

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 佐藤智典

2022 年 1 月 31 日

目次

1	概要	1
2	遮蔽減衰量の測定	2
2.1	測定の方法	2
2.1.1	ケーブル — IEC 62153-4-4	2
2.1.2	コネクタやケーブル・アセンブリ — IEC 62153-4-7	3
2.2	遮蔽減衰量 a_s の算出	4
2.3	測定周波数範囲	4
2.4	測定対象ケーブルの外径の範囲	5
3	結合減衰量の測定	5
3.1	測定の方法	5
3.1.1	平衡型のコネクタやケーブル・アセンブリ	5
3.1.2	平衡型のケーブル	6
3.2	結合減衰量 a_c の算出	6
4	伝達インピーダンスの測定	7
4.1	測定の方法	7
4.2	伝達インピーダンス Z_T の算出	7
5	補足	7
5.1	ケーブルとコネクタの測定	7
5.2	ケーブル取付用以外のコネクタの処理	8
5.3	ケーブルの影響を除きたい場合	8
5.4	特性インピーダンスの同定	8
5.5	その他の測定法の例	9
5.5.1	IEC 62153-4 シリーズ	9
5.5.2	MIL-STD-1344A Method 3008	9
5.5.3	その他	10
6	参考資料	10

1 概要

IEC 62153-4-4^[1] は、例えば 200 MHz から 3 GHz 程度の周波数範囲でのシールド・ケーブルのシールド性能の評価に適した、比較的長い (例えば 2~3 m 程度の) 測定用チューブを用いた三重同軸法による遮蔽減衰量の測定について述べている。使用する測定器などに依存するものの、比較的高いダイナミック・レンジでの測定を達成可能で、例えば二重の外部導体を持つ同軸ケーブルのようなかなり高いシールド性能を持つケーブルの評価も可能である。

遮蔽減衰量の測定は測定用チューブ内を引かれるケーブルが十分に長くなる高い周波数範囲、例えば 200 MHz 程度以上について行なうことができる。また、低い周波数では遮蔽減衰量の測定は行なえないが、そのケーブルが電氣的に短くなる低い周波数範囲、例えば 10 MHz 程度以下の周波数範囲については遮蔽減衰量と同様の測定方法で伝達インピーダンスに容易に換算可能な結果を得ることができる。

遮蔽減衰量や伝達インピーダンスを測定可能な周波数範囲は限られているが、類似のケーブル間の相対的な比較などの目的の場合、遮蔽減衰量や伝達インピーダンスへの換算を行わずに、また上記のような周波数の制限を気にせず、広い周波数範囲 (例えば kHz のオーダーから数 GHz までの全周波数範囲) で測定された減衰量をそのまま比較することもできるであろう。

IEC 62153-4-7^[2] はシールド・コネクタやシールド・ケーブル・アセンブリの評価を意図したもので、IEC 62153-4-4 と良く似ている。

IEC 62153-4-7 の遮蔽減衰量の測定は IEC 62153-4-4 と同様の測定原理に基づくが、測定対象となる短いコネクタやケーブル・アセンブリへの対応のため、測定対象のコネクタやケーブル・アセンブリまでを測定用チューブ内を引かれる適切な長さの接続ケーブルで接続することで遮蔽減衰量の測定のために必要な長さを確保するように、また接続ケー



ルからの漏洩の測定の結果への影響を抑えるために測定用チューブ内を引かれる接続ケーブルを金属の延長チューブに通して遮蔽するようになっており、「チューブ・イン・チューブ法」と呼ばれている。

IEC 62153-4-7 では平衡型のコネクタやケーブル・アセンブリの結合減衰量 (差動信号からの漏洩を抑制する能力の指標となる) の測定についても述べられている。

本稿ではこの IEC 62153-4-4 と IEC 62153-4-7 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][2]}を参照されたい。

2 遮蔽減衰量の測定

2.1 測定の方法

2.1.1 ケーブル — IEC 62153-4-4

IEC 62153-4-4 ではシールド・ケーブルの遮蔽減衰量 (screening attenuation) の三重同軸法による測定について述べられている。

この測定では、**図1**に示すように測定対象のシールド・ケーブルの芯線 (多芯ケーブルの場合は**図2**のように全ての芯線を一括接続する) とシールドのあいだにその特性インピーダンスと等しい終端抵抗を接続して終端した上でしっかりと遮蔽したものを^{†1}を銅や黄銅の測定用チューブの中に通し、測定対象の

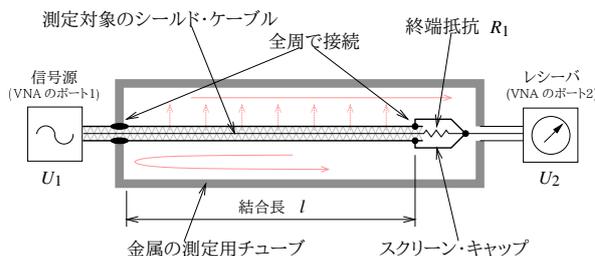


図1: IEC 62153-4-4 での遮蔽減衰量の測定

^{†1} 終端部のシールド性は測定対象ケーブルのシールド性よりも高いべきであり、さもなければ終端部からの漏洩が測定結果に有意に影響することになる。従って、測定対象ケーブルのシールド性が高い場合、終端部のシールドは非常にしっかりと行なうことが必要となる。だが、大抵の場合は、銅テープで隙間を生じないように覆ってケーブルのシールドとしっかりと接続する程度でも充分かも知れない。必要な場合、終端部のシールドが測定結果に影響していないかどうかのチェックは、例えば測定対象ケーブルを追加のシールド (金属のチューブや銅テープなど) で覆って測定されたシールド性が上がるかどうかを確認することで行なえるだろう。

