。

## 2.2 モード攪拌動作のためのリバブレーション・チャンバの検証

モード攪拌動作における、許容できない影響(平均化を含む)を防ぐためには、チャンバ、センサー、

及び試験対象機器 (EUT) がその連続的に変化する電磁界に対して適切に応答するような攪拌速度を選択することが必要となる。

チューナ回転速度を固定とした場合の電磁界の変化率は励起周波数によって変化し、これはチューナを最大試験周波数における電磁界の変化を考慮して変えることを、あるいは回転率を励起周波数の関数として選択すべきことを暗示する。

このチューナ (スターラ、パドル・ホイール) は、様々な応答時間や動作周期を持つ EUT の試験に合わせてモータ速度を制御できる限り、§2.1で述べたようなモード同調の場合と同様にステップング・モータで、あるいは連続的なモータ・ドライバで駆動できる。EUT が連続的に変化する電磁界に適切に曝される限りはモード攪拌はモード同調よりも潜在的に高速であり、EUT の応答時間や動作周期が電磁界の変化率と比較して短いならばモード同調動作に固有の始動、停止、及び加速フェーズに際して発生する電磁界のトランジェントの影響を避けながら全ての中間的なスターラの状態をカバーすることができることからモード攪拌テクニックはより完全なものともなり得る。

モード攪拌動作ではチューナ (スターラ) は連続的に回転させられ、チャンバの電磁界は適切なサンプリング・レートで適切な期間にわたってサンプルしなければならない。この期間が短か過ぎればプローブやレシーバがその瞬時的なチャンバ電磁界を取り込めるほど素早く応答できないかも知れず、あるいは窓効果に伴う副作用を生じるかも知れない。一方、長過ぎる期間は電磁界の値の平均化を引き起こし、その平均値からの大きな逸脱が検知されないままとなるかも知れない。遅過ぎるサンプリングは測定されたスターラ掃引データの曖昧さを増加させるかも知れない。モード攪拌動作のためのデータ収集システムは十分に早いレートで、また十分に大きい個数のデータを処理できなければならない、これは最大サンプリング速度と攪拌速度を制限する。

§2.1で述べたようなモード同調動作のためのチャンバ検証の手続きはモード攪拌試験の実施のためのチャンバの検証にも使用できる。この場合はチューナ (スターラ) は連続的に回転させられ、電磁界はチューナの1回転かその一部にわたりプローブかセンサでサンプルされる。

## 2.2.1 攪拌速度の上限

空洞電磁界を (ステップングの遷移を無視して) モード同調動作に際してと同様の安定状態に保つための許容可能な攪拌速度の上限は:

$$\Omega_m(f) < \frac{c^3}{8f^2Q\sqrt{NV}}$$

ここで、

$\Omega_m(f)$  動作周波数  $f$  (Hz) における機械的回転速度 (回転数/秒 (rps))

$c$  自由空間中の光の速度で、約  $3 \times 10^8$  m/s

$Q$  周波数  $f$  におけるチャンバの品質係数

$N$  周波数  $f$  における独立したサンプルの最大数

$V$  チャンバのワーキング・ボリウム ( $\text{m}^3$ )

例えば、 $V = 100 \text{ m}^3$ 、 $f = 1 \text{ GHz}$ 、 $Q = 10^4$ 、また  $N = 1000$  は  $\Omega_m(f) < 0.1 \text{ rps}$  であることを必要とする。

## 3 放射イミュニティ試験

### 3.1 試験セットアップ

機器のレイアウトは実際の設置を代表するものとし、次のように配置する:

- EUT はチャンバの壁から少なくともチャンバの最低使用可能周波数 (LUF) における  $\lambda/4$  離して、
- 卓上型の EUT はチャンバの床から少なくとも  $\lambda/4$  離して、
- 床置き型の EUT はチャンバの床から 10 cm 上に。

特有あるいは変則的な試験結果の明確化、説明、及び再現を助けるため、試験機器とケーブルのレイアウトは試験報告書に記載する。

チャンバはいかなる不要な吸収性の物もないままとすべきであり、木のテーブル、カーペット、壁や床の覆い、また天井タイルなどのアイテムを用いるべきではない。露出した照明器具も潜在的なローディングの原因である。新しいチャンバについては、扉、

換気口、またアクセス・パネルを除くサポート機器の設置に先立ってチャンバの評価を行なうことが推奨される。テーブルなどのサポート機器は非金属製かつ低吸収性であるべきであり、EUT と全てのサポート機器は総チャンバ容積の 8 % を超えてはならない。

