

ケーブルとコネクタのシールド性能の評価 — IEC 62153-4-15 (三重同軸セル) の概要

株式会社 e・オータマ 佐藤智典

2025 年 10 月 28 日

目 次

1	概要	1
2	測定法	2
2.1	三重同軸セルのカットオフ周波数	2
3	伝達インピーダンス	3
3.1	測定の原理	3
3.2	周波数範囲	3
3.3	測定法	3
4	遮蔽減衰量	4
4.1	測定の原理	4
4.2	周波数範囲	4
4.3	測定法	5
5	結合減衰量	6
5.1	周波数範囲	6
5.2	測定法	6
6	参考資料	6

1 概要

IEC 62153-4-15^[1] はコネクタ、ケーブル・アセンブリ、あるいはコンポーネントの伝達インピーダンス、遮蔽減衰量、あるいは結合減衰量の三重同軸セル (triaxial cell) を用いた測定について述べている。

ここで言う三重同軸セルは三重同軸法で用いられる円筒形のチューブを任意の大きさの直方体のセルに拡大したようなもので、

- IEC 62153-4-3^[2] (三重同軸法での伝達インピーダンスの測定)、
- IEC 62153-4-4^{[3][6]} (三重同軸法での遮蔽減衰量の測定)、
- IEC 62153-4-9^[5] (三重同軸法での結合減衰量の測定)、

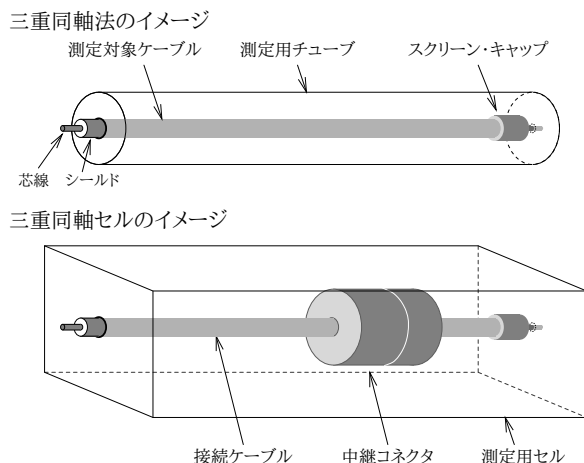
また、

- IEC 62153-4-7^[4] (三重同軸チューブ・イン・チューブ法での測定)

で述べられているものと同様の方法での測定に用いることができる。

この三重同軸セルを用いた測定は円筒形のチューブを用いた三重同軸法での測定が難しい大きなコネクタやそのようなコネクタを含むケーブル・アセンブリの測定に特に適したものとなりそうである。また、著しく太い、あるいはその他の機械的な特徴から三重同軸法での測定が難しいケーブルに対しても、この三重同軸セルの使用が適したものとなるかも知れない。

本稿ではこの IEC 62153-4-15 の概要を述べる。なお、本稿はその内容全てをカバーするものではなく、また正確であるとも限らないので、正確な情報は規格そのもの^[1]を参照されたい。



