

Title	住宅環境における屋内広帯域電力線搬送通信からの漏洩電界とコモンモード電流の測定 I
Author(s)	北川, 勝浩; 大石, 雅寿
Citation	電子情報通信学会技術研究報告. EMCJ, 環境電磁工学. 107(226) P.37-P.42
Issue Date	2007-09-14
Text Version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/11094/77667
DOI	
rights	copyright©2007 IEICE
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

住宅環境における屋内広帯域電力線搬送通信からの 漏洩電界とコモンモード電流の測定 I

北川 勝浩[†] 大石 雅寿^{††}

[†] 大阪大学大学院基礎工学研究科
〒 560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3
^{††} 国立天文台

〒 181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1

E-mail: [†]kitagawa@es.osaka-u.ac.jp, ^{††}masatoshi.ohishi@nao.ac.jp

あらまし 我が国の広帯域電力線搬送通信設備 (PLC) の技術基準は、短波帯では PLC モデムを特定の条件の ISN(LCL=16dB, DMZ=100Ω, CMZ=25Ω) に接続したときのコモンモード電流の許容値のみを定めている。しかし、このような規制で漏洩電界が周囲雑音以下に抑制されるかどうかは、科学的に検証されていない。そこで、この技術基準に基づいて型式指定を受け市販されている各種の PLC モデムを、実際に一般住宅で使用し、コモンモード電流と離隔距離 10m での漏洩電界を測定した。その結果、コモンモード電流が許容値を満たしていても漏洩電界は周囲雑音を 30dB 以上も上回ること、コンセントの LCL が高くても許容値を 15dB 以上超えるコモンモード電流が流れること、コモンモード電流や LCL と漏洩電界の間には因果関係が認められないこと、モデムから注入したコモンモード電流を 20dB 以上も上回るコモンモード電流が屋内配線に流れること、15MHz 以下の周囲雑音が技術基準の前提となった値より 10dB 程度低いことが判明した。現行の技術基準は、漏洩電界を周囲雑音以下に抑制し得ないことが分った。キーワード 電力線搬送通信, PLC, 漏洩電界, 周囲雑音, コモンモード電流, LCL

Measurements of the Radiated Electric Field and the Common Mode Current from the In-house Broadband Power Line Communications in Residential Environment I

Masahiro KITAGAWA[†] and Masatoshi OHISHI^{††}

[†] Graduate School of Engineering Science, Osaka University
1-3 Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka, 560-8531 Japan

^{††} National Astronomical Observatory of Japan
2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo, 181-8588 Japan

E-mail: [†]kitagawa@es.osaka-u.ac.jp, ^{††}masatoshi.ohishi@nao.ac.jp

Abstract In Japan, in-house broadband power line communications (PLC) are regulated only in terms of the common-mode current (CMI) measured using the ISN (LCL=16dB, DMZ=100Ω, CMZ=25Ω). However it is scientifically not yet verified that such a regulation could control the radiated electric field (REF) at the distance of 10m below the ambient noise level. We have investigated CMI and REF caused by the various commercial PLCs in residential environment and found that; REF could exceed the ambient by more than 30dB even if CMI satisfies the regulation, CMI could exceed the legal limit by more than 15dB even if the outlet has high LCL, no causality is found between CMI or LCL and REF, CMI along the power line could exceed that injected from the modem by more than 20dB, and, the ambient noise below 15MHz is 10dB smaller than the value assumed for the regulation. It is concluded that the regulation has serious flaw and could not control the REF below the ambient level.

Key words power line communications, PLC, radiated electric field, ambient noise, common-mode current, LCL