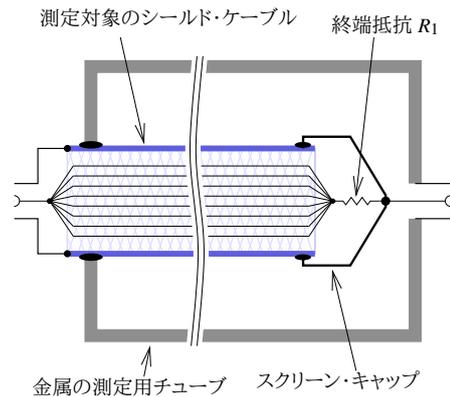


図2: 多芯ケーブルの処理 — 全ての芯線を一括接続して一本の同軸ケーブルのように扱う

シールド・ケーブルの芯線とシールドのあいだに信号を注入する。^{†2†3}

ケーブルに注入された信号はケーブ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、その一部はケーブルのシールドを通して漏れ出してケーブルのシールドとその外側の測定用チューブから成る同軸状の二次回路上を伝搬し、チューブの反対側に接続されたレシーバに到達する。

測定用チューブは電氣的に長く、レシーバには測定対象のケーブルやコネクタの様々な箇所からの漏洩、測定用チューブの近端での反射波、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 (**図4**)。だが、その包絡線は測定対象のケーブルやコネクタからの漏洩の電力と関係し、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、測定用チューブの

^{†2} この測定法の「三重同軸 (triaxial) 法」という呼称は、シールド・ケーブルの芯線、シールド、及び測定用チューブの3つが同軸状となることに由来する。

^{†3} **図1**などの図は測定対象のケーブルを信号源に直接接続するような形となっているが、実際には測定用チューブの直近まで同軸ケーブルで接続して測定対象ケーブルに繋ぎ込むような形となる (**図3**)。測定対象のケーブルと測定系の同軸ケーブルとの接続には工夫が、場合によってはある程度強引な手段が必要となるかも知れない。測定対象ケーブルの余長 (測定用チューブの外側を引かれる部分) が長いと信号を不必要に減衰させることになる (一般のケーブルの高い周波数の同相信号に対する減衰は非常に大きいものとなることがあり、例えば 20 cm 程度の余長も測定の結果に著しい影響を与えるかも知れない) ので、この余長は最小限とすべきである。信号源からの、またレシーバへの同軸ケーブルの影響は VNA の校正^{†4} (望ましくはフル 2 ポート校正) を同軸ケーブルを含めて行えばキャンセルできる。

^{†4} 本稿で言う「校正」は、例えば 1 年毎に行なわれるような校正ではなく、VNA の使用の都度行なわれる誤差補正のための作業を指す。

入力と出力のあいだで測定された減衰量 (S_{21} ^{†5}) を測定対象のケーブルやコネクタのシールドの効果の指標として考えることができる。^{†6}

図1や上の説明では信号発生器とレシーバを用いるような形で述べているが、実際の測定はSパラメータ・テスト・セットを備えたベクトル・ネットワーク・アナライザ (VNA) で行なうことが推奨される。(図3)。

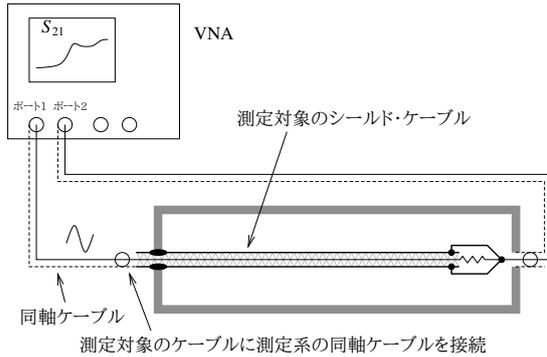


図3: IEC 62153-4-4 測定での VNA の接続のイメージ

§2.3 で述べるように、遮蔽減衰量に換算可能な結果を得られる周波数範囲の下限には結合長 l 、すなわち測定用チューブ内を引かれたケーブルの長さが影響し、低い周波数からの測定のためには結合長 l を長くすることが必要となる。

この周波数範囲での S_{21} の包絡線のレベルは結合長 l には依存しないと考えられ、結合長 l を変えた場合もその補正などは不要である。

2.1.2 コネクタやケーブル・アセンブリ — IEC 62153-4-7

IEC 62153-4-7 はシールド・コネクタやシールド・ケーブル・アセンブリ (短いもの) の遮蔽減衰量の三重同軸チューブ・イン・チューブ法による測定に関する情報を含む。

^{†5} S_{21} は S パラメータでのポート 1 からポート 2 への伝達を示すパラメータで、ポート 1 からの入射波の電力の平方根に対するポート 2 からの出射波の電力の平方根を示す複素数の値となり、これは関係する全ての箇所のインピーダンスが等しければそれらの電圧の比率と一致する。より詳しく知りたい方は S パラメータに関する解説を参照いただきたい。 S_{21} 自身は減衰量ではないが、換算可能で、本稿ではそれらの表現を区別せずに用いる。

^{†6} 意味があるのは包絡線で、個々の周波数での値そのものではない。例えば図4で 200 MHz や 300 MHz 近傍での減衰量が小さくなっているのが見られるが、これはそれらの周波数でのシールド性がその前後の周波数よりも悪いことを意味するわけではない。

