

PLC 技術基準のズバリ どこが間違っているのか？

大阪大学大学院基礎工学研究科 北川勝浩

はじめに

我が国の広帯域電力線搬送通信設備（以下 PLC）の技術基準 [1] は、策定時からパブリックコメントや意見聴取などで一般国民から多くの問題が指摘されていたにもかかわらず、それを無視して強行したという経緯があります。実際にこの技術基準に基づいて総務大臣から型式指定を受けて市販されている PLC モデムを一般住宅で使用すると、その住宅の外壁から 10 m 離れても PLC の信号が強く聞こえますし、短波放送の受信に妨害を与えます。そこでシールドループアンテナとスペクトラムアナライザで漏えい電界強度を測定したところ、図 1（上）のように周囲雑音レベルを遥かに超えています。[2] 受信アンテナの位置は敷地の関係で 1 ヶ所に固定しており、住宅の周りで最大点を探したわけではありませんが、それでも最大で 54dBuV/m、技術基準が採用したかなり高めの周囲雑音レベル 28dBuV/m をも 26dB 上回っています。測定地点での周囲雑音レベルは、スペクトラムアナライザの最大値保持測定でも 18dBuV/m 程度であったので、真の値はそれよりもさらに低いはずですが、仮に 18dBuV/m としても、実にそれより 36dB も強い漏えい電界を発生していることになります。CISPR（国際無線障害特別委員会）の専門家らが、PLC による漏えい電界強度を離隔距離 10m で周囲雑音レベルに抑えるとして技術基準を決めた [1] はずなのに、なぜこんなに強い電波が漏れるのでしょうか？

この技術基準には当初から指摘されているとおり、多くの問題があるので、少し整理してみましょう。

A 許容値の数値が甘過ぎる

- (1) 目標とする周囲雑音レベルが高過ぎる
- (2) 電力配線のアンテナ特性の過少評価 [3,4,5]
- (3) 隣家との離隔距離 10m が大き過ぎる
- (4) 複数の PLC による積算効果が無視

B 許容値の測定法の誤りによるザル legalization [6]

今、A(3)(4) は PLC1 台で家の外壁から 10m 離れて測定しているので、36dB の原因としては除外できます。A(1) は大いに問題なので、後で触れますが、技術基準が目標とした周囲雑音レベルと実際の漏えい電界強度との差である 26dB の原因ではありません。そこで、この 26dB の原因は、A(2) と B ということになります。

これらは、PLC による漏えい電磁界の発生メカニズムと密接に関係しているので、まずはそれを図 2 で説

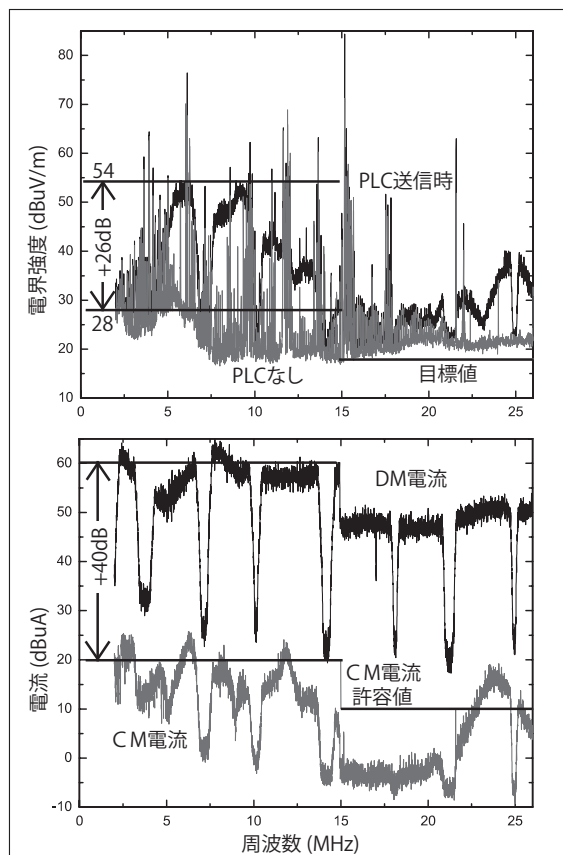


図 1 ロジテック LPL-TXA の (上) 漏えい電界強度、
(下) 差動モード電流、コモンモード電流（木造二階建）[2]