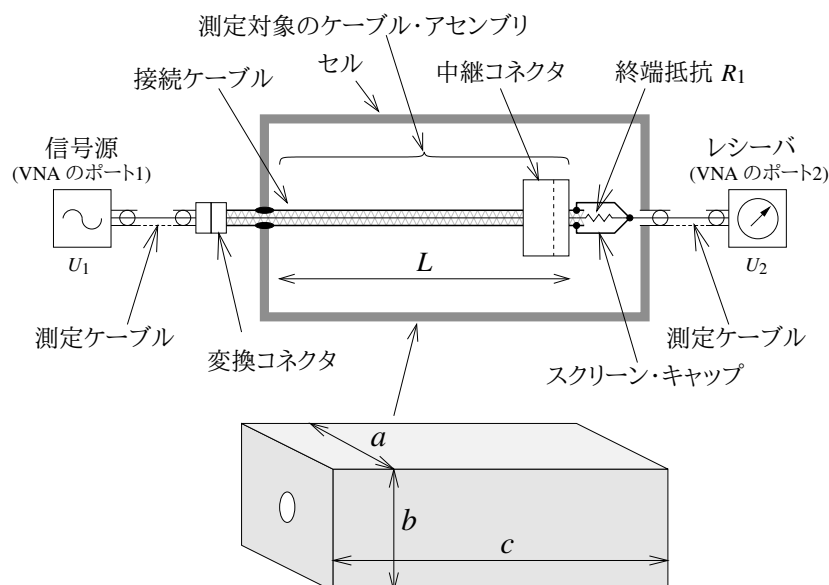


図 1: IEC 62153-4-15 (三重同軸セル) の原理

2 測定法

この測定法は、図 1 にイメージを示すように直方体のセル (おそらく上面を完全に開けられるようにできる) にサンプルを取り付け、その入出力間での信号の伝播 (減衰) の測定を行なうことを伴う。

信号の伝播 (減衰) の測定は信号発生器とレシーバなどの電圧測定器を用いて行なうことも可能であるが、可能な場合はネットワーク・アナライザ (VNA) を用いることが望ましいだろう。

この三重同軸セルでの測定は円筒形のチューブの代わりに直方体のセルを用いることを除き三重同軸法での測定と同様であり、IEC 62153-4-15 で直接述べられていないものを含め、以下の規格で述べられた三重同軸法での測定法の多くを適用できる:

- IEC 62153-4-3^[2] — 伝達インピーダンス
- IEC 62153-4-4^{[3][6]} — 遮蔽減衰量
- IEC 62153-4-9^[5] — 結合減衰量
- IEC 62153-4-7^[4] — チューブ・イン・チューブ法

三重同軸セルを用いて対応可能な周波数範囲は測定法 (後述) によって異なるが、共通の上限として、セルの寸法に依存する、セルの高次モードのカットオフ周波数から決まる上限 (§2.1) がある。

2.1 三重同軸セルのカットオフ周波数

図 1 に示したようにセルの断面の大きさを $a \times b$ 、長さを c 、それぞれに關係する次数を M , N , 及び P 、自由空間中での光速を c_0 とすると、この直方体のセルの空洞共振周波数に関する一般的な式は、

$$f_{MNP} = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{M}{a}\right)^2 + \left(\frac{N}{b}\right)^2 + \left(\frac{P}{c}\right)^2}$$

で、このセルを用いた測定が可能な周波数範囲の上限、 f_{cutoff} は、 $P = 0$, $M = N = 1$ として、

$$f_{\text{cutoff}} = f_{110} = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{b}\right)^2}$$

とされる。

例えば $a = b = 0.1 \text{ m}$ の場合は $f_{\text{cutoff}} \simeq 2.1 \text{ GHz}$ 、 $a = 0.2 \text{ m}$, $b = 0.3 \text{ m}$ の場合は $f_{\text{cutoff}} \simeq 0.9 \text{ GHz}$ のように、セルの断面が大きくなれば f_{cutoff} は低くなる。

一方、 $P = 0$ としていることから分かるように、セルの長さ c を長くしても f_{cutoff} は低下しない。

この f_{cutoff} が三重同軸セルでの測定周波数範囲の上限とされるが、IEC 62153-4-15 Annex C (Triaxial absorber cell) ではセルの内壁に電波吸収体 (電波吸収シート) を貼って高次モードを抑制することで周波数範囲を拡大する方法 (本稿では触れない) も述べられている。

3 伝達インピーダンス

3.1 測定の原理

サンプルが電氣的に短い場合、単純に、サンプルに注入された電流はそのシールドを通して戻り、シールドの2点間にシールドのインピーダンスに応じた電圧を生じると考えることができる (図2)。

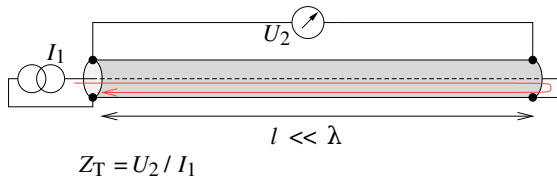


図2: 伝達インピーダンスの測定の原理

この場合、注入する電流を I_1 、シールド上の2点間で観測された電圧を U_2 として、その区間の伝達インピーダンス Z_T は $Z_T = U_2 / I_1$ として求めることができる。