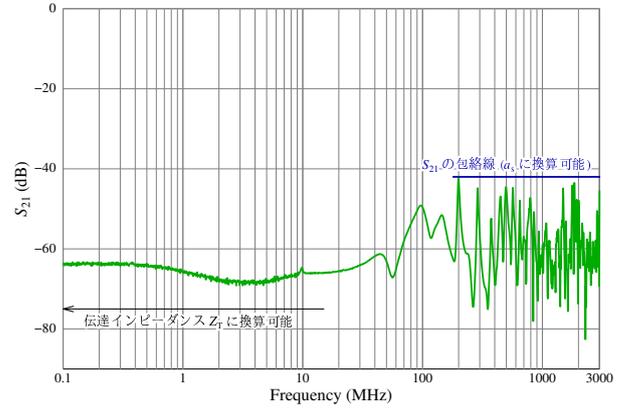


図4: IEC 62153-4-4 測定セットアップでの S_{21} の測定結果の例

この測定は §2.1.1 で述べたような IEC 62153-4-4 と同じ原理に基づくが、短い測定対象のコネクタやケーブル・アセンブリへの対応のため、測定対象のコネクタやケーブル・アセンブリまでを測定用チューブ内を引かれる適切な長さの接続ケーブルで接続することで遮蔽減衰量の測定を行ないたい周波数範囲の下限に見合った結合長 l を確保するようになっている。

だが、そのままでは測定対象ではない接続ケーブルのシールド性が測定の結果に影響する可能性が生じるため、図5 や図6 に示すように測定用チューブ内を引かれる接続ケーブルを金属の延長チューブ^{†7}に通して遮蔽してその影響をできる限り排除するようになっており、この測定法はこの理由から「チューブ・イン・チューブ法」と呼ばれている。

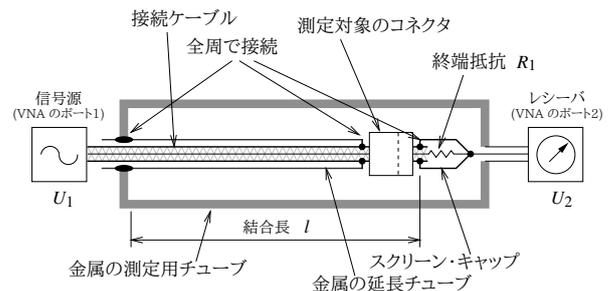


図5: IEC 62153-4-7 でのコネクタの遮蔽減衰量の測定

この測定法では測定用チューブ内を引かれる接続ケーブルでの減衰も測定結果に影響するため、その考慮も必要となる。IEC 62153-4-7 は VNA の校正 (望ましくはフル 2 ポート校正) を接続ケーブルを含めて行なうように述べており、これに従えば接

^{†7} 適切な太さの、厚さ 1 mm 以上の銅や黄銅のチューブ。

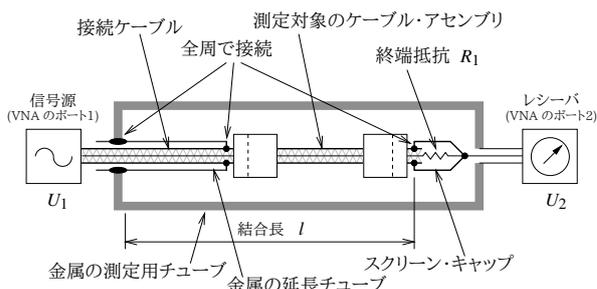


図 6: IEC 62153-4-7 でのケーブル・アセンブリの遮蔽減衰量の測定

続ケーブルでの損失はキャンセルされる。だが、そのコネクタと組み合わせて使用される実際のシールド・ケーブルを接続ケーブルとして使いたい、接続ケーブルの端に測定対象の（あるいはそれと嵌合する）コネクタをあらかじめ取り付けておきたい、などの理由から、VNA の校正を接続ケーブルを含めて行なうことは難しいものとなるかも知れない。接続ケーブルでの損失が測定結果に有意に影響しそうであるが、その影響を VNA の校正でキャンセルすることが実際的でない場合、接続ケーブルでの損失を別に測定して補正を行なうなどの対応が必要となりそうである。

2.2 遮蔽減衰量 a_s の算出

150Ω ^{†8}に正規化された遮蔽減衰量 a_s は、§2.1で述べたような方法での測定結果 (S_{21}) から、測定系の特性インピーダンスを $Z_0 (= 50 \Omega)$ 、測定対象のケーブルやコネクタの特性インピーダンスを Z_1 、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を $\gamma = |(Z_0 - Z_1)/(Z_0 + Z_1)|$ として以下の式の包絡線 (envelope) として求められる:

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

ここで、 $10 \log_{10} |1 - \gamma^2|$ は信号発生器と測定対象のケーブルの特性インピーダンスの不整合によって測定対象のケーブルの入り口で信号発生器から出力された信号の一部が反射される (測定対象のケーブルやコネクタを伝搬する信号のレベルが低下し、減

^{†8} 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 (§5.5.1) で想定されるインピーダンスでもある。

衰量が高く測定される) 影響の補正のためのもので、 $Z_1 = Z_0$ の場合は 0 dB 、 $Z_1 \neq Z_0$ の場合は $< 0 \text{ dB}$ となる。^{†9}

S_{21} の測定に際して補正されていない損失 (例えば §2.1.2 で触れた IEC 62153-4-7 における接続ケーブルでの損失のような) が他にある場合はその考慮も必要となる。

2.3 測定周波数範囲

この方法での測定結果 (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 、測定対象ケーブルの誘電体の比誘電率 ϵ_{r1} 、測定対象ケーブルのシールドや延長チューブとその外側の測定用チューブとから成る同軸状の二次回路の誘電体の比誘電率 $\epsilon_{r2} \approx 1$ として、

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

となる。

この周波数は、例えば測定対象ケーブルの誘電体の比誘電率 $\epsilon_{r1} = 2$ 、結合長 $l = 2 \text{ m}$ とすると 180 MHz 程度、 $l = 3 \text{ m}$ とすれば 120 MHz 程度という計算となる。