明しましょう。[6] PLC モデムをコンセントにつないで差動モード (DM) に信号を送信します。この際、モデムの不平衡性によって同時にコモンモード (CM) にも信号が送信されます。(破線) このモデムに起因する CM 電流はモデムから遠ざかるにつれて減衰しながら伝搬して行きます。DM 信号も減衰しながら電力配線上を伝搬して行きますが、こちらの電力配線は分岐などを除けば比較的良好な伝送路であるため、その減衰は CM ほど大きくなく、コンセント間の減衰が 10 ~ 20dB とされています。

電力配線上には多くの不平衡要素が存在します。

- スイッチ分岐（天井照明と壁スイッチから構成）
- 引き込み線（日本では柱上変圧器で片側接地）
- 家電製品のうち片切スイッチを使ったもの

PLC モデムから送信された DM 信号がこれらの不平衡要素に到達すると、そこで DM から CM へのモード変換が起こり、CM 電流が発生します。これらの不平衡要素で発生した CM 電流の一部は電力配線を減衰しながら伝搬して行きます。その一部はモデムにも到達します。

一般に、DM 電流は逆向きで同じ大きさの電流が組になっているので、平衡ケーブルからの輻射が遠方で無視できるのと同じ原理で輻射に寄与しません。一方、CM 電流は近くに打ち消す電流が無いので、アンテナ上の電流と同じく輻射に寄与します。そのため CM 電流はアンテナ電流とも呼ばれます。[1]

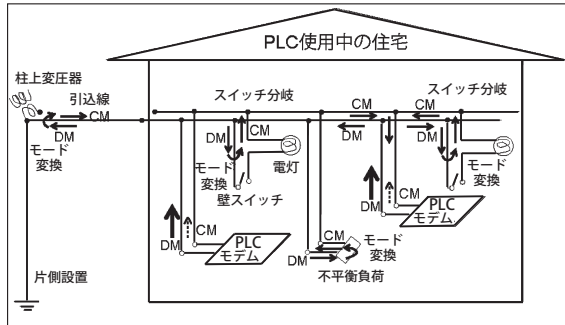


図2 PLC による漏えい電磁界の発生メカニズム

ここで、PLC の場合には、前述のように2種類のCM 電流が存在することに注意する必要があります。一つは、PLC モデムからコンセントを通して電力線に送出されるもので、もう一つは、屋内電力配線上でPLC モデムから離れたところにある不平衡要素でDM 電流からのモード変換によって発生するものです。これらは波の進行方向が逆なので、線路全体で打ち消し合うことはありません。

PLC による漏えい電界を周囲雑音レベル以下に抑えるためには、これら2種類のCM 電流を両方とも規制する必要があります。そこで、2つのCM 電流の性質を個別に調べてみましょう。

PLC モデムの不平衡性に起因するCM 電流 [6]

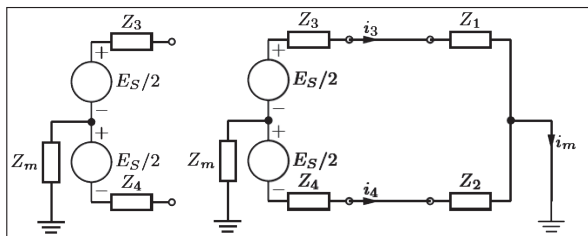


図3 (a) モデムの等価回路、(b) モデム起因のCM 電流

PLC モデムの等価回路を図3(a)に示します。ここで、 $Z_3=Z_0/2-d$ $Z_4=Z_0/2+d$ であり、不平衡性は d で表わされます。 Z_0 は PLC モデムの DM 出力インピーダンスで、今、電力線の DM 特性インピーダンスと整合しているとして、 $Z_0=100\ \Omega$ と仮定します。モデムから電力線に送出される DM 進行波電流は、 $i_{dm}=E_s/2Z_0$ です。図 3(b) のように完