送信アンテナは検証で用いられたときと同じ位置にあるべきである。送信アンテナは EUT や受信アンテナを直接照射してはならず、推奨される方法の 1 つはアンテナをチャンバの角に向けることである。

## 3.2 検証

データの収集に先立ち、EUT、及び/もしくはサポート機器がチャンバに好ましくない負荷を与えていないかどうかを、§2.1.2 で概述したように確認する。

モード攪拌手続きが用いられる場合、§2.2 で概述した攪拌に関連する問題が適切に扱われていることを確かとするようにも注意する。

## 3.3 試験手続き

### 3.3.1 チャンバ入力電力要求の決定

電界強度の要求を満たすために必要なチャンバ入力電力  $P_{\text{Input}}$  (W) を次の式で決定する:

$$P_{\text{Input}} = \left[ \frac{E_{\text{test}}}{\langle \ddot{E} \rangle_{24 \text{ or } 9} \times \sqrt{CLF(f)}} \right]^2$$

ここで

$P_{\text{Input}}$  イミュニティ試験のための所望の電界強度の達成のためにチャンバに注入すべき進行波電力 (W)

$E_{\text{test}}$  イミュニティ試験のために必要な電界強度 (V/m)

$CLF(f)$  EUT がある状態でのチャンバの検証 (§2.1.2(2)e) によって求められた、周波数  $f$  におけるチャンバ負荷係数 (無次元)

$\langle \ddot{E} \rangle_{24 \text{ or } 9}$  空のチャンバの検証 (§2.1.1.1(2)) から得られた、正規化された電界の平均値 ((V/m)/W<sup>0.5</sup>)。

### 3.3.2 周波数掃引パラメータの選択

#### 3.3.2.1 一般

周波数掃引パラメータは EUT の応答時間、EUT の感受性帯域幅、また監視機器の応答時間を考慮して選択する。選択された掃引レートはこの基準によって正当化し、試験報告書に文書化する。

試験計画書でこれと異なる規定がない限り、試験周波数の選択のために以下のガイダンスが用いられるであろう。

#### 3.3.2.2 離散周波数試験

離散的な周波数を発生する試験機器については、試験周波数の最小数はディケード当たり 100 周波数である。

試験周波数は対数間隔とし、例えば (100 MHz よりも上では) これらの周波数は次の式によって昇順で求めることができる:

$$f_{n+1} = f_n \times 10^{\frac{1}{N-1}}$$

ここで、

$n$   $N \geq 100$  とし、 $1 \sim N$  の整数

$f_n$   $n$  個めの試験周波数 ( $f_1$  は最初の周波数、 $f_N$  は最後の周波数)

それぞれの試験周波数でのドウェル・タイムは試験機器の応答時間とチューナの回転 (完全に静止するまで) に必要な時間を除いて少なくとも 0.5 s とし、従って周波数 1 ディケード当たりの最小試験時間はチューナの位置当たり 50 s よりも小さくないものとする。

EUT が所定の動作モードでの動作を行なえるように、また低周波変調に際しての「オフ時間」を確保できるように、それぞれの試験周波数で追加のドウェル・タイムが必要となるかも知れない。少なくとも変調の全サイクル 2 回を印加しなければならず、例えば適用される変調が 1 Hz 矩形波 (SW) 変調であればドウェル・タイムは 2 s 未満であってはならない。選択されたドウェル・タイムは適用される変調とともに EUT と試験機器の応答時間に基づいて正当化し、試験報告書に文書化する。

#### 3.3.2.3 周波数掃引試験

周波数掃引での励起はチャンバ電界を非定常的とし得るため、製品委員会が掃引率を規定しない限り

離散周波数を用いなければならない。攪拌を周波数掃引試験と組み合わせて用いることは推奨されない。

### 3.4 試験の実施

リバブレーション・チャンバは他のほとんどの EMC 試験施設と異なりチューナ (スターラ) の特定の位置や角度で平面波を生じず、伝播や EUT の励起の条件は自由空間環境のそれとは異なる。従って、推奨される試験レベルやそれに関連する信頼区間は他の試験施設におけるものとは著しく異なるかも知れない。リバブレーション・チャンバ内の電磁界の物理統計的性質の観点で好まれる量は、電界強度ではなく最大か平均の電力密度である。

試験はモード同調かモード攪拌のいずれかの手続きを用いて実施する。

モード同調動作ではチャンバ検証で示された最小のステップ数 (表 1) を用いてチューナが周波数毎に完全に 1 回転するように等間隔のステップで回転させるべきである。

