

ケーブルのシールド特性の評価 — MIL-STD-1377 の概要

株式会社 e・オータマ 佐藤智典

2023 年 12 月 16 日

目次

1	概要	1
2	表面伝達インピーダンスの測定 (100 kHz~30 MHz)	1
2.1	測定法	1
2.2	使用機器	2
3	シールド効果の測定 (1~10 GHz)	2
3.1	シールド損失測定	3
3.2	校正測定	4
3.3	シールド効果の計算	4
4	補足	4
4.1	MIL-STD-1377 に含まれるその他の測定法	4
4.2	シールド性の評価に関するその他の MIL 規格	4
5	参考資料	4

1 概要

MIL-STD-1377^[1] では、ケーブル、コネクタ、エンクロージャのシールド特性、またフィルタの特性の評価の方法が述べられている。これは 1971 年に発行された極めて古い規格であるが、改訂版は発行されておらず、当時のままの内容となっている。

本稿では MIL-STD-1377 で述べられている測定法のうち、ケーブルのシールド特性の評価の方法、すなわち

- 100 kHz~30 MHz の表面伝達インピーダンスの測定 (§2)
- 1~10 GHz のシールド効果の測定 (§3)

について解説する。

但し、ここでの説明は十分に正確なものであるとは限らないので、正確な情報は MIL-STD-1377^[1] そのものを参照していただきたい。

なお、この規格には 30~1000 MHz に対する測定法は含まれていないが、その周波数範囲の利用が限定的である (少なくとも当時の海軍において) こと、またその周波数範囲でのシールドの欠陥は他のいずれかの測定に現れるであろうため 30~1000 MHz で

のシールド効果の測定は不要と考えられることがその理由として述べられている。

2 表面伝達インピーダンスの測定 (100 kHz~30 MHz)

この測定は、試験対象ケーブルかそのセグメントが電氣的に短い周波数範囲について、単純にケーブルのシールドに電流を流してシールドの 2 点間に現れる電圧を測定してその結果から表面伝達インピーダンスを算出するという、非常に単純なものである。^{†1}

2.1 測定法

測定は以下のように行なうことができる:

1. 図 1 のように接続する。
試験対象ケーブルが多芯の場合、接続する導体の選択は任意である;
2. 測定周波数範囲内の 1 オクターブを超えない周波数毎に、遠端を短絡した試験対象ケーブルに RF 電流計を通して信号発生器から RF 電流 I を注入する;
3. 試験対象ケーブルの両端のシールドのあいだの RF 電圧 V を測定する;
4. 試験対象ケーブル (その全長での) のそれぞれの測定周波数における表面伝達インピーダンス (surface transfer impedance; STI) Z_T は、この測定結果から $Z_T (\Omega) = V/I$ によって求めることができる。

また、規格では表面伝達インピーダンスを長さで正規化するようには書かれていないが、

^{†1} 表面伝達インピーダンスのより洗練された測定法は例えば IEC 62153-4-3^[3] に見られる。

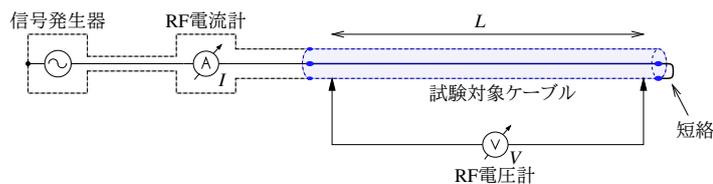


図 1: シールド・ケーブルの表面伝達インピーダンスの測定の原理 (100 kHz~30 MHz)

長さで正規化された表面伝達インピーダンス $Z_{T(\text{norm})}$ はその結果を試験対象ケーブルの長さ (RF 電圧 V の測定点間の距離 L (m)) で割ることで、すなわち $Z_{T(\text{norm})}$ (Ω/m) = Z_T/L によって求めることができる。

試験対象ケーブルが波長の $1/10$ よりも長い場合、波長の $1/10$ 以下の長さ毎に測定を行ない、それぞれで得られた電圧を加算する。^{†2}

測定限界は RF 電圧計 (差動プローブ) の入力雑音、また周囲の電磁環境からのノイズの結合の影響を受け、これは試験対象ケーブルの入力側を短絡した時 (あるいは信号発生器の出力をオフとした時) の RF 電圧計の測定値から判断できる。

これはケーブルのシールドで測定された電圧よりも十分に低いべきであり、必要な場合、例えば低入力雑音の能動差動プローブや差動増幅器の使用、狭帯域の電圧測定器の使用、あるいは一次側の電流を大きくすることで改善できるかも知れない。

2.2 使用機器

- 信号発生器は必要な周波数範囲で所望の電流を出力できる必要がある。

出力を短絡状態とする (図 1) ため、その特性によっては直列に制限抵抗を入れることが必要となるかも知れない。

- RF 電流計は例えば電流プローブ (プローブにケーブルの芯線のみを通し、全体をシールド・ケースに入れる) とその出力の測定に適した任意の RF 電圧測定器とで実現できる。
- RF 電圧計は平衡入力のものが必要で、RF 差動プローブや差動増幅器 (低レベル信号用のもの) が必要となりそうである。

