

高シールド材における電磁波シールド効果 測定手法の提案

鶴田誠, 馬場康壽(電子技術部電子システムグループ)

1. はじめに

近年, 地球環境の課題に対して, 脱炭素化に向けたカーボンニュートラルの実現の施策が推進されている. 国土交通省の「2020年度温室効果ガス排出量(確報値)概要」^[1]によれば, 自動車・船舶の運輸関連のCO₂排出量は, 日本全体の2割弱を占めている. これらの課題を解決するために, 電気自動車等の技術が注目されている.

電気自動車は, 主に蓄電池・インバータ・電動機・制御ユニット等で構成されている. このために, 車内電気機器に対する影響を鑑み, 電気自動車から発生するノイズ低減が課題となる.

このノイズを低減する方法は, 大きくノイズ発生源におけるノイズ低減・ノイズを外部に漏らさない電磁波シールド等が考えられる. 電磁波シールド効果の測定方法として, KEC^[2]法をはじめとした方法が用いられている. しかし, KEC法を適用して高シールド材を測定する場合, シールド材を通過した電磁波のエネルギーが弱まることにより, 正しく実施できない課題が生じる.

本稿では, 高シールド材のKEC法の測定方法の留意点について検討した結果を報告する.

2. KEC法による高シールド材の測定系の概要

2.1. KEC法の測定系の概要

KEC法の測定系は, 図1に示す通りに構成される. KEC法の測定では, 測定治具内にサンプルを挟んでシールド効果を測定している. 高シールド材になるとシールド効果が高いために, ポート1から入力された電力は, ポート2では大幅に減衰されて出力される.

そのために, KEC法の治具のポート2側と増幅器を接続するケーブルを含む測定系の構成が重要になる.

2.2. 課題の定式化

本報告では, 高シールド材の測定を実施する場合における課題について検討を進める. 高周波の微弱信号を取扱う

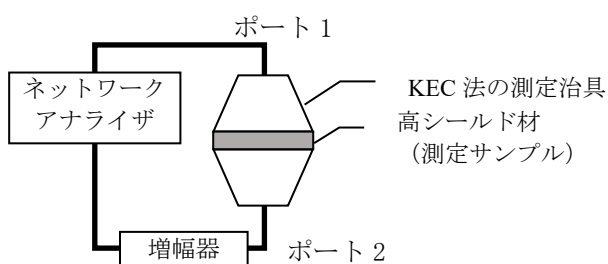


図1. KEC法の測定系

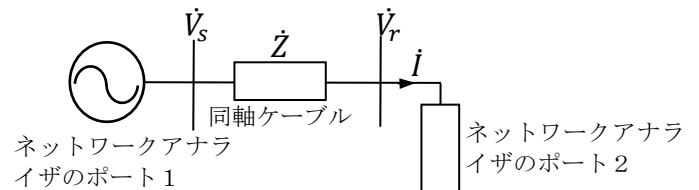


図2. KEC法の測定系のモデル化

場合において, 低CNRあるいは低電力の部分に注意を払う必要がある. そこで, 図1におけるKEC治具のポート2側と電力増幅器の間に関して, 一般性を損なわない範囲で定量的に解析可能な測定系をモデル化した結果を図2に示している. この図2の解析モデルに対して, 入出力の複素電圧を次の通りに定義する.

$$\begin{aligned} \dot{V}_s - \dot{V}_r &= I \dot{Z} \quad [\text{V}] \\ \dot{V}_s &= \dot{V}_e e^{j\delta} \quad [\text{V}] \\ \dot{V}_r &= \dot{V}_f \quad [\text{V}] \end{aligned}$$

ただし, δ は電圧 \dot{V}_s と \dot{V}_r 間の位相差である相差角[rad]とする. また, \dot{V}_r と I の位相差は力率角 θ [rad]とする. また, (\cdot) は複素数であることを表す.

次に, ネットワークアナライザのポート2側の電力増幅器の入力端の皮相電力は, 次の通りに定義される.

$$\dot{S} = \dot{I}^* \dot{V}_r \quad [\text{VA}]$$

ただし, $(\cdot)^*$ は複素共役とする.