また、低損失のマイクロ波用同軸ケーブルのように誘電体に発泡材が用いられている場合は実効的な ϵ_{r1} は 1.3 程度となるかも知れず、その場合は $l = 2 \text{ m}$ で 530 MHz 程度、 $l = 3 \text{ m}$ でも 350 MHz 程度という計算となる。

必要な場合、非常に長い測定用チューブを用いることでより低い周波数からの遮蔽減衰量測定を行なうことも可能であろうが、そのような周波数での遮蔽減衰量の測定が必要な場合は他の評価方法、例えば IEC 62153-4-5 で述べられている吸収クランプ法の使用などを考えた方が良さそうに思われる。

一方、測定周波数範囲の上限は結合長やケーブル内の誘電体とは無関係で、測定対象ケーブルのシールドや延長チューブとその外側の測定用チューブとから成る同軸状の二次回路のカットオフ周波数から決まる。

同軸線路のカットオフ周波数 f_c は高次モードの電磁界が伝搬できるようになる最低の周波数であり、

^{†9} IEC 62153-4-4:2006 や IEC 62153-4-7:2006 では $Z_1 \neq Z_0$ の場合はインピーダンス整合回路網を通して接続するように述べられていたが、それらの規格のより新しい版ではインピーダンス整合回路網なしで測定できるようになっている。

外部導体の内径を D 、内部導体の外径を d 、外部導体と内部導体のあいだの誘電体の比誘電率を ϵ_r 、誘電体の比透磁率を μ_r (ここでは誘電体は空気、 $\epsilon_r \approx 1$ 、 $\mu_r \approx 1$) として、

$$f_c = \frac{c_0}{\pi((D+d)/2)\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} = \frac{c_0}{\pi(D+d)/2}$$

より求めることができる。

測定用チューブの内径 D は標準的には約 50 mm で、この場合、ケーブルのシールドの外径 $d = 10$ mm の場合は $f_c \approx 3.2$ GHz、 $d = 20$ mm の場合でも $f_c \approx 2.7$ GHz となり、概ね 3 GHz 程度までの測定が可能と考えられる。

より高い周波数までの測定が必要な場合、測定用チューブを細くすればカットオフ周波数 f_c をある程度は高くできる^{†10}ものの、そのような周波数での評価が必要な場合は他の評価方法、例えば §5.5.2 で触れるような方法の使用を考えた方が良さそうに思われる。

上で述べたように、測定可能な周波数範囲に主に測定用チューブの内径から決まる上限があるだけでなく、遮蔽減衰量への換算が可能で周波数範囲には下限もあり、この方法での遮蔽減衰量の測定が可能で周波数範囲は比較的限られている。だが、類似のケーブルやコネクタ間の相対的な比較などの目的の場合、遮蔽減衰量や伝達インピーダンス (§4) などへの換算を行わずに、また上記のような遮蔽減衰量測定に関する周波数の下限を気にせずに、図4に例示したような、広い周波数範囲で測定された減衰量 (S_{21}) をそのまま比較することもできるだろう。

2.4 測定対象ケーブルの外径の範囲

測定対象ケーブルのシールドや延長チューブとその外側の測定用チューブとから成る同軸状の二次回路の特性インピーダンスが測定系のインピーダンスと整合している必要はないが、それが測定系のインピーダンスよりも高いことが求められている。

同軸線路の特性インピーダンス Z_0 は、外部導体の内径を D 、内部導体の外径を d 、外部導体と内部導体のあいだの誘電体の比誘電率を ϵ_r として、

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(\frac{D}{d} \right)$$

^{†10} 例えば $D = 20$ mm、 $d = 5$ mm の場合は $f_c \approx 7.6$ GHz となる。

より求めることができる。

$\epsilon_r \approx 1$ の場合は $D/d \gtrsim 2.3$ で $Z_0 \geq 50 \Omega$ となるので、測定用チューブの内径が 50 mm の場合はシールドの外径が 20 mm 程度以下のサンプルを測定可能ということになる。

3 結合減衰量の測定

3.1 測定の方法

3.1.1 平衡型のコネクタやケーブル・アセンブリ

実際の使用で差動信号の伝送に用いるシールドされた平衡型のコネクタやケーブル・アセンブリの場合、図7に示すように、芯線とシールドのあいだに信号を印加する代わりに通常の差動信号と同様に平衡ペアに差動信号を印加した時に測定対象のコネクタやケーブル・アセンブリのシールドと測定用チューブとのあいだに現れる信号のレベルを測定することも考えられる。IEC 62153-4-7 ではこれは結合減衰量 (coupling attenuation) の測定として述べられている。

この測定では、ケーブル内の平衡ペアに印加された差動信号の一部がその不平衡に伴って同相信号に変換され、その同相信号の一部がシールドを介して漏洩して測定用チューブの出力で測定されるような状況となる。

この測定の結果は、例えば HDMI や USB のような差動信号を用いた高速通信における差動信号のシールド・ケーブルからの漏洩を抑制する能力の指標となると考えられる。

図7では信号をバランを介して差動信号に変換して印加するように示しているが、その代わりにミクスト・モードの S パラメータの測定が可能でベクトル・ネットワーク・アナライザを用いることもできる (図8)。