もしモード攪拌手続きが用いられるならば少なくともチャンバ検証に際して収集されたサンプルの数だけのサンプルに EUT が曝されることを確かとしなければならない。

それを確かとすればいずれの手続きでも EUT を適切なドウェル・タイムのあいだ所定の電界強度に曝すことができ、これはモード攪拌動作で特に重要となる。

必要な電界強度が発生させられていることを確かとするため、それぞれの周波数帯の検証に用いられた受信アンテナで  $P_{\text{MaxRec}}$  と  $P_{\text{AveRec}}$  を監視し記録する。チャンバの負荷が §3.2 の検証から変化していないことを確かとするために  $P_{\text{AveRec}}$  を用い、 $P_{\text{AveRec}}$  の 3 dB を超える相違は解消する。 $P_{\text{MaxRec}}$  は発生させられたピーク電界強度の推定のためにも用いることができる。

$P_{\text{Input}}$  と  $P_{\text{Reflected}}$  の平均値を監視し記録する。チューナの回転のあいだの  $P_{\text{Input}}$  の 3 dB を超える変化は試験報告書に記載すべきである。

試験計画書で規定されたようにキャリアを変調し、適切なアンテナと変調を用いて周波数範囲の上限までの周波数を掃引する。

パルス変調を用いる場合は §2.1.3 で触れた時定数  $\tau$  の要求を満たすことも確認し、必要であればチャ

ンバ内に吸収体を追加してこの要求が満たされるようにする。

### 3.5 試験報告書

試験報告書はケーブルのレイアウト、ケーブルに対する EUT の配置、試験セットアップの図、及び/もしくは写真を含まなければならない。

さらに、EUT に関連する報告要求に加え、試験報告書はそれぞれの試験周波数に対する以下のパラメータを含まなければならない:

- a) チャンバ内の電界のモニタに用いられた受信アンテナからの最大受信電力;
- b) チャンバ内の電界のモニタに用いられた受信アンテナからの平均受信電力;
- c) チャンバ送信アンテナに供給された進行波電力;
- d) チャンバ送信アンテナからの反射電力;
- e) データ収集期間中の 3 dB を超える進行波電力の変動;
- f) 解消できなかった、チャンバ入力電力と A.5.4 の方法を用いて計算されたものとのあいだの 3 dB を超える差。

## 4 放射エミッション測定

モード同調かモード攪拌で動作するリバブレーション・チャンバを用いて放射エミッションの測定を行なうことも可能である。

計測器についての情報は CISPR 16-1-1<sup>[2]</sup> にあり、リバブレーション・チャンバを用いて測定を行なう時、CISPR 16-1-1 にある情報は一般に変更なしに適用される。

追加の考慮が必要な 2 つの例外がある:

- a) チャンバ品質係数  $Q$  に伴う、短い持続時間のパルス (典型的には 10  $\mu\text{s}$  未満と定義される) の歪み;
- b) 機械的チューナ/スターラの動きに伴う、放射された信号の見掛け上の振幅の変動。

適切なチャンバ品質係数  $Q$  (すなわち時定数) の決定は §2.1.3 で触れた。チューナ/スターラの影響は、ドウェル・タイムや回転率の選択の際、また使用する検波器の選択の際に考慮すべきである。

#### 4.1 試験セットアップ

基本的な試験セットアップは SAC (semi anechoic chamber) や OATS (open area test site) での放射エミッション測定の場合と同様である。

但し、

- EUT はチャンバの壁から少なくとも  $\lambda/4$  離して、また床置き型の EUT は低損失/低誘電率の台でチャンバの床から 10 cm 上に保持する。
- 最終的な測定の配置を決めるために相互接続ケーブルの位置を変える必要はない。

送信アンテナ (チャンバ検証に際してチャンバのローディングの確認のために使用される) はチャンバ内の検証で用いられた時と同じ位置に置かれたままとすべきである。送信アンテナは EUT や受信アンテナを直接照射すべきではなく、受信アンテナは EUT を直接照射すべきではない (すなわち受信アンテナは EUT に向くべきではない)。これらのアンテナをチャンバの角に向けることが最良の構成の 1 つである。ソフトウェアのインストール、EUT、試験機器、また全ての管理回路と負荷の動作モードと安定性を確立する。

#### 4.2 検証

データの収集に先立ち、EUT、及び/もしくはサポート機器がチャンバに好ましくない負荷を与えていないかどうかを、§2.1.2 で概述したように確認する。

もしモード攪拌手続きが用いられるならば、§2.2 で概述した攪拌に関連する問題が適切に扱われていることを確かとするようにも注意する。

この確認の後、送信アンテナは検証に際して用いられた RF 信号源と等価な特性インピーダンスで終端する。

#### 4.3 放射エミッション試験手続き

試験はモード同調かモード攪拌のいずれかの手続きを用いて実施する。但し、モード攪拌手続きは無変調信号についてのみ、またピーク検波を用いてのみ適用すべきであり、特に平均値やその他の加重検波器が用いられる時にはモード攪拌は適用できない。