2.3. 高シールド材の測定時の力率角の関係

高シールド材の測定においては, KEC法の治具からの出力であるネットワークアナライザのポート2側の電流は, 小さくなる傾向になると想定される. この電流と力率角の関係は, 図3のベクトル図の関係となる. 力率角が遅れている場合は, 図3(a)に図示する通りに, \dot{V}_r に比較して \dot{V}_s の大きさが大きくなる. 他方, 力率角が進んでいる場合は, 図3(b)に図示する通りに, \dot{V}_s に比較して \dot{V}_r が大きくなる. ネットワークアナライザのポート2側に流れる電流が小さい場合においては, 進み位相が想定されて図3(b)のような状況と考えられる. このような現象は, 一般にフェランチ効果(Ferranti Effect)と呼ばれる.

これはネットワークアナライザのポート2側に流れる負荷電流に依存してポート2側の電圧の大きさが変化し, 測定値が正しくなくなる可能性を示唆している. このために, ネットワークアナライザのポート2側の電力増幅器の入力端に接続されている同軸ケーブル区間の検討が重要であると考えられる.

2.4. 同軸ケーブルの取扱いに関する検討

図 4 は KEC 法の測定系の一例を写真で示したものである。今回の解析対象は、高シールド材の測定を前提としているために、前述の議論から図 4 の赤い波線で囲んだ部分となる。一般論の範疇であるが、高周波等のアナログ信号を取扱う場合に信号の弱い部分の取扱いの考え方が重要になる。

KEC 法における高周波を含むアナログ信号を取扱う上での図 4 の赤い波線で囲んだ解析対象として固定減衰器（以下、スペースが少ない場合は固定 ATT と略す）、同軸ケーブル、コア群の区間の取扱いとその影響について検証する。

本検証では、次の条件を与えて検討を進めて高シールド材の測定方法の提案につなげていく。

- ①同軸ケーブルに複数のフェライトコアを不規則に装荷する方法(本手法は現実の選択肢とならないが、あくまでも本検討のリファレンスという位置づけ)
- ②同軸ケーブルからフェライトコアを未装荷とする方法
- ③フェライトコアの未装荷及び KEC 法の治具のポート 2 側の固定減衰器(6[dB]程度)を取外す方法
- ④フェライトコアの未装荷及び KEC 法の治具のポート 2 側の固定減衰器(6[dB]程度)を取外し高周波グランド対策した場合
- ⑤同軸ケーブルにフェライトコアを装荷せずに、固定減衰器を取外して低電力増幅器から高電力増幅器へ置換える方法

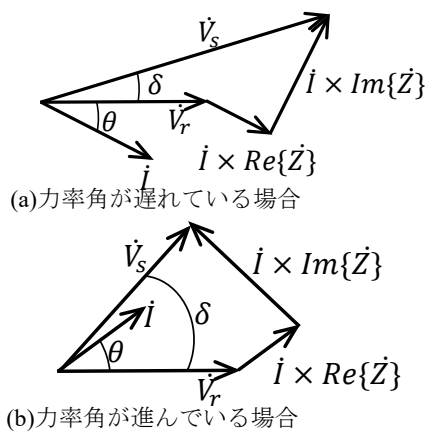


図 3. KEC 法測定におけるベクトル図

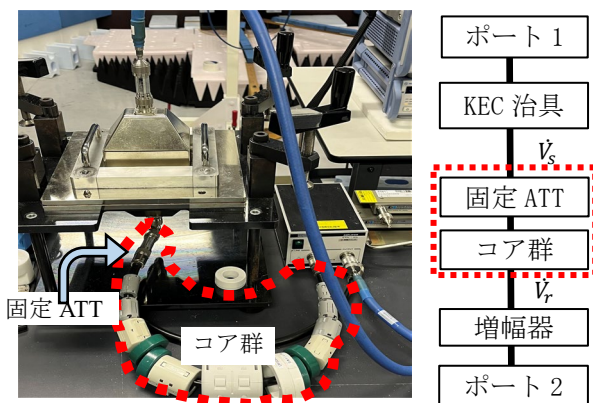


図 4. リファレンスとする KEC 法の測定系

3. 高シールド材の実測における各手法の検証

最初に、同軸ケーブルにフェライトコアを取付けている場合の作用について確認する。図 5 は①と②の方法であり、同軸ケーブルにフェライトコアを装荷/未装荷した場合について比較した結果である。加えて、高シールド環境を模擬する場合において、KEC 法の治具に銅板 1 枚を挟込むのみでは、高シールド材の環境を模擬できない場合がある。このため事前に、高周波電流の伝搬ルートを吟味する必要があることも言及しておく。