全に平衡な負荷 ($Z_1=Z_2=Z_0/2$) でモデムを終端して、モデムの不平衡性に起因する CM 電流を求めると、

$$i_m=i_{dm}\ 2d/(2Z_m+Z_0-d^2/Z_0)\approx i_{dm}d/Z_m$$

となります。近似は、 $|Z_m|\gg Z_0, |d|$ の場合に成り立ちます。この近似ではモデムの CM インピーダンスは、

$$Z_M=Z_m+Z_3//Z_4=Z_m+Z_0/4-d^2/Z_0\approx Z_m$$

です。以上のことから、モデムの不平衡性に起因する CM 電流 i_m を減らすには、

- ① モデムの DM 信号電流 i_{dm} を小さくする
- ② モデムの不平衡性 $|d|$ を小さくする
- ③ モデムの CM インピーダンス $|Z_M|$ を大きくすることが有効であることが分かります。通信のための信号はできるだけ大きくしたいのが人情なので、①を除外するとしても、②、③の対策によって、モデムの不平衡性に起因する CM 電流は減らすことができます。

図 3(b) の CM だけの等価回路は、図 4(b) となります。

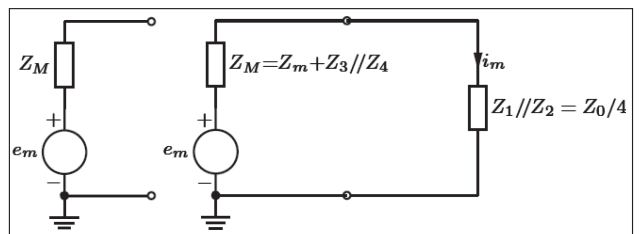


図4 (a) モデム CM 等価回路、(b) 図3(b)CM 等価回路

これから、モデムの CM 等価回路は図 4(a) のように、モデムの CM インピーダンス Z_M と等価 CM 電圧源、

$$e_m=i_m(Z_M+Z_1//Z_2)\approx i_{dm}d$$

で表わされます。これは、先ほどの近似と合わせて、 $|Z_m|\gg Z_0\gg |d|$ の場合に成り立ちます。

電力配線上の不平衡性に起因するCM 電流 [3,5]

ここでの問題は、電力配線上の不平衡性に起因する CM 電流をどう見積もるかです。電力配線上の不平衡要素は、天井、壁、床、配管などに隠れているので、そこで発生する CM 電流を実測するのは困難です。最終的に知りたいのは、コンセントに供給した DM 電流（又は電力）と漏えい電界強度の関係ですから、コンセントの DM から見た電力配線全体の空中線利得を測定するのが最も直接的な方法です。[4] 私が測定した木造二階建てでは $-20\sim 0\text{dBi}$ 程度の利得がありました。

しかし、技術基準の策定にあたっては、コンセントに供給した DM 電流とアンテナ電流の比を表す LCL（縦電圧変換損）という量を用いています。LCL が大きいほど平衡性が高く、小さいほど低いということになります。[1]

コンセントで測った LCL [3]

この LCL の測定法は、コンセントに CM 電圧を印加して、コンセントに発生する DM 電圧を測定して、

その比を求めるというものです。[1] コンセントで印加された CM 電圧は、電力配線上の不均衡要素まで伝搬して、そこで CM から DM へのモード変換を受け、DM としてコンセントまで伝搬します。(図2参照) これは、逆に、コンセントに DM 電流を供給した場合に、不均衡要素まで伝搬し、そこで DM から CM にモード変換されて、CM としてコンセントまで伝搬した電流への変換損失と近似的に等しいことが分かっています。[3] 技術基準では、多数のコンセントで LCL を測定して、それらの 99% をカバーする値として 16dB を採用しました。[1]