3.2 周波数範囲

測定の原理上、測定可能な周波数範囲の下限はない。

一方、測定可能な周波数の上限はサンプル長と関係し、IEC 62153-4-15:2021 §5.2 には伝達インピーダンスの測定はサンプル長 1 m で 30 MHz まで、サンプル長 0.3 m で 100 MHz まで可能である旨の記載がある。

測定可能な周波数範囲はサンプル長がサンプル上での波長の 1/6 を超えない範囲である^{†1}と仮定し、サンプル長を L 、サンプルの誘電体の比誘電率を ϵ_{r1} とすると、測定可能な周波数範囲の上限 f_c は、

$$f_c = \frac{c_0}{6L\sqrt{\epsilon_{r1}}}$$

となる。上の式を用い、さらに $\epsilon_{r1} = 2.5$ と仮定^{†2}した場合、 $L = 0.3$ m で $f_c \simeq 105$ MHz、 $L = 1$ m で $f_c \simeq 31$ MHz という計算となり、上記の値と概ね一致する。

^{†1} この限界は明確なものというわけではない。IEC 62153-4-15 §5.2 には波長の 1/6 とあるが、§3.2 や §3.6 にも $\lambda/10$ とあるように 1/10 が限界の目安として用いられることも多く、1/6 というのはかなり甘い目安となるだろう。

^{†2} 同軸ケーブルなどで用いられるポリスチレンやフッ素樹脂などは 2.0~2.5 程度の ϵ_r を持つ。 ϵ_r が大きくなれば f_c も低くなるが、 ϵ_r の平方根への反比例となるため、例えば $\epsilon_r = 4.0$ だったとしても f_c は $\epsilon_r = 2.5$ の場合の 0.8 倍になるだけである。

サンプル長 L が長くなればこの測定法で測定可能な周波数の上限 f_c は低くなるので、より高い周波数までの測定のためにはなるべく短い治具を用いサンプル長 L を短く保つべきである。

3.3 測定法

IEC 62153-4-15 は、図3に例示するような構成での伝達インピーダンスの測定について、

- Z_0 (Ω) — 測定系のインピーダンス (通常は 50 Ω)
- a_{meas} (dB) — 測定された減衰量を dB で表現したもので、 $a_{\text{meas}} = -20 \log_{10}(S_{21})$
- a_{cal} (dB) — それが校正で取り除かれていない場合の接続ケーブルの減衰量
- R_1 (Ω) — 内部回路の終端抵抗で、通常は内部回路の特性インピーダンスか Z_0 と等しい値
- Z_{con} (Ω) — 接続ケーブルの変換インピーダンス

として、変換インピーダンス Z_T (Ω) は

$$Z_T = \frac{R_1 + Z_0}{2} 10^{\left(\frac{a_{\text{meas}} - a_{\text{cal}}}{20} \right)} - Z_{\text{con}}$$

から求められると述べている。

図3に示すような単純なケースで、 $R_1 = Z_0$ とし、また測定ケーブルの影響を校正で取り除く (例えば VNA のフル 2 ポート校正を測定ケーブルの端を基準面として行なうことで) ならば $a_{\text{cal}} = 0$ dB となり、これは

$$Z_T = Z_0 S_{21} - Z_{\text{con}}$$

となる。

図3のような構成でコネクタのみの変換インピーダンスを測定しようとしているような場合、 Z_{con} は測定対象のコネクタと測定ケーブルのあいだの接続ケーブル (それ自身は測定の対象とならず、また校正プロセスでもその影響が除去されない) の伝達インピーダンスで、この値は IEC 62153-4-3^[2] で述べられている方法で、あるいは測定対象のコネクタを取り除いたこれと同様のセットアップで測定できる。