フェライトコアが未装荷の場合においては、図 5(a)の低周波数側における低周波帯の S21 で増加していることが確認できる。他方、フェライトコアが装荷の場合において、図 5(a)の低周波数側における低周波帯で S21 が単調減少している要因は、KEC 治具と増幅器を接続している同軸ケーブルにフェライトコアを多量に取付けていることが大きく関連している。この結果のみを考えると①の方法が、適切な対応方法のように理解してしまう可能性がある。つまり、フェライトコアを装荷することにより、一見して正しい処置による結果が得られたとの判断に陥る危険性が内在している。特に、アナログ信号を取扱う場合は、虫の目と鳥の目の視点での評価・解析が大切である。図 4 の写真を直視して図 5 の結果を吟味すれば、一つの考え方として、フェランチ効果が一つの候補となると考えることができる。ところで、この同軸ケーブルは、一般に不平衡伝送線路と考えられており、その特性インピーダンス Z_0 は、

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}} \quad [\Omega]$$

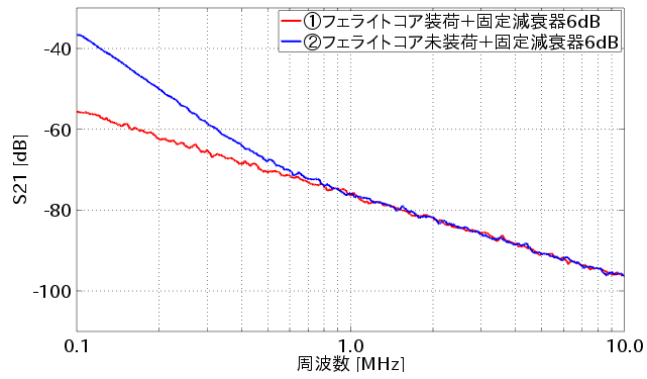
で与えられる。ただし、特性インピーダンス Z_0 の各定数は、同軸ケーブルの直列の往路と復路の電線間の単位長さ当たり一定のインダクタンス $L[H/m]$ と抵抗 $R[\Omega/m]$ 及び、並列の往路と復路の電線間で漏れ電流のもとになる単位長さ当たりのコンダクタンス $G[S/m]$ と、キャパシタンス $C[F/m]$ である。

ここで、 $R \ll j\omega L$ 、 $G \ll j\omega C$ の無損失線路を考えた場合の特性インピーダンス Z_0 は、

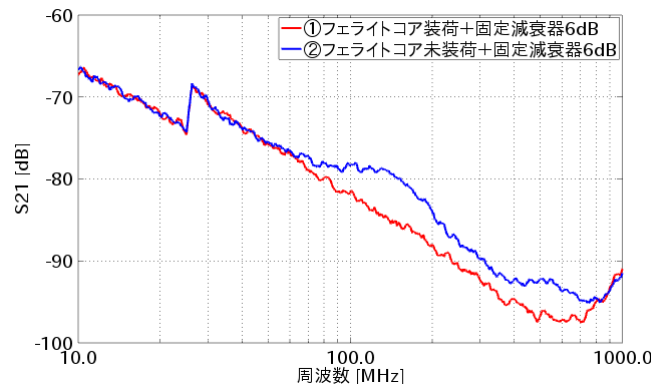
$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad [\Omega]$$

となる。つまり、無損失線路は、インダクタンス $L[H/m]$ とキャパシタンス $C[F/m]$ により伝送路を解析すれば十分であることがわかる。この解析対象となる同軸ケーブルは約 450[mm]であり、図 5 の低周波帯の領域を解析対象とした場合においては当該周波数帯として十分に短いものを使用している。従って、その波長と同軸ケーブル長等の関係から、インダクタンス $L[H/m]$ とキャパシタンス $C[F/m]$ の π 型の等価回路で解析すれば、フェランチ効果が顕著に表れる領域では十分に見通しをつけることができると考えられる。