しかし、これは本当に知りたかった変換損失でしょうか？漏えい電界の原因となる CM 電流が発生しているのは、電力配線上の不均衡要素のある場所であり、そこから遠ざかるに従って CM 電流は減衰して行きます。コンセントに到達した時には、既に減衰してしまっています。知りたいのは、コンセント近傍の CM 電流ではなく、電力配線上で発生している CM 電流だったはずです。つまり、コンセントで測った LCL は、不均衡要素とコンセントの間の CM 損失分だけ、変換損失を過大評価、CM 電流を過少評価しています。[3]

この CM 損失は不明なので、コンセントで LCL を測っても、真の LCL はそれより小さいということしか分かりません。コンセントから不均衡要素までの DM 損失は、コンセント間の DM 損失の半分の 5～10dB と考えられます。CM 損失は DM 損失よりかなり大きいはずなので、コンセントで測った LCL が 16dB ならば、コンセントに供給された DM 電流と不均衡要素で発生する CM 電流の比を表わす真の LCL は、それより 5～10dB 以上小さいはずですから、数 dB 程度と考えられます。[6]

隠れたアンテナ電流 [5]

さらに、スイッチ分岐で発生する CM 電流の中には、幹線には現れない隠れたアンテナ電流があります。ここでは最も簡単な場合として、スイッチ分岐がフォールデッドダイポール (FD) を形成している場合を考えます。この場合、スイッチ分岐に入射した DM 電流は分岐内では全て CM 電流に変換されて、DM 電流の 2 倍のアンテナ電流が流れます。しかし、そのアンテナ電流は分岐の中に局在しているので、幹線にもコンセントにも現れません。当然、コンセントで測った LCL には全く反映されません。

隠れたアンテナ電流のために、屋内配線のアンテナ能力を LCL で実測することは原理的に不可能です。しかし、コンセントに供給された DM 電流とスイッチ分岐に隠れたアンテナ電流の比を理論的に LCL に換算することはできます。FD のアンテナ電流は入射

DM 電流の 2 倍なので、この部分での変換損失は -6dB です。幹線から FD への分配損を 6dB とします。コンセントから幹線上の FD 入口までの DM 損失は、コンセント間の DM 損失の半分として 5～10dB 程度と見積もられます。これらの和 5～10dB が、スイッチ分岐の LCL です。スイッチ分岐は部屋数よりも多く存在し、それら全ての寄与を考えると、家全体のスイッチ分岐の LCL はこれよりもさらに小さくなり、数 dB 程度と考えられます。

コンセントで測定した LCL から CM 損失を除いたものも数 dB、スイッチ分岐の CM 電流から理論的に LCL に換算したものも数 dB ですから、真の LCL は数 dB と考えるのが妥当です。

以上のとおり、コンセントの DM 電流から屋内配線上で発生するアンテナ電流への変換損失は、コンセントでは測定できないので、LCL に拘るなら、ある程度理論的考察によって推定するしかありません。その結果、IARU や EBU (欧州放送連合) 等が主張する LCL=6dB は、ほぼ妥当な値と考えられます。

ISN による CM 電流測定法の問題点 [6]

モデムが技術基準に適合しているかどうかは、実際の電力配線ではなく、図5のように、それを模したインピーダンス安定化回路網 (ISN) を接続して、プローブで CM 電流を測定し、それが許容値以下かどうかで判断されます。ISN の LCL を電力配線の LCL と同じにすることによって、電力配線で発生するのと同じ大きさの CM 電流を発生させて測定することを意図しているようです。[1] そこで、この測定法が本当にうまく機能するかどうか確認してみましょう。

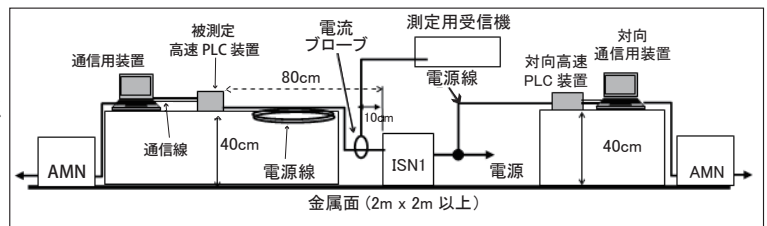


図5 電源端子妨害波電流の測定（通信状態）[7]