IEC 62153-4-3^[2] では Test method A~C の 3 つの試験構成が示されている。上で述べた、また図3で

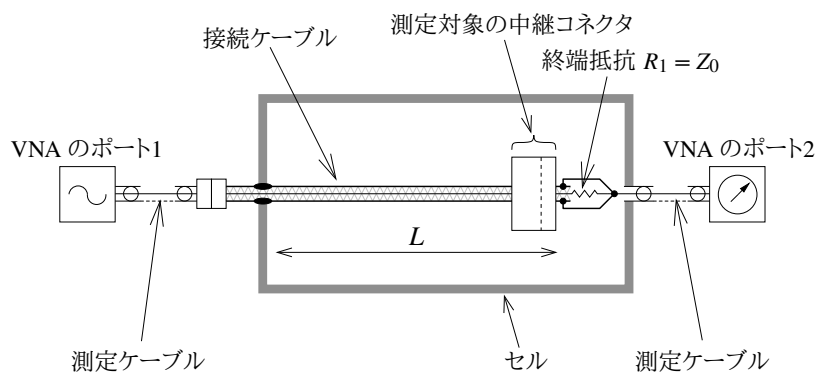
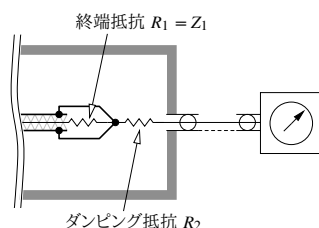


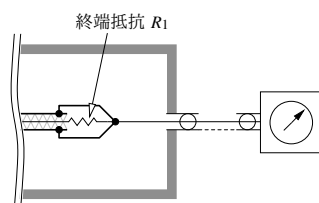
図 3: コネクタの伝達インピーダンス測定のためのセットアップの例

示したものは Test method B に基づくものとなるが、必要な場合、Test method A や Test method C に基づく構成での測定も同様に行なうことができる:

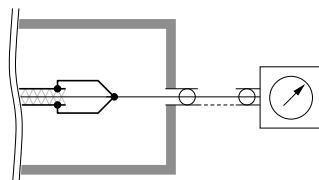
- Test method A: matched inner circuit with damping resistor in outer circuit



- Test method B: inner circuit with load resistor and outer circuit without damping resistor



- Test method C: (mismatched)-short-short without damping resistor



4 遮蔽減衰量

4.1 測定の原理

セル内にシールドされたサンプルを取り付けて信号を注入した時、注入された信号はサンプルの芯線とシールドのあいだを伝搬して終端抵抗で吸収されるが、その一部はサンプルのシールドを通して漏れ出してサンプルのシールドとセルから成る二次回路上を伝搬し、セルの反対側に接続されたレシーバに到達する (図 4)。

セルは電氣的に長く、レシーバには測定対象のサンプルの様々な箇所からの漏洩、セルの近端での反射波、測定対象の伝達インピーダンスによって遠端に現れる信号などが到達して互いに強め合ったり打ち消し合ったりすることからレシーバで受信される信号のレベルは周波数によって大きな変動を生じる。

だが、その包絡線は測定対象のサンプルからの漏洩の電力を反映し、そのシールドの効果が低ければ包絡線のレベルは高くなるので、セルの入力と出力のあいだで測定された減衰量の包絡線を測定対象のサンプルのシールドの効果の指標として考えることができる。

4.2 周波数範囲

IEC 62153-4-4^{[3][6]} (三重同軸法) と同様、IEC 62153-4-15 での測定結果 (S_{21}) から遮蔽減衰量 a_s の算出を行なえる周波数範囲の下限は結合長 L と誘電率の影響を受け、結合長 L 、測定対象のサンプルの誘電体の比誘電率 ϵ_{r1} 、測定対象のサンプルのシールドとセルとから成る二次回路の誘電体