^{†2} 30 MHz では自由空間においては $\lambda = 10$ m で、速度係数が 0.5 と仮定してもケーブル長 L が 0.5 m 以下であれば全長が試験対象ケーブル上の波長の $1/10$ を超えない。

3 シールド効果の測定 (1~10 GHz)

ある種のリバレーション・チャンバー (モード同調チャンバー) を用い、チャンバー内に張られたワイヤを入力アンテナと出力アンテナ^{†3}とするもので、試験対象ケーブルのシールド効果を出力アンテナとして用いられるシールドされていないワイヤを基準として求めることができる。^{†4}

周波数範囲は 1~10 GHz となっているが、必要であれば上限周波数は 40 GHz まで拡大できる旨の記載がある。

パドル・ホイール・チューナー (スターラ) の形状も具体的に示されている (図 3) が、規格に厳格に従う必要がない場合、これに準じた測定は、必要な周波数範囲でのフィールドの均一性が確認された現代的な設計のリバレーション・チャンバーを用いて出力アンテナと試験対象ケーブルを均一性が確認された領域内に引き、また入力アンテナとしてチャンバー内に引かれたワイヤの代わりに広帯域アンテナを用いて行なうこともできると思われる。

この測定は図 2 で示すようなセットアップを用いて以下のように行なうことができる:

1. 試験対象ケーブルを用いてのシールド損失測定 (§3.1);
2. 基準となる出力アンテナを用いての校正測定 (§3.2);
3. それらの結果からのシールド効果の算出 (§3.3)。

^{†3} ここで「入力」と「出力」はチャンバーから見たもので、入力アンテナは送信アンテナ、出力アンテナは受信アンテナとなる。

^{†4} この測定法はコネクタのシールド性の測定法として示されている MIL-STD-1344A Method 3008^{[2][4]} と似ている。

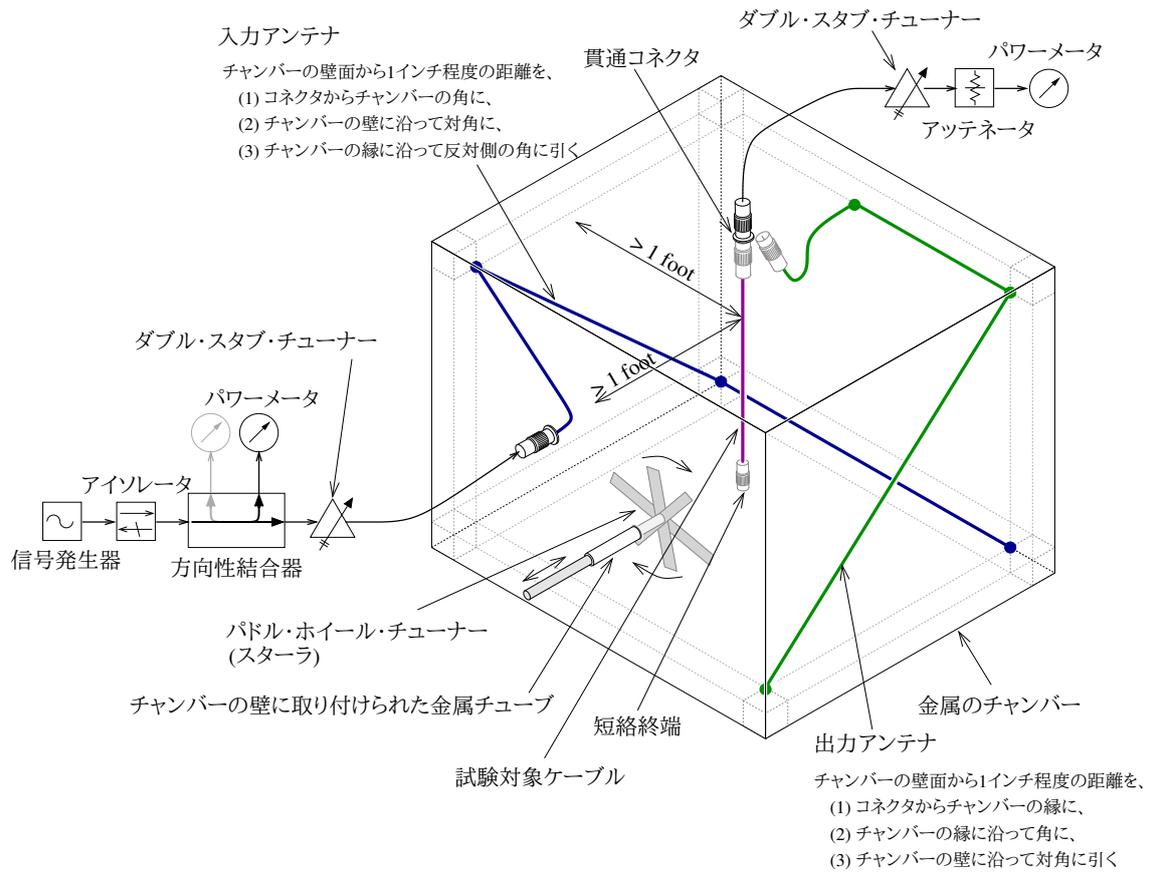


図 2: シールド・ケーブルのシールド効果の測定 (1~10 GHz)