モード同調動作ではチャンバ検証で示された最小のステップ数 (表 1) を用いてチューナが周波数毎に完全に 1 回転するように等間隔のステップで回転させるべきである。

もしモード攪拌手続きが用いられるならば少なくともチャンバ検証に際して収集されたサンプルの数だけ EUT のエミッションがサンプルされることを確かとしなければならない。モード同調と同様、モード攪拌のサンプルはチューナの完全な 1 回転にわたって均等となるべきである。

いずれの手続きについてもそれぞれのサンプルについて全てのエミッションを検出するのに十分な期間 EUT が監視されることを確かとする (レシーバの掃引時間についてのガイダンスは CISPR 16-2-3<sup>[3]</sup> を参照)。

変調された (すなわち正弦波ではない) エミッションを RMS 検波器を用いて測定した場合、測定帯域幅内の放射平均電力 (すなわち分解能帯域幅にわたって平均化されたもの) が測定されるであろう。エミッションのスペクトラムが測定帯域幅よりも広い場合、その総放射電力はその変調に関連するエミッション・スペクトラムにわたって電力スペクトラル密度を積分することで測定できる。

それぞれの周波数帯の検証で用いられた受信アンテナで、試験計画書で規定されたように  $P_{\text{MaxRec}}$ 、及び/もしくは  $P_{\text{AveRec}}$  を監視し記録する。

上限周波数までの周波数範囲を適切なアンテナと帯域幅を用いて掃引する。この手続きの掃引時間は試験計画で規定されるべきである。

##### 4.3.1 放射電力の特定

チャンバ内に置かれたデバイスが放射する RF 電力 (測定帯域幅内の) は受信アンテナで受信された電力の量を測定してチャンバ損失を補正することで決定できる。

デバイスからの放射電力は、平均受信電力  $P_{\text{AveRec}}$ 、もしくは最大受信電力  $P_{\text{MaxRec}}$  を用い、

EUT 等によるチャンバのローディングを考慮した補正係数を加味して次のように決定できる:

$$P_{\text{Radiated}} = \frac{P_{\text{AveRec}} \times \eta_{\text{Tx}}}{CVF}$$

$$P_{\text{Radiated}} = \frac{P_{\text{MaxRec}} \times \eta_{\text{Tx}}}{CLF \times IL}$$

ここで

$P_{\text{Radiated}}$  デバイスからの放射電力 (測定帯域幅内の)

$CVF$  チャンバ検証係数 (§2.1.2(2)d)

$CLF$  チャンバ負荷係数 (§2.1.2(2)e)

$IL$  チャンバ挿入損失 (§2.1.1.4)

$P_{\text{AveRec}}$  参照アンテナによって測定されチューナー・ステップの数にわたり平均された受信電力 (測定帯域幅内の) (§4.3)

$P_{\text{MaxRec}}$  チューナー・ステップの数にわたる最大受信電力 (測定帯域幅内の) (§4.3)

$\eta_{\text{Tx}}$  チャンバの校正に用いられた送信アンテナのアンテナ効率係数で、(未知の場合) 対数周期アンテナでは 0.75、ホーン・アンテナでは 0.9 と仮定できる

#### 4.3.2 自由空間 (遠方) 電界の推定

EUT が距離  $R$  (m) で発生する電界強度は次の式で推定できる:

$$E_{\text{Radiated}} = \sqrt{\frac{D \times P_{\text{Radiated}} \times \eta_0}{4\pi R^2}}$$

ここで、

$R_{\text{Radiated}}$  EUT が距離  $R$  で発生する電界強度の推定値 (V/m)

$P_{\text{Radiated}}$  §4.3.1 で得られた放射電力 (W)

$R$  EUT からの距離 (m) で、遠方界条件にあることを確かとするのに十分な距離でなければならない

$\eta_0$  自由空間の特性インピーダンスで、約 377  $\Omega$

$D$  EUT の最大方向性 (無次元)

半波長から 1 波長のあいだの長さのダイポール放射器と等価という仮定をそれが代表することから、しばしば方向性の値  $D = 1.7$  という値が用いられる。

計算された妨害電界強度は開放型試験サイト (OATS) や類似の試験サイトで与えられる測定結果と常に同等のものとなるわけではない。この同等性は必要であれば EUT のタイプや製品グループに対する特定の手続きによって示されなければならない。