図 5 の結果の同軸ケーブルにフェライトコア未装荷の場合は、進み電流が増加していると考えられて、 π 型の等価回路において容量性になる。そのために、ネットワーク



(a)低周波側



(b)高周波側

図 5. S21 の測定結果 (フェライトコアの装荷/未装荷)

アナライザのポート 2 側の電圧がネットワークアナライザのポート 1 側に比較して低周波帯において増加すると考えられる。

ここで、図 2 のモデルから電圧 \dot{E}_s 及び $|\dot{E}_r|$ は、次の通りに与えられる。

$$\begin{aligned} \dot{E}_s &= \dot{E}_r + \dot{I}Z \quad [\text{V}] \\ \dot{E}_s &= \dot{E}_r + \left(\frac{1 + j\frac{B}{2}r}{r} \dot{E}_r \right) jX \quad [\text{V}] \\ |\dot{E}_r| &= E_r = \frac{E_s}{\sqrt{\left(1 - \frac{BX}{2}\right)^2 + \left(\frac{X}{r}\right)^2}} \quad [\text{V}] \end{aligned}$$

$$X = \omega L \quad [\Omega]$$

$$B = \omega C \quad [\text{S}]$$

ただし、同軸ケーブルに流れる電流を \dot{I} 、ネットワークアナライザのポート 2 側の入力インピーダンスを純抵抗 r と想定している。次に、観測される電力 P_2 の大きさは、

$$P_2 = \frac{E_r^2}{r} = \frac{1}{\left(1 - \frac{BX}{2}\right)^2 + \left(\frac{X}{r}\right)^2} \frac{E_s^2}{r} \quad [\text{W}]$$

で与えられる。つまり、前述の議論と同様にして、電力 P_2 も増加すると考えられる。

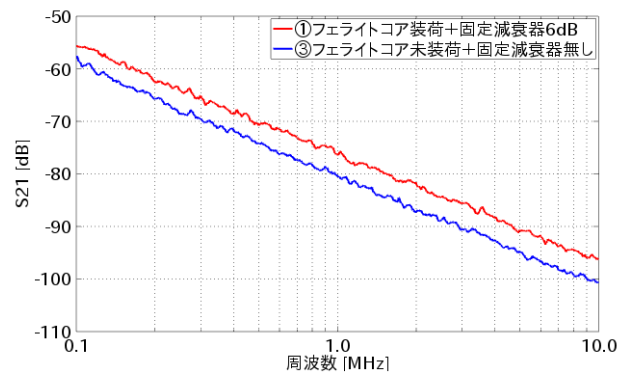
従って、文献[3]のフェライトコア装荷時の同軸ケーブルのインピーダンスモデルを考えると、フェライトコア未装荷時には、S21 が増加したように振る舞うことになる。

この考え方から高シールド材を測定する場合は、 B と X の項の影響を十分に考慮しなければならないことが理解できる。逆に、この観点からフェライトコアを同軸ケーブルに装荷することにより、電力 P_2 が減少することも容易に理解ができる。従って、フェライトコアの装荷は、ノーマルモードの抑制ではなく、 X の項が増加して S21 が抑制される。ここで注意を払わなければならない点は、この議論はあくまでも B, X, r のバランスで決定されるものである。つまり、図 4 のフェライトコアの装着は、現物合わせであって、同軸ケーブルの配置の変更やフェライトコアの偶発的な移動などにより、主に X の項が変化するために不安定性があることを言及しておく。

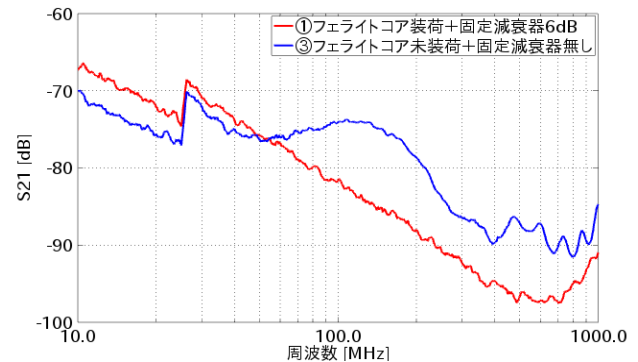
これまでの議論を総合すれば、図 5(a) の低周波数側における低周波帯の S21 の増加は、フェランチ効果と密接に関係していると解釈することができる。この考え方について検証を進める。