1. はじめに

電力線搬送通信 (Power Line Communications, PLC) は、商用電源を通すための電力配線に本来想定していない高周波信号を通して通信を行うため、それによって生じる電磁界により放送や無線通信に混信を与えるおそれがある。数年前から PLC を Mbps 以上に高速化してインターネットアクセスや家庭内 LAN に利用できるように、2~30MHz の周波数を開放せよという強い要望が、産業界から経済団体を通して政府に規制緩和と要求として出され、紆余曲折 [1]~[8] の末に昨年 10 月に屋内利用限定で規制緩和が行われた。[9]~[11] そのための技術基準は、放送や無線通信に妨害を与えないように離隔距離 10m において PLC による漏洩電界を周囲雑音と同程度以下にするという前提で定められた。[3], [4], [12] 周囲雑音は場所や季節によって変わるが [13]~[15]、総務省情報通信審議会 CISPR 委員会は独自に 28dB μ V/m (2~15MHz) および 18dB μ V/m (15~30MHz) という値を採用した。[4], [12] また、漏洩電界の原因が PLC モデムからコンセントに流入するコモンモード電流であるとして、それによって発生する漏洩電界が 10 m 離れた点で、上記の周囲雑音以下となるように、通過帯域幅 9kHz でのコモンモード電流を平均値 (RMS) で 20dB μ A 以下 (2~15MHz) および 10dB μ A 以下 (15~30MHz) と定めた。[4], [12]

このように、広帯域電力線搬送通信設備の技術基準 [9]~[11] は、短波帯では PLC モデムを特定の条件の ISN(LCL=16dB [17], [18], ディファレンシャルモードインピーダンス DMZ=100 Ω , コモンモードインピーダンス CMZ=25 Ω) に接続したときのコモンモード電流の許容値のみを定めている。しかし、このような技術基準によって実際の住宅環境で PLC が使われた場合の漏洩電界が周囲雑音以下に抑制されるかどうかは疑問であり、[6], [8], [16] 科学的に検証する必要がある。そこで、この技術基準 [10], [11] に基づいて型式指定を受け市販されている各種の PLC モデムを、実際に一般住宅で使用し、屋内配線上のコモンモード電流と離隔距離 10m における漏洩電界を測定した。また、使用したコンセントについては、LCL とコモンモードインピーダンスを測定した。[19]~[22]

2. 実験方法

2.1 PLC

今回実験に用いた PLC は、2007 年 7 月の時点で広帯域電力線搬送設備として総務大臣から型式指定を受けて市販されているもののうち、表 1 の 5 機種、4 方式である。以後、煩雑さを避けるため、各機種を表 1 の記号で参照することにする。

表 1 実験に使用した PLC

記号	製造/販売	型番/型式	方式	指定番号
P	Panasonic	BL-PA100	HD-PLC	第 HT-06001 号
L	Logitec	LPL-TX	UPA	第 AT-07006 号
H	Hikarinets	CNC-1000	HomePlug	第 AT-07008 号
N	Netgear	HDX101	UPA	第 AT-07012 号
Z	ZyXEL	PLA-400	HomePlugAV	第 AT-07013 号

2.2 実験環境

実験は、住宅環境で実際に PLC が使われた場合の漏洩電界を調べることを目的としているので、できるだけ典型的な住宅で行うことが望ましい。ところが、建物の外壁から技術基準が前提とする 10m の離隔距離を確保して漏洩電界を測定しようとすると、我が国の住宅事情ではたいてい敷地の外に出てしまい、公道か隣家の敷地にアンテナを設置しなければならないという問題がある。そこで、敷地内で実験が完結するように、ある程度広い敷地で建設率の低い住宅を複数選んで実験を行った。ここで紹介するのは、大阪府吹田市の住宅地にある木造二階建てで行なった実験結果である。

住宅内の 2 つのコンセントに PLC を接続して、PLC とパソコンの間を付属の LAN ケーブルで接続し、2 台のパソコン間で PLC を介して 100MB~1GB の大きなファイルを FTP プロトコルで転送することによって、主として送信側の PLC によって生じる漏洩電界とコモンモード電流を測定した。

実験は主に一階 (客間右側) のコンセントと二階 (書斎窓側) のコンセントの間で行った。パソコンは 2 台とも Macintosh で、二階側で ftp server を動かし、一階側の client から ftp login して、put で一階から二階へファイルを転送、get で二階から一階へファイルを転送した。漏洩電界は、後で示すように二階からファイルを送った場合の方が強かったので、一部の例外を除いてそちらのデータを掲載した。

2.3 漏洩電界の測定

電界の測定には、60cm 角のシールドドスモールループアンテナを用いた。このアンテナを建物の外壁から 10m 離れた地点の、地上高 2m に塩ビのパイプを支柱として設置し、指向性が建物の中心を向くように固定した。