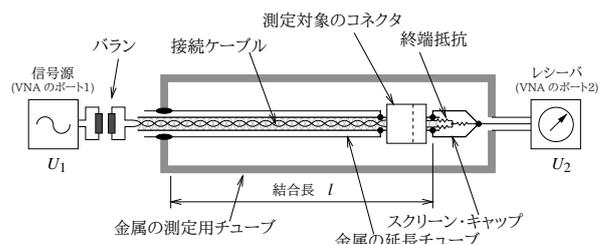


図7: IEC 62153-4-7 での結合減衰量の測定

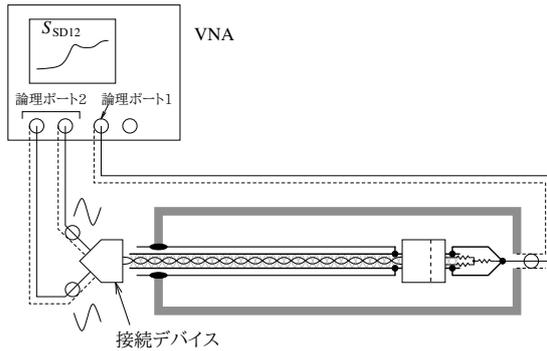


図 8: IEC 62153-4-7 での結合減衰量の測定 (ミクスト・モード S パラメータ測定)

この測定に際しては信号を印加する平衡ペアは例えば図 9 に示すように測定対象の差動モードと同相モードの双方の特性インピーダンスで終端する。他の平衡ペアは両側とも開放のままが良い。

図 9 のような終端の場合、定数 R_1 、及び R_2 は、差動モードの特性インピーダンスを Z_d 、同相モードの特性インピーダンスを Z_c として、

$$R_1 = Z_d/2$$

$$R_2 = Z_c - R_1/2$$

となる。

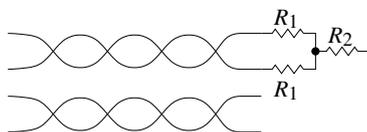


図 9: 結合減衰量測定に際しての終端

測定で使用するバランや終端、接続ケーブル (IEC 62153-4-7 の場合)、またそれらのあいだの接続部の不平衡は測定結果に影響する可能性があるため、それらが測定周波数全域でかなり良い平衡を持つことが必要となりそうである。

このためもあり、この測定の実施は遮蔽減衰量の測定よりもかなり難しいものとなることが予期される。

原理上、結合減衰量 a_c は、不平衡減衰量を a_u 、遮蔽減衰量を a_s として、

$$a_c = a_u + a_s$$

となると考えられる。従って、測定対象のケーブルやコネクタの不平衡減衰量 a_u を別の方法で把握できれば、結合減衰量 a_c をここで述べたような方法で

測定する代わりに、その不平衡減衰量 a_u と §2 で述べたような方法で測定した遮蔽減衰量 a_s とから結合減衰量 a_c を推定することもできるかも知れない。

3.1.2 平衡型のケーブル

シールドされた平衡型のケーブルの結合減衰量の三重同軸法による測定は IEC 62153-4-9^{†11} で別に扱われており、IEC 62153-4-4 はこれに関する記載を含まない。

だが、その長さのサンプルでの結果が得られれば良い場合は、ここで述べたような測定法を準用して、だが延長チューブは用いずに同様に測定を行なうことができるかも知れない。

3.2 結合減衰量 a_c の算出

結合減衰量 a_c は、測定された減衰量の最小値を $a_{m,min}$ ^{†12}、バランの挿入損失を a_z 、測定対象のケーブルの特性インピーダンスを Z_1 として、

$$a_c = a_{m,min} - a_z + 10 \log_{10} \left| \frac{300 \Omega}{Z_1} \right|$$

から求められる。

この式では遮蔽減衰量の算出のための式 (§2.2) と異なり不整合に伴う損失の補正は明示的に示されていない。この測定ではバランで整合が取られているべきであろうし、バランの不整合に伴う損失があればそれも a_z に含まれることになるだろうが、場合によっては遮蔽減衰量の場合と同様にその補正を別に考慮することが必要となるかも知れない。

減衰量 $a_{m,min}$ の測定に際して補正されていない損失が他にある場合はその考慮も必要となる。IEC 62153-4-7 では、遮蔽減衰量測定 (§2.1.2) の場合と同様、接続ケーブルでの損失が VNA の校正でキャンセルされていないならばその補正が必要となりそうである。

^{†11} これは本稿で述べる測定法と似ているが、ケーブルの不平衡減衰量の影響を反映させるための 100 m のサンプルの使用を伴う。

^{†12} 一般に、 $a_{meas} = 10 \log_{10}(P_1/P_2) = -20 \log_{10} |S_{21}|$ 。

4 伝達インピーダンスの測定

4.1 測定の方法

高い周波数範囲については §2 で述べたような方法で遮蔽減衰量 a_s を得ることができるが、結合長が電氣的に短い周波数範囲については、ケーブル^{†13}、コネクタ、またケーブル・アセンブリのいずれについても遮蔽減衰量の測定と同様の方法での測定の結果から表面伝達インピーダンス (surface transfer impedance) Z_T を容易に算出することができる。

電氣的に短いシールド・ケーブルの伝達インピーダンス Z_T は

- シールドを流れる電流に対する、その電流に伴って内部回路に誘起する電圧の比率 (図 10)、あるいは

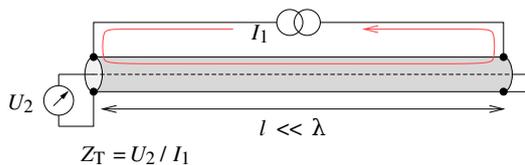


図 10: 伝達インピーダンス (1)

- 内部回路を流れる電流に対する、その電流に伴ってシールドに誘起する電圧の比率 (図 11)

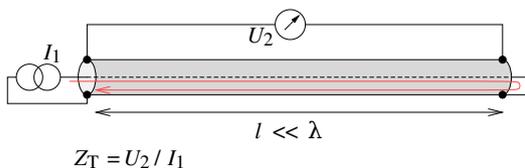


図 11: 伝達インピーダンス (2)