ところで、全く別な議論として、図 5(b)の S21 特性に不連続点が確認されるが、これはネットワークアナライザの設定に、主に起因するものである。このネットワークアナライザの設定は、後述する提案方式による KEC 法の測定においては、この不連続点を可能な限り改めるように対応した。

次に、固定減衰器の影響を確認したい。また、前述の議論から図 5(a)の低周波数側における低周波帯の影響の有無は、フェライトコアで変化していた。そこで、フェライトコアの有無と固定減衰器の有無について組み合わせを比較することにする。図 6 の①と③の方法は、同軸ケーブル



(a)低周波側



(b)高周波側

図 6. S21 の測定結果 (フェライトコアと 6[dB]ATT)

ルにフェライトコアを装荷/未装荷+固定減衰器を除去した場合について比較した結果である。

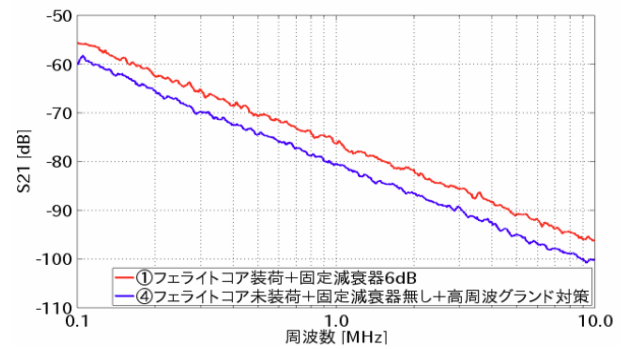
このように固定減衰器を取除くことにより、ネットワークアナライザのポート 2 側に向かって流れる電力が増加すると考えられる。実際に、測定結果である図 6 (a)の低周波数側における低周波帯は、図 5(a)のようなフェランチ効果と考えられる現象による影響は軽減されており、KEC 法の治具の周波数特性が素直に観測されている。逆に、ノーマルモード等に関係する事象であるならば、固定減衰器を取除いたことに起因して低周波帯の増減の説明が十分にできないことを言及しておく(少なくともノーマルモードは関係しないと判断できる)。

一方、次の不可解な現象として、図 5(a)から③の固定減衰器を除去した方が、①の固定減衰器を除去しない方に比べて S21 の値が小さくなっている点に関して注意を払う必要がある。この原因として考えられる要因は、同軸ケーブルが①の場合は、同軸ケーブルの伝送線路に多数のフェライトコアを装荷した場合、インダクタンス $L[H/m]$ が不規則に変化するために、特性インピーダンスが $50[\Omega]$ の線路でなく不連続な線路となることが起因しているのではないかと考えられ、複雑な多重反射等が発生する線路になってしまう。加えて、フェライトコア群は固定されていないために、測定の再現性が損なわれるという技術的な課題も生じる。これまでの議論から明らかなように高周波を取扱う場合において、その測定結果が十分に予測できない量となる場合があることに注意を払わなければならない。

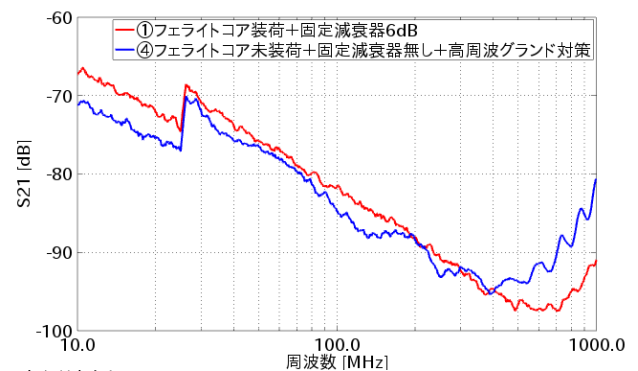
このように KEC 法において測定治具の出力側から電力増幅器までのアナログ系を適切に取扱うことにより、KEC 法の治具を含む測定系が持つ特性が愚直に得られることが確認できた。