#### 4.3.3 EUT が発生する半自由空間 (遠方) フィールドの推定

EUT が距離  $R$  (m)、完全に導電性のグランド・プレーン上の高さ  $h$  (m) において発生する電界強度は次の式を用いて推定できる:

$$E_{\text{Radiated}} = g_{\text{max}} \sqrt{\frac{D \times P_{\text{Radiated}} \times \eta_0}{4\pi R^2}} \quad (1)$$

記号は §4.3.2 と同じ意味を持つ。

$g_{\text{max}}$  はグランド・プレーンを考慮した無次元のジオメトリ係数で、これは次の式で与えられる:

$$g_{\text{max}} = \begin{cases} \left| \frac{r}{r_1} e^{-jkr_1} - \frac{r}{r_2} e^{-jkr_2} \right|_{\text{max}} & \text{水平偏波} \\ \left| \frac{s^2}{r_1^2} \frac{r}{r_1} e^{-jkr_1} + \frac{s^2}{r_2^2} \frac{r}{r_2} e^{-jkr_2} \right|_{\text{max}} & \text{垂直偏波} \end{cases}$$

ここで

$r = \sqrt{s^2 + R_h^2}$  アンテナから EUT の垂線への距離 (m)

$r_1 = \sqrt{s^2 + (R_h - h)^2}$  直接波の距離 (m)

$r_2 = \sqrt{s^2 + (R_h + h)^2}$  反射波の距離 (m)

$s$  測定距離 (m)

$R_h$  アンテナ高さ (m)

最大値は受信アンテナの高さ (パラメータ  $R_h$ ) の走査によって得られ、典型的な OATS 測定 ( $s = 10$  m,  $h = 1$  m、高さ 1 m から 4 m のあいだの走査) については  $g_{\text{max}}$  は水平偏波と垂直偏波の双方について 200 MHz 以上の周波数についてはおおよそ 2 に等しい。

#### 4.3.4 最大方向性

波長に対して短い電氣的あるいは磁氣的ダイポールについては最大方向性は 1.5 である。磁氣的及び電氣的ダイポールの組み合わせについては最大方向性は 3 である。電氣的に大きな EUT についてはダイポールに似た放射という仮定は典型的には十分に正確でなく、より大きな最大方向性をもたらす。EUT の放射が特定の方向への狭い孤立したビームを示すことを別として等方性の放射に十分に近い限り、非意図放射器についての予期される最大方向性  $D$  は最小の外接球の半径  $a$  に基づいて近似できる:

$$D = \begin{cases} 1.55 & ka \leq 1 \text{ の場合} \\ 0.5 \left( 0.577 + \ln(4(ka)^2 + 8ka) + \frac{1}{8(ka)^2 + 16ka} \right) & ka > 1 \text{ の場合} \end{cases}$$

製品委員会がより適切な値を提供しない限り、ダイポール放射に対する最大値  $D = 3$ 、あるいは上の式に従った  $D$  を用いることが推奨される。

#### 4.4 試験報告書

EUT に関連する報告要求に加え、試験報告書はそれぞれの試験周波数に対する以下のパラメータを含むべきである:

- a) もし記録されていれば、受信アンテナからの最大受信電力;
- b) もし記録されていれば、受信アンテナからの平均受信電力;
- c) §4.3.1 で定義された EUT によって放射された電力;
- d) もし推定された電界の報告が必要ならば、その電界の計算に用いられた仮定された方向性 (§4.3.2) も報告する。
- e) §4.2 で要求されたローディングのデータ;
- f) ケーブルのレイアウト、ケーブルに対する EUT の配置;
- g) 試験セットアップの図 (例えば写真)。

## 5 参考資料

- [1] IEC 61000-4-21:2011, *Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-21: Testing and measurement techniques — Reverberation chamber test method*
- [2] CISPR 16-1-1, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods — Part 1-1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus — Measuring apparatus*
- [3] CISPR 16-2-3, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods — Part 2-3: Methods of measurement of disturbances and immunity — Radiated disturbance measurements*
- [4] ISO 11452-11:2010, *Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 11: Reverberation chamber*
- [5] ISO 11452-11 の概要 — 車載機器のイミュニティ試験 (リバブレーション・チャンバー), 株式会社 e・オータマ, 2025, <https://www.emc-ohtama.jp/emc/reference.html>
- [6] *Evaluation of Transmit Antenna Position in Reverberation Chamber* Zhiyong Yuan et al., 2007, IEEE, DOI: [10.1109/TEM.2006.888186](https://doi.org/10.1109/TEM.2006.888186)