として定義することができ、ここで述べる測定法では後者が測定される形となる。

4.2 伝達インピーダンス Z_T の算出

結合長 l が電氣的に短い場合、すなわち

$$f < \frac{c_0}{10 \times l \times \sqrt{\epsilon_{r1}}}$$

となる周波数範囲について、図 1 のセットアップで終端抵抗 $R_1 = Z_1$ として測定を行なった場合の伝

^{†13} ケーブルの三重同軸法での伝達インピーダンス測定は IEC 62153-4-3 でも扱われている。

達インピーダンス Z_T (長さに依存しないように 1 m 当たり正規化した値としている) と U_1 、及び U_2 の関係は、

$$Z_T \times l \approx Z_1 \times \left| \frac{U_2}{U_1} \right|$$

のようになる。

$R_1 \neq Z_0$ の場合は補正が必要となるが、 $R_1 = Z_0$ ($= 50 \Omega$)^{†14}として S_{21} を測定した場合は Z_T は単純に

$$Z_T \approx R_1 \times |S_{21}| / l$$

として求められる。

例えば、ケーブルの誘電体の比誘電率 $\epsilon_{r1} = 2$ の場合、結合長 $l = 2$ m では 10 MHz 程度以下、結合長 $l = 0.5$ m であれば 40 MHz 程度以下の周波数については伝達インピーダンスを上記のような単純な式で得られると考えられる。

この方法で伝達インピーダンスを算出できる周波数の上限は結合長 l を (従って測定用チューブを) 短くすればそれに応じて高くなり、またより高い周波数での伝達インピーダンスの算出についての情報もあるものの、より高い周波数の伝達インピーダンスの測定が必要な場合はそのような周波数での測定に適した方法の使用、例えば IEC 62153-4-3 を参照しての短い測定用チューブでの測定を考えた方が良さそうに思われる。

5 補足

5.1 ケーブルとコネクタの測定

IEC 62153-4-4 はシールド・ケーブルの三重同軸法での測定について述べており、コネクタを含むアセンブリの扱いについては触れられていない。また IEC 62153-4-7 はコネクタや短いケーブル・アセンブリの三重同軸チューブ・イン・チューブ法での測定について述べており、接続ケーブルと延長チューブの使用を伴う。

だが、ケーブルとコネクタを一括で評価したい、あるいはケーブルがコネクタよりも高い遮蔽減衰量を持つであろうことがわかっている^{†15}ような場合、図 12 のように、IEC 62153-4-4 での通常の測定と同

^{†14} サンプルが電氣的に短い場合、整合は重要ではない。

^{†15} 高い周波数ではコネクタの影響 (大抵はケーブルとコネクタとのシールドの接続、あるいはコネクタの嵌合箇所での接続の不完全さに伴う) が支配的となることが多い。

様、ケーブルとコネクタを測定用チューブ内に入れて延長チューブなしで測定を行なうこともできるだろう。

但し、このセットアップで測定対象のコネクタを流れる信号のレベルはケーブルでの損失に応じて低下するため、ケーブルでの損失が大きければコネクタからの漏洩の影響はその分甘く評価されるであろうことに注意した方が良くも知れない。

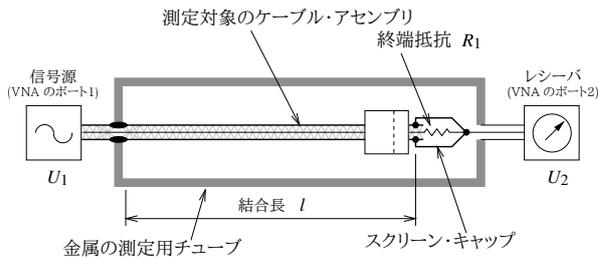


図 12: IEC 62153-4-4 を準用してのケーブルとコネクタの遮蔽減衰量の測定の例

5.2 ケーブル取付用以外のコネクタの処理

測定対象のコネクタのペアの一方が基板実装型などケーブル取付用のものの場合、図5などで示したような形で処理することができないため、状況に応じた工夫が必要となるだろう。

パネル取り付け型の同軸コネクタのように実際の使用でコネクタの外部導体(シールド)をシールド・ケースに接続することが意図されたコネクタの場合は、図13の例のように、小さいシールド・ケースにコネクタを取り付けて測定することができそうである。

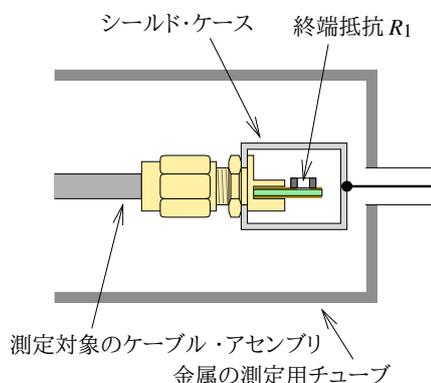


図 13: パネル取り付け型コネクタの処理の例

実際の使用でコネクタの外部導体(シールド)をプリント基板のグラウンド・プレーンには接続するがシールド・ケースには接続するようになっていないコネクタの場合、例えば実際の取り付け状況を模擬するために片面をグラウンド・プレーンとした小さい両面基板に実装して必要な範囲でシールドする(図14)、あるいはシールドを行わずにレシーバへの接続は基板のグラウンド・プレーンから直接行なって測定するなど、コネクタの構造や意図された取り付け方、またどの部分からの漏洩までを評価に含めたいかなどに応じて個別に対応を考えることが必要となるかも知れない