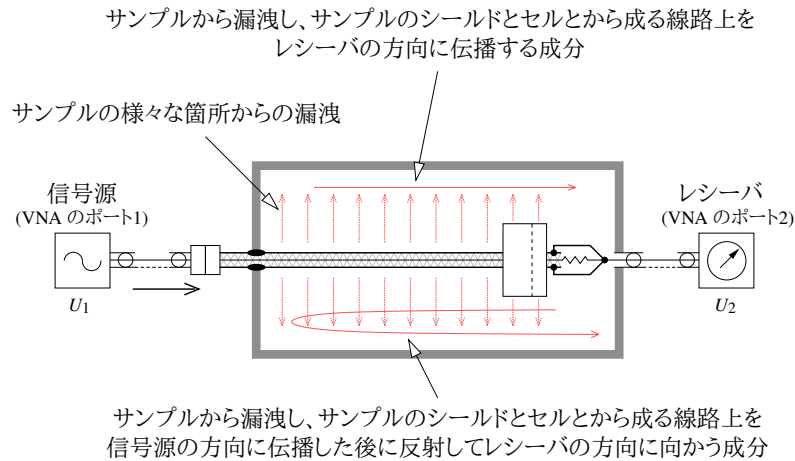


図 4: 遮蔽減衰量の測定の原理

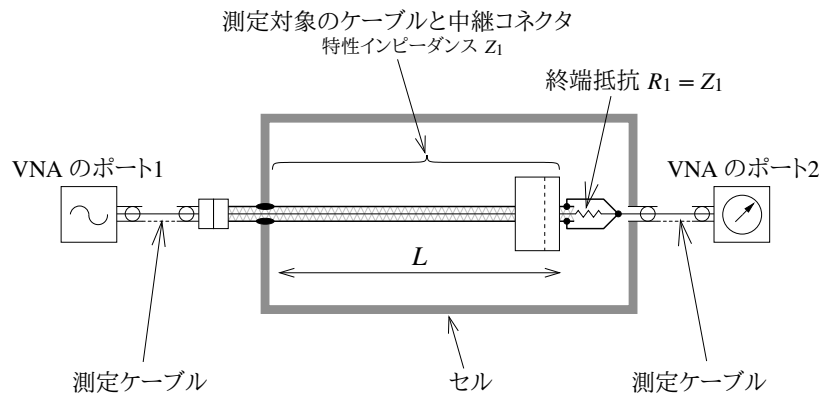


図 5: 遮蔽減衰量測定のセットアップの例

(通常は大半は空気) の比誘電率 ϵ_{r2} として、

$$f > \frac{c_0}{2 \times L \times |\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}|}$$

となり、 $\epsilon_{r1} = 2.4$ 、また $\epsilon_{r2} = 1$ とすると、 $L = 1 \text{ m}$ で $f \gtrsim 273 \text{ MHz}$ 、 $L = 2 \text{ m}$ で $f \gtrsim 137 \text{ MHz}$ となる。

測定周波数範囲の上限は §2.1 で述べた f_{cutoff} となる。

4.3 測定法

図5のようなセットアップでの測定の場合、IEC 62153-4-4^[3] と同様、

- Z_0 (Ω) — 測定系のインピーダンス (通常は 50Ω)
- Z_1 (Ω) — 測定対象のケーブルやコネクタの特性インピーダンス

- γ — 信号源と測定対象のケーブルやコネクタとのあいだでの反射係数で $\gamma = |(Z_0 - Z_1)/(Z_0 + Z_1)|$

として、接続ケーブルとコネクタ全体の 150Ω ^{†3} に正規化された遮蔽減衰量 a_s は、測定された S パラメータから以下の式の包絡線 (envelope) として求められる:

$$a_s = Env \left\{ -20 \log_{10} |S_{21}| + 10 \log_{10} |1 - \gamma^2| + 10 \log_{10} \left| \frac{300 \Omega}{Z_1} \right| \right\}$$