一方で、図 6 (b) の高周波数側における高周波帯の S21 特性として増加傾向が確認される。特に注意を払うべきは、図 5 (b)に比較して図 6 (b) の高周波数側における高周波帯の S21 特性の変化が大きくなっている。先にフェランチ効果の議論を展開する際に、同軸ケーブルが短いとしていたが、この周波数の高い領域では、同軸ケーブルの長さに対応が必要になってくる。

この同軸ケーブルとフェライトコアが群をなしている部分は、極めて複雑な物理現象であり高周波グランドとも密接に関係し、測定系及び測定対象のサンプルに依存して、想定外の電流ループが生じると考えられる。当該同軸ケーブルで接続される KEC 法の治具と電力増幅器に対して簡易的な高周波グランド対策を施した結果を図 7 に示す。図 6 (b)の 100[MHz]帯の S21 の盛り上がっている部分が図 7(b)では軽減していることが確認できる。これは高周波グランドを適切に管理することにより、寄生している回路からの電流の流れがコントロールされているからである。このように高周波グランドを施すことにより、不要な電流の経路が軽減されてより正しい測定値を得られる方向に作用することが理解できる。このために、特に高シールド材を測定する場合においては、適切な高周波グランドを施す



(a)低周波側



(b)高周波側

図 7. S21 の測定結果 (フェライトコアと 6[dB]ATT, 高周波グランド対策)

ことが大切になってくる。しかしながら、現時点のセットアップにおいて、高周波帯では、①④ともに高周波グランドに起因する作用が残留している。このために、高電力増幅器を使用した高シールド材を測定対象とする場合は、より理想的な高周波グランド対策等を検討していく必要があることが示された。

さらに、実際の KEC 法の測定では、様々な材料の測定が想定されるために、この事例のような高周波電流の流れを把握するといった測定系の構築・確認が極めて重要になってくる。これを実現するための方策の一つとしては、高電力増幅器と可変減衰器によるきめ細やかな調整が必要になると考えられる。

このように、高シールド材の測定は、ネットワークアナライザのポート 2 側の出力電力が弱まることに起因して、KEC 法の測定系を構築する上で、様々な課題が浮き彫りになった。

4. 高シールド材の実測系の提案方式

高シールド材の測定は、KEC 法治具の出力側の電力が弱い点が本質的な技術的な課題である。これを踏まえて改良点を考慮した高シールド材を測定する KEC 法の測定系の提案と測定の結果を図 8 に示す。

このような構成にすることにより、高シールド材の測定において内在する課題であるフェランチ効果及び高周波側の S21 の期待値から外れるなどの測定誤差を軽減できると考えられる。これに加えて、測定レンジを改善することにより高シールド材の真の能力の評価に迫ることができる。図 8 の測定系を構築する場合の本質的な注意す