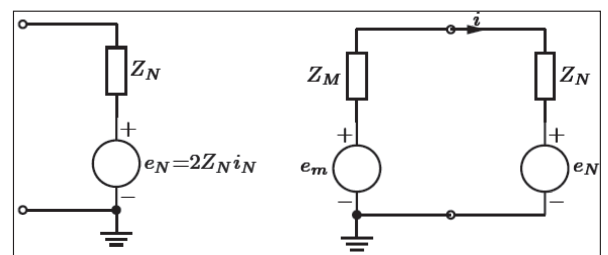


図6 (a) ISN の CM 等価回路、(b) モデムと ISN を接続した場合の CM 等価回路

ISN の細部に立ち入らず、その機能を理想的に図 6(a) の CM 等価回路で表します。ISN の CM インピーダンスは純抵抗 $Z_N=25\ \Omega$ で、ISN の CM が Z_N で整合終端された場合に、ISN に入射する DM 電流 i_{dm} の $1/k$ の CM 電流 $i_N=i_{dm}/k$ が流れるように設計されています。ここで、 k は LCL の真値 (dB では無く比) とします。等価電圧源は次のようになります。

$$e_N=2Z_N i_N=i_{dm} 2Z_N / k$$

PLC モデムを ISN に接続した場合の CM 等価回路は、図 6(b) のようになります。この時の CM 電流 i は、 $i=j_m-j_N$ 、 $j_m=e_m/(Z_M+Z_N)$ 、 $j_N=e_N/(Z_M+Z_N)$ となり、モデムの不平衡性に起因する CM 電流 j_m と、ISN の不平衡性に起因する CM 電流 j_N の両方を含んでおり、何を測っているのかよく分かりません。 j_m 、 j_N と本来測りたかった i_m 、 i_N との関係を調べてみましょう。

モデムの不平衡性による CM 電流

今、 $Z_N=Z_0/4$ なので、

$$j_m=i_m/[1+(Z_N-Z_0/4)/Z_M]=i_m$$

となり、 j_m はモデムの不平衡性による CM 電流そのものを表わしていることが分かります。これは、モデムの CM から見た負荷が、モデムの CM 電流を定義したときの図 4(b) と、CM 電流を測定するときの図 8(b) で、ともに $Z_0/4=Z_N=25\ \Omega$ と等しいので、当然です。

ISN の不平衡性による CM 電流

一方、ISN の不平衡性による CM 電流は、

$$j_N=i_N 2/(1+Z_M/Z_N)$$

となり、本来測りたかった i_N とは異なります。ISN は CM を Z_N で整合終端した場合に CM 電流が i_N 流れるように設計されているので、 Z_N とは異なるモデムの CM インピーダンス Z_M で終端した時に流れる電流 j_N が異なるのは当然です。大きさを比べてみましょう。

$|j_N/i_N|=2/|1+Z_M/Z_N|\approx 2Z_N/|Z_M|=50/|Z_M|$ モデムの CM インピーダンス $|Z_M|$ が ISN の CM インピーダンス $Z_N=25\ \Omega$ よりも大きいほど、測定される CM 電流 j_N は本来測りたかった CM 電流 i_N よりも小さくなります。

ザル法の仕組み

以上のことから、この方法で測った CM 電流は、

- モデムの不平衡性による CM 電流はそのまま含む
- ISN の不平衡性による CM 電流は $50/|Z_M|$ 倍しか含まない

ことが分かります。この CM 電流に対して許容値を適用すると、モデムの不平衡性による CM 電流は規制されますが、電力線の不平衡性による CM 電流は、例えば ISN の LCL が電力線の真の LCL と等しいとしても、実際に発生する CM 電流の $50/|Z_M|$ 倍の電流に対して許容値を適用することになります。これは、許容値