図5のようなセットアップでの測定ではセル内に置かれる接続ケーブルとコネクタの双方が遮蔽減衰量測定の対象となる。コネクタのみを測定対象とし

^{†3} 150Ω は典型的なケーブルの設置での特性インピーダンスを代表すると考えられるものであり、また吸収クランプ法で想定されるインピーダンスでもある。

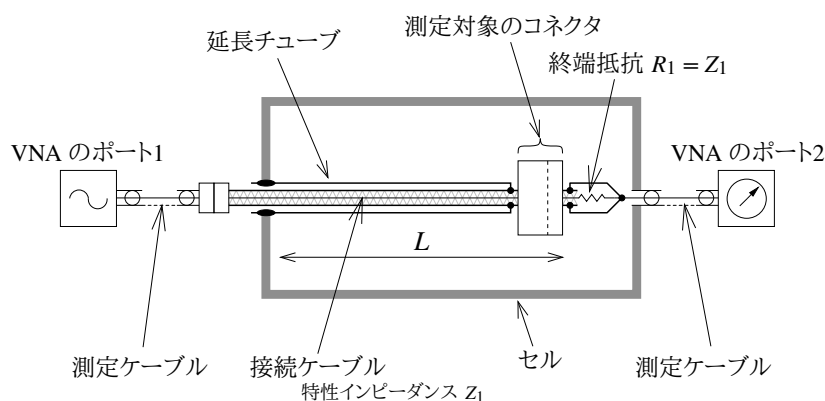


図 6: チューブ・イン・チューブ法での遮蔽減衰量測定の設定アップの例

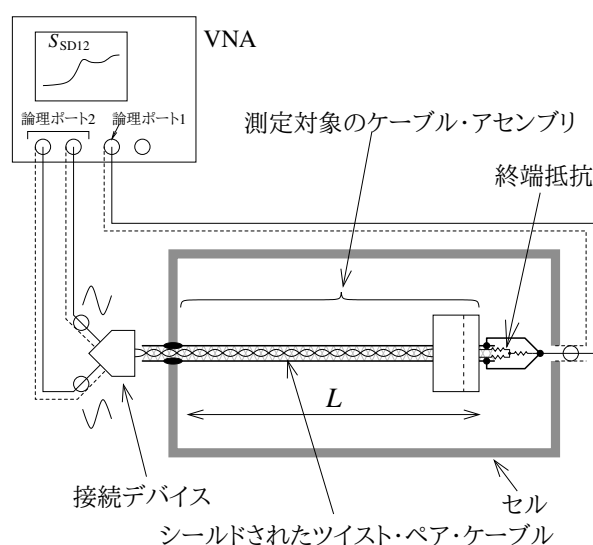


図 7: 4 ポート VNA を用いた結合減衰量測定の設定アップの例

たい場合、図6のように、IEC 62153-4-7^[4] で述べられている三重同軸チューブ・イン・チューブ法を用いることができる。

れており、IEC 62153-4-9^[5] にはより詳細な情報がある。

図7は4ポートVNAを用いた balan なしでの結合減衰量測定の設定アップの例を示す。

5 結合減衰量

5.1 周波数範囲

セルに起因する測定周波数範囲の制限は遮蔽減衰量 (§4.2) の場合と同様である。

勿論、balan や結合デバイスが必要な周波数範囲に対応していることも必要となる。

5.2 測定法

IEC 62153-4-15 では三重同軸セルを用いた balan なしでの結合減衰量測定の方法について触れら

6 参考資料

- [1] IEC 62153-4-15, *Metallic cables and other passive components test methods — Part 4-15: Electromagnetic compatibility (EMC) — Test method for measuring transfer impedance and screening attenuation — or coupling attenuation with triaxial cell*
- [2] IEC 62153-4-3, *Metallic communication cable test methods — Part 4-3: Electromagnetic compatibility (EMC) — Surface transfer impedance — Triaxial method*

- [3] IEC 62153-4-4, *Metallic communication cable test methods — Part 4-4: Electromagnetic compatibility (EMC) — Test method for measuring of the screening attenuation a_s up to and above 3 GHz, triaxial method*
- [4] IEC 62153-4-7, *Metallic communication cable test methods — Part 4-7: Electromagnetic compatibility (EMC) — Test method for measuring the transfer impedance Z_T and the screening attenuation a_s or coupling attenuation a_c of connectors and assemblies up to and above 3 GHz — Triaxial Tube in tube method*
- [5] IEC 62153-4-9, *Metallic communication cable test methods — Part 4-9: Electromagnetic compatibility (EMC) — Coupling attenuation of screened balanced cables, triaxial method*
- [6] ケーブルのシールド性能の評価 — IEC 62153-4-4, -4-7 の概要, 株式会社 e・オータマ 佐藤, 2021, <https://www.emc-ohatama.jp/emc/reference.html>