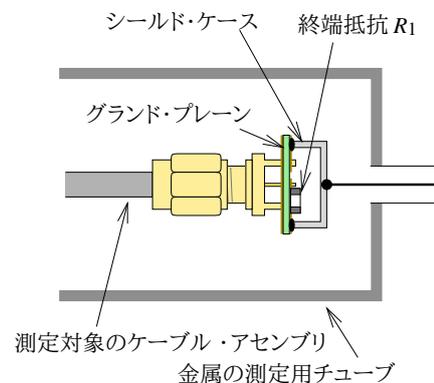


図 14: 基板実装型コネクタの処理の例 — 終端は遮蔽するがレセプタクルは遮蔽しないことにした場合

5.3 ケーブルの影響を除きたい場合

IEC 62153-4-7 では接続ケーブルの影響の低減のために接続ケーブルを金属の延長チューブで覆い接続ケーブルのシールドと延長チューブをコネクタの近くで接続するようになっている(図5)。だが、この接続では接続ケーブルの一部が露出した状態となり、その測定の結果への影響が懸念されることもあるかも知れない。

接続ケーブルの影響をより確実に除きたい場合は、図15で示すように延長チューブをコネクタの金属のボディーに直接接続することで、接続ケーブルの、また接続ケーブルとコネクタとの接続部の影響を除いて測定を行なうことも可能だろう。

5.4 特性インピーダンスの同定

測定対象のケーブルの特性インピーダンスが不明な場合、以下のいずれかの方法で測定することがで

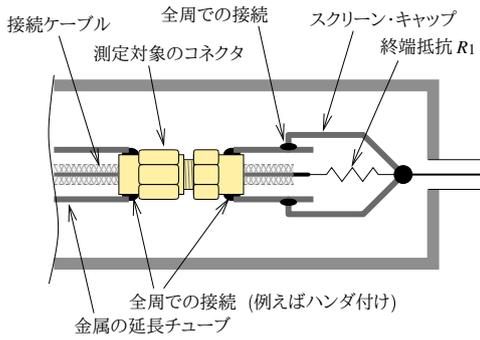


図 15: 接続ケーブルの影響の排除

きる:

- 立ち上がり時間 200 ps 以下の TDR (time domain reflectometer) で測定する。
- サンプルの長さが $\lambda/8$ 程度となる周波数、

$$f_{\text{test}} \approx \frac{c_0}{8 \cdot L_{\text{sample}} \cdot \sqrt{\epsilon_{r1}}}$$

における、遠端を短絡とした時のインピーダンス Z_{short} 、及び開放した時のインピーダンス Z_{open} を測定し、サンプルの特性インピーダンス Z_1 を

$$Z_1 = \sqrt{Z_{\text{short}} \cdot Z_{\text{open}}}$$

より求める。

5.5 その他の測定法の例

5.5.1 IEC 62153-4 シリーズ

IEC 62153-4 シリーズでは表 1 に示すような測定法が述べられている。

例えば IEC 62153-4-5 では、図 16 のように吸収クランプを用いて結合減衰量や遮蔽減衰量を測定する方法が述べられている。

5.5.2 MIL-STD-1344A Method 3008

MIL-STD-1344A Method 3008^[5] では、図 17 に示すような、シールド・コネクタのシールド性のリバブレーション・チャンバー (モード攪拌チャンバー) を用いた評価方法が述べられている。

この評価では、シールド・チャンバー内の入力アンテナ (図 17 ではワイヤで示しているが、通常は広帯域アンテナが用いられる) から放射された電磁界

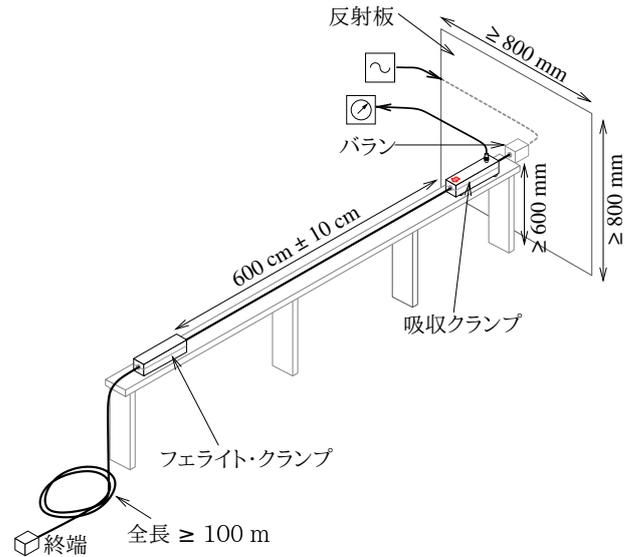


図 16: IEC 62153-4-5 (吸収クランプ法) の測定セットアップの例

を測定対象のコネクタやケーブルがどの程度拾い上げるかを測定し、その結果を参照アンテナ (シールドされていないワイヤ) で行なわれた同様の測定の結果と比較することで、測定対象のコネクタやケーブルの遮蔽の性能を知ることができる。

このようなシールド・チャンバー内の電磁界は壁面での反射に伴って著しく不均一となるが、適切に設計されたリバブレーション・チャンバーでは、スターラ (攪拌子) でチャンバー内のモードを乱すことによって統計的に均一な、またランダムな偏波や入射方向の電磁界を得ることが可能である。この測定法では、またチャンバー内での測定対象のコネクタやケーブルの位置や配置、また偏波や指向特性^{†16}の測定結果への影響が抑えられるとともに、チャンバー内の別の位置に設置された参照アンテナで得られた結果と直接比較することが可能となっている。

MIL-STD-1344A ではこの測定法は 1~10 GHz までに対するものとして述べられている。だが、その適用が 10 GHz までに制限される技術的な理由はなく、より高い周波数までの測定に用いることも可