を $|Z_M|/50$ 倍甘くしたのと同じです。つまり、モデムの CM インピーダンスさえ高くすれば、許容値はいくらでも甘くなります。これこそが、この技術基準がザル法となっている根本原因です。

実際に、モデムメーカーはこの技術基準の穴を突いて、技術基準が想定したよりも遥かに大きな DM 信号出力、多くは図 1 (下) のように CM 電流許容値よりも 40dB 程度大きい DM 電流で、モデムの型式指定を受けて出荷しています。技術基準が想定したのは CM 電流許容値より LCL=16dB だけ大きな DM 電流だったはずで、それより 24dB 大きな DM 電流をコンセントに供給しているので、たとえ電力線の不平衡性が本当に LCL=16dB であったとしても、技術基準の想定値よりも 24dB 大きな CM 電流が電力線に発生し、24dB 大きな漏えい電界が発生するのは当然です。

PLC とその他の機器との本質的違い

表 1 に、パソコン (PC) と PLC の CM 電流発生メカニズムの違いを整理します。

表 1 PC と PLC の CM 電流発生メカニズムの違い

機 器	線路	DM 印加	CM 電流発生源	
			機器	線路
PC 通信ポート	通信線	有	有	小
PC 電源ポート	電力線	無	有	無
PLC	電力線	有	有	大

PC の通信ポートの場合、DM 信号を印加しますが、通信線には不平衡分岐は無いので線路上でモード変換によって生じる CM 電流は電力線に比べればずっと小さいです。従って、PC の通信ポートから入る CM 電流を測定すれば有効な規制が可能なのでしょう。

PC の電源ポートの場合は、DM 雑音はパソコン等で除去されているため存在しません。電力線にはスイッチ分岐など不平衡要素がありますが、元になる DM 電流が存在しないので、CM 電流へのモード変換も起こりません。従って、PC の電源ポートから入る CM 電流を測定すれば有効な規制が可能です。

PLC の電源ポートの場合は、スイッチ分岐など不平衡要素が沢山ある電源線に、DM 信号を印加しますので、電力線上の不平衡要素でのモード変換によって CM 電流があちこちで発生します。(図 2) 従って、PLC の電源ポートから入る CM 電流を測定しても、有効な規制はできません。電力線の不平衡要素で発生する CM 電流を測定して規制する必要があります。

CISPR では、ISN の LCL をコンセントで測った電力線の LCL に合わせれば、電力線上で発生する CM 電流と同じものが測れると考えたようですが、これは

二重に間違いでした。まず、コンセントで測った LCL は、電力線の真の不均衡性を過小評価します。さらに、この測定法では電力線で発生する CM 電流を測定できません。従来の測定法を CM 電流の主要な発生メカニズムが異なる PLC に安易に適用することはできないのです。

図5のように PLC と ISN を短いケーブルでつないで CM 電流プローブで CM 電流を測定した場合、図 6(b) で説明したように、PLC モデムの CM インピーダンス Z_M が直列に入るため、CM 電流は $|Z_M|$ が大きいほど小さくなります。ところが、実際の電力線に PLC モデムをつないだ時は、不平衡要素は電力線上で PLC モデムから離れた場所にあるので、そこで発生する CM 電流は、不平衡要素に入射する DM 電流と不平衡要素だけで決まり、離れたところにある PLC モデムの CM インピーダンスは何の関係ありません。発生した CM 電流が PLC モデムまで伝搬して、そこで反射される時の反射係数には、モデムの CM インピーダンスが関係するので、モデム近傍での CM 定在波電流には効きますが、それは既に減衰した後のものなので、漏えい電界の主要な原因ではありません。

漏洩電界を大きくしているその他の原因

実際には、漏えい電界強度は、技術基準の想定値よりも 26dB 大きく、さらに真の周囲雑音レベルからは 36dB も大きいので、前述の技術基準の穴を突いた 24dB のモデム出力超過だけでは説明できません。CISPR22 で許容値が決まっている PLC 以外の PC などの漏えい電界強度が真の周囲雑音レベル以下であるとすると、少なくとも 36dB と 24dB の差である 12dB の原因がどこかにあるはずです。この一部は、既に述べた技術基準の LCL=16dB と真の LCL との差であり、一部は PLC 技術基準が採用した周囲雑音レベルと真の周囲雑音レベルの差にあると考えられます。