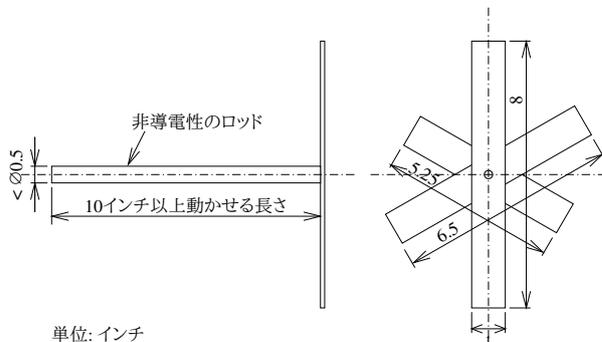


図 3: パドル・ホイール・チューナー

3.1 シールド損失測定

1. 貫通コネクタから出力アンテナを外し、先端を短絡終端した試験対象ケーブルを接続する (図 2)。

貫通コネクタへの試験対象ケーブルの接続をケーブルにコネクタを取り付けて素直に行なえる場合もあるかも知れないが、そのようなコネクタを取り付けることができない場合、工夫が

必要となるかも知れない。

また、コネクタ周辺 (ケーブルとコネクタの接続部、またコネクタの勘合部) からの漏洩も一緒に測定されることになるため、シールド性の高いケーブルの測定に際してはコネクタ周辺からの漏洩を抑えるように工夫が必要となるかも知れない;

2. それぞれの周波数について、

- (a) ダブル・スタブ・チューナーを調整し、出力側で測定される電力が最大となるようにする;
- (b) パドル・ホイール・チューナーを回転、また前後させ、出力側で測定される電力が最大となるようにする;
- (c) ダブル・スタブ・チューナーを再調整する;
- (d) 出力側の最大電力 (P_{OS}) とキャビネットに注入される進行波電力 (P_{IS}) を測定する。

3.2 校正測定

1. 貫通コネクタから試験対象ケーブルを外し、出力アンテナ (図2 のように張られた、シールドされていないワイヤ) を接続する;
2. それぞれの周波数について、
 - (a) §3.1と同様に出力が最大となるようにダブル・スタブ・チューナーとパドル・ホイール・チューナーを調整する;
 - (b) 出力側の最大電力 (P_{OC}) とキャビネットに注入される進行波電力 (P_{IC}) を測定する。

3.3 シールド効果の計算

それぞれの周波数について、

$$\text{シールド効果 (dB)} = 10 \log \left(\frac{P_{IS} \cdot P_{OC}}{P_{OS} \cdot P_{IC}} \right)$$

を計算する。

4 補足

4.1 MIL-STD-1377 に含まれるその他の測定法

MIL-STD-1377 にはその他に以下のような測定法が含まれる:

- コネクタのシールド効果の測定 (100 kHz～30 MHz)
- 兵器エンクロージャのシールド効果の測定 (100 kHz～30 MHz)
- 兵器エンクロージャのシールド効果の測定 (1～10 GHz)
- 負荷が既知なフィルタに対する 30 MHz 以下の効果の測定
- 負荷が不明なフィルタに対する 300 MHz 以下の効果の測定
- 負荷が不明なフィルタに対する 300 MHz 以上の効果の測定

4.2 シールド性の評価に関するその他の MIL 規格

- MIL-STD-285, *Attenuation Measurements for Enclosures, Electromagnetic Shielding, for Electronic Test Purposes, Method of*
シールド・ルームなどのシールド性の評価の方法が示されている。
- MIL-STD-1344A, *Test Methods for Electrical Connectors*
コネクタの試験に関する規格で、その一部としてシールド性の評価の方法を含む。[2][4]

5 参考資料

- [1] MIL-STD-1377 (1971), *Department of Defense Test Method Standard: Effectiveness of Cable, Connector, and Weapon Enclosure Shielding and Filters in Precluding Hazards of Electromagnetic Radiation to Ordnance (Hero), Measurement of*
- [2] MIL-STD-1344A Notice 2 (1981), *Test Methods for Electrical Connectors*
- [3] IEC 62153-4-3, *Metallic communication cable test methods - Part 4-3: Electromagnetic compatibility (EMC) - Surface transfer impedance - Triaxial method*
- [4] 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>