^{†16} 単純にワイヤを真っ直ぐに引いただけのものであっても、それが電氣的に長くなれば複雑な放射パターンを示すようになる。これと同様の測定をリバブレーション・チャンバーではなく電波暗室で行なう (例えば電波暗室内で測定対象のケーブルやコネクタにアンテナから電磁波を照射してケーブルやコネクタで拾われた信号のレベルを測定する、あるいはその逆に測定対象のケーブルやコネクタに信号を流してそれから漏洩した電磁波をアンテナで測定するような) ことも考えられるだろうが、その場合はこれらの影響の考慮も必要となりそうである。

IEC 62153-4-2	遮蔽減衰量と結合減衰量 — 注入クランプ法
IEC 62153-4-3	表面伝達インピーダンス — 三重同軸法
IEC 62153-4-4	遮蔽減衰量 — 三重同軸法
IEC 62153-4-5	遮蔽減衰量と結合減衰量 — 吸収クランプ法
IEC 62153-4-6	表面伝達インピーダンス — ライン注入法
IEC 62153-4-7	伝達インピーダンス、遮蔽減衰量、結合減衰量 — 三重同軸チューブ・イン・チューブ法
IEC 62153-4-8	容量性結合アドミタンス
IEC 62153-4-9	シールド付き平衡ケーブルの結合減衰量 — 三重同軸法
IEC 62153-4-10	貫通/電磁ガasketの伝達インピーダンスと遮蔽減衰量
IEC 62153-4-11	パッチ・コード、同軸ケーブル・アセンブリ、コネクタ付きケーブルの結合減衰量と遮蔽減衰量 — 吸収クランプ法
IEC 62153-4-12	接続ハードウェアの結合減衰量と遮蔽減衰量 — 吸収クランプ法
IEC 62153-4-13	リンクとチャンネルの結合減衰量 — 吸収クランプ法
IEC 62153-4-14	ケーブル・アセンブリの結合減衰量 — 吸収クランプ法
IEC 62153-4-15	伝達インピーダンス、遮蔽減衰量、結合減衰量 — 三重同軸セル

表 1: IEC 62153-4 シリーズの測定法

	ケーブル	コネクタ、ケーブル・アセンブリ
遮蔽減衰量 a_s	IEC 62153-4-4	IEC 62153-4-7
結合減衰量 a_c	IEC 62153-4-9	IEC 62153-4-7
伝達インピーダンス Z_T	IEC 62153-4-3, -4-4	IEC 62153-4-7

表 2: IEC 62153-4 シリーズの三重同軸法の適用

能だろう。^{†17}

一方、低い周波数で均一性を得るためには大きなチャンバーとスターラが必要となるため、この測定法は低い周波数での測定にはあまり適さない。

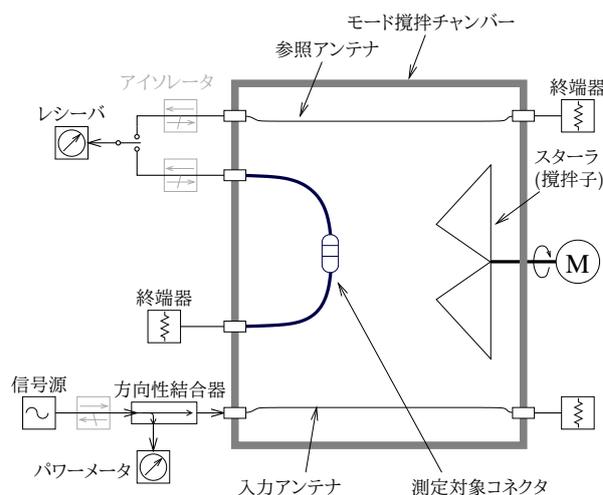


図 17: MIL-STD-1344A Method 3008 の測定の原理 (MIL-STD-1344A Notice 2^[5] Figure 2 に基づく)

^{†17} 例えば [6] では 40 GHz までの測定について報告されている。

5.5.3 その他

例えば [7] は他のいくつかの評価法に関する情報を含み、その他にもケーブルやコネクタのシールドに関連する多くの論文が出されている。

[4] はケーブルのシールドに関する書籍で、評価法のみでなく、ケーブルのシールドに関連する様々な話題が扱われている。

6 参考資料

- [1] 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*
- [2] IEC 62153-4-7, *Metallic communication cable test methods – Part 4-7: Electromagnetic compatibility (EMC) – Test method for measuring of transfer impedance Z_T and screening attenuation a_s or coupling attenuation a_c of connectors and assemblies up to and above 3 GHz – Triaxial tube in tube method*

- [3] *Measuring the EMC on RF-connectors and connecting hardware. Tube in tube test procedure*, Bernhard Mund, 2019,
https://bda-connectivity.com/wp-content/uploads/2019/08/bda_EM Czuerich_script.pdf
- [4] *Cable Shielding for Electromagnetic Compatibility*, Anatoly Tsaliovich, Springer, 1995, ISBN: 1441947396
- [5] MIL-STD-1344A Notice 2 (1981), *Test Methods for Electrical Connectors*
- [6] *Shielding effectiveness measurements for an SHF/EHF field-to-wire coupling model*, Andrew T. McMahon et al., National Symposium on Electromagnetic Compatibility, IEEE, 1989, DOI: 10.1109/NSEMC.1989.37221,
<https://doi.org/10.1109/NSEMC.1989.37221>
- [7] *Cable Shielding Test Methods: A comparison of different Test Methods*, Joachim Mueller, 2007 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, IEEE, 2007, DOI: 10.1109/IEMC.2007.231,
<https://doi.org/10.1109/IEMC.2007.231>