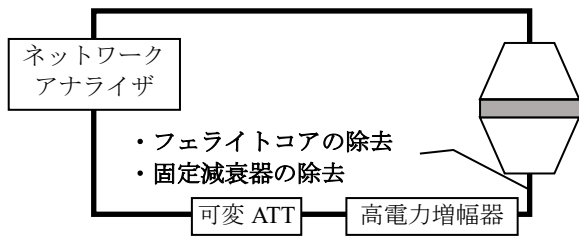


図 8. 提案する KEC 法の測定系

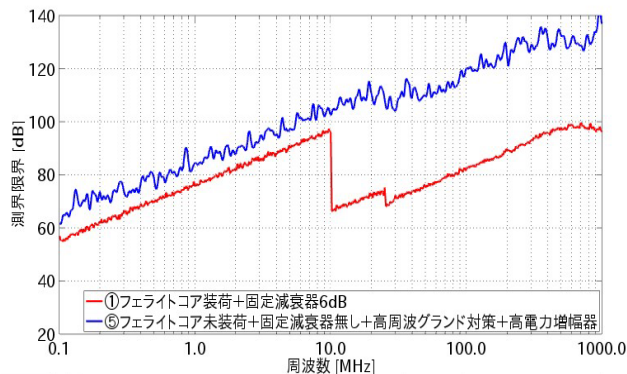
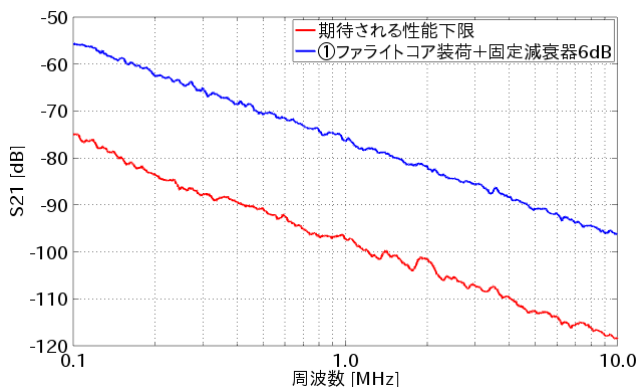
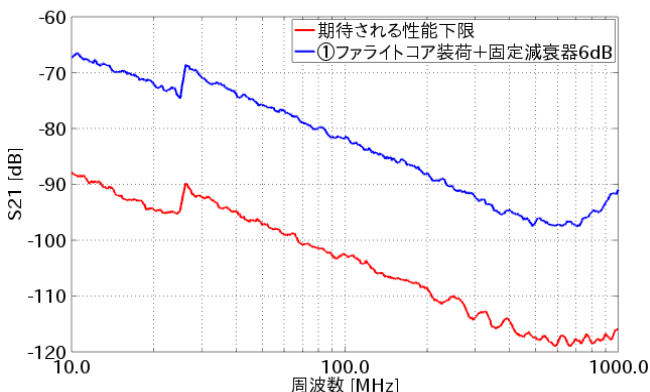


図 9. KEC 法測定における電界測定の限界の比較



(a)低周波側



(b)高周波側

図 10. KEC 法測定系の期待される限界性能

べきポイントを下記の通りに整理する。

(a)KEC 法の治具出力と高電力増幅器間の同軸ケーブルは低損失・短長とする(フェライトコア除去・固定減衰器除去)。

(b)電力増幅器は高利得・低雑音(LNA)の適用

(c)可変減衰器は高電力増幅器の後ろに設置

図 8 の提案方式の KEC 法の測定系の考え方を適用して電界の測定限界を測定した結果を図 9 に示した(測定器具の関係で対応できる範囲で実験を実施した)。この結果から提案する KEC 法は、全体的に特性が改善していることが確認できる。具体的には、次の通りである。

(a)低周波帯では約 10[dB]改善された

(b)高周波帯では約 30[dB]改善された

ただし、図 8 の提案方式で今回の実験に使用した測定器等は、電力増幅等に十分な性能がないために、ネットワークアナライザが本来有する潜在性能には達していないことを触れておく。図 10 は、本検討の環境におけるネットワークアナライザが有する期待される性能の下限である。つまり、図 10 の結果から、さらに 20[dB]を超える性能改善が期待できることがわかる。この結果から推測される期待される改善効果は、

(c)低周波帯では約 20[dB]の改善が期待される

(d)高周波帯では約 50[dB]の改善が期待される

となると推察される。残念ながら、現時点の測定用の電力増幅等では、確認することができなかった。もし必要な性能を有する周辺機器を使用すれば解決される問題である。つまり、高電力増幅器と可変減衰器(可変 ATT)、適切な同軸ケーブルが揃うことで、ネットワークアナライザの限界性能までの測定が可能となると考えられる。

5. 結び

本検討では、高シールド材の測定に対する考え方を整理した。そして、理論的・実験的に示してきたように高シールド材を測定するためには、提案方式のような KEC 法の測定環境が必要になることを示した。さらに、測定範囲拡大等につながる可能性が高まることを示した。他方で、本検討の測定系は図 10 からネットワークアナライザの性能を引出した十分な状態とは言えない。そのために、電力増幅器・可変減衰器・同軸ケーブルなどの適切な機材の導入を通して、高シールド材の測定を可能にしていきたい。今後は、シミュレーションを含めた多面的な検証も進めていけるようにできればと考えている。

今後は、ニーズが高まると考えられる高シールド材を含めた測定系の改善と測定技術の向上に努めていきたい。

【参考文献】

1. <https://www.env.go.jp/content/900445424.pdf>
2. 市川武史, et.al., "ノーマルモードノイズの解析," 信学論(B-II), Vol. J81-B-II, No. 4, pp. 327-335.
3. 針谷栄蔵, "電磁波シールド特性評価技術," 繊維消誌, Vol. 40, No. 2, pp. 100-108, 1999.