過大な周囲雑音レベル

図7は技術基準が想定した周囲雑音レベル(帯域幅 9kHz)の電界強度を、ITU-R 勧告 P.372-9 の周囲雑音レベルと比較したものです。参考のために、帯域幅 2.4kHz の受信機に半波長ダイポールをつないだ時の S9 (50 μ V=34dBuV)、S5、S1 のノイズレベルも示しています。S 一つあたり 6dB としました。この図から、技術基準が想定している 28dBuV/m(2-15MHz) という周囲雑音レベルがいかに過大なものか明らかでしょう。14MHz でほぼ S9、それ以下のバンドでは S9 を超えています。このように実際とかけ離れた過大な周囲雑音レベルを基準にして、そこまでは雑音を出してもよいという電波環境行政をされたのでは、周囲雑音レベルは本当にそこまで上昇してしまいます。最初は

嘘でもやがてその通りになってしまうのです。従って、周囲雑音レベルの誤りは絶対に許してはいけません。

PLC の技術基準策定に当たっては、ITU-R P.372 のノイズレベルは低すぎて現実的で無いと決めつけ、たった数か所・短時間の測定から周囲雑音レベルを決定しました。しかし、この図の S との比較から、P.372-9 のノイズレベルはそれほど低い値でもないことが分かります。短波帯の周囲雑音レベルを一番よく知っているのは、実際に短波を長時間受信しているアマチュア無線家と BCL です。DX ができる静穏な電波環境を守るには、定量的な周囲雑音データを蓄積して ITU-R や CISPR に提出して行く必要があります。

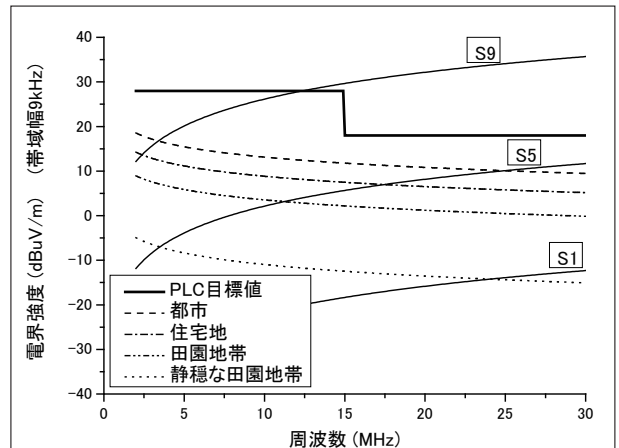


図7 周囲雑音レベル(9kHz)とSメータ(2.4kHz)

おわりに

PLC の技術基準の問題点のうち、漏えい電界が離隔距離 10 m で周囲雑音レベルを 30dB 以上も超える原因について述べました。最大の問題は、CM 電流の測定法に致命的な誤りがあって、許容値がザルになっていることです。その他に、コンセントで測定した LCL が電力線のアンテナ特性を過小評価することと、そもそも目標とした周囲雑音レベルが過大であることも原因の一部です。

引用文献

- [1] 杉浦, 上, 雨宮, 山中, EMCJ2007-36
- [2] M. Kitagawa and M. Ohishi, Proc. EMC Europe 2008, pp.433-438 (Hamburg, Germany).
- [3] M. Kitagawa, Proc. EMC Zurich 2009, pp.1-4.
- [4] 北川, EMCJ2007-54, pp.7-12
- [5] 北川, EMCJ2008-78, pp.21-26
- [6] 北川, EMCJ2008-115, pp.7-12
- [7] 情報通信審議会「高速電力線搬送通信設備に係る許容値及び測定法」についての一部答申(平成18年6月29日)