アンテナ出力はスペクトラムアナライザで測定する。設定は、2.4 のコモンモード電流と共通で、掃引周波数範囲 2~26MHz、RBW=8kHz、平均値 (RMS) 検波、Maxhold である。技術基準では RBW=9kHz であるが、換算は行っていない。

2.4 PLC 出力のコモンモード電流の測定

電流プローブは、Fair-Rite 社の 43 材フェライトビーズ 2643102002 に 2 次側巻線を 7 回巻いたものを用いた。このフェライトビーズに AC コードを通し、スペクトラムアナライザで 2 次側の電力 P[dBm] を測定する。コモンモード電流は CMI[dB μ A]=P[dBm]+90 で求まる。

2.5 屋内配線上のコモンモード電流の測定

屋内配線は壁、天井裏、床下、配管などに隠れているので、電流プローブを使ってコモンモード電流分布を測定するのは非常に困難である。コンセントは室内からアクセスできるが、コモンモードの開放端なので、コモンモード電流は流れない。そこで、コンセントに 3m の延長コードを接続し、接続点に電流プローブを挿入してコモンモード電流を測定する。開放端から 3m しか離れていないので、25MHz (波長 12m) より周波数が低くなるほど、コモンモード電流の定在波の最大値より小さな値となる。正弦的な定在波分布を仮定すると、最大値の $\sin(3 \cdot 2\pi/\lambda) = \sin(\pi f[\text{MHz}]/50)$ 倍となる。しかし、本実験では最大値には換算せず、測定値をそのまま表示している。

2.6 LCLの測定

LCLの測定は、LCLプローブ[19],[21]を用いて、総務省研究会と同じ方法[3],[22]で行った。LCLプローブに用いたトランスは全て、Fair-Rite社の43材フェライトビーズ2643000801に0.25mmのエナメル線を6回バイファイラ巻きしたものである。ネットワークアナライザで S_{11} , S_{21} を測定し、 $LCL[dB] = 20 \log |(1 + S_{11})/2S_{21}|$ でLCLを求める。

LCLプローブのコモンモード入力端子は50Ωで終端せず、 $Z_{CM}[\Omega] = 50(1 + S_{11})/(1 - S_{11}) - 25$ でコモンモードインピーダンスを同時に求める。

3. 実験結果

3.1 各PLCモデムの漏洩電界とコモンモード電流の比較

まず、全てのPLCモデムについて、漏洩電界と送信側のPLCとコンセントの接続点におけるコモンモード電流の測定結果を示す。

各図の上側のグラフは電界で目盛りは左側にある。実線はPLCがファイル転送のために送信しているときの電界である。点線はPLCをコンセントに接続していないときの電界であり、放送や通信の電波による鋭いピークを除いた部分が周囲雑音である。横線は、技術基準が前提とした周囲雑音レベル、28dB μ V/m(2~15MHz)、18dB μ V/m(15~30MHz)、を表す。

各図の下側のグラフ(実線)は送信側PLCのコモンモード電流(RMS)であり、目盛りは右側にある。横線は、技術基準で定められたコモンモード電流の許容値(RMS)、20dB μ A(2~15MHz)、10dB μ A(15~30MHz)、を示す。

これらの実験結果からすぐにわかることは、程度の差こそあれ、測定した全てのPLCが周囲雑音を超える漏洩電界を発生していることである。また、許容値を超えるコモンモード電流が流れているものも多い。

周囲雑音は15MHz以上ではほぼ技術基準の想定値18dB μ V/mと同じかそれを数dB上回るレベルである。15MHz以下でも周囲雑音レベルはほとんど変わらず4~15MHzの範囲で18dB μ V/mであり、技術基準の想定値を10dB下回っている。

図1のPは、コモンモード電流の許容値を全周波数範囲で満たしている。漏洩電界は、18.3~20MHzで想定値を10dB程度上回っている。8~10MHzで想定値を5dB、周囲雑音を15dB上回っている。また、8MHzではコモンモード電流は-8dB μ Aであり、許容値を28dB下回っているにも関わらず、漏洩電界は想定値を5dB上回っているのも、もしも許容値まで流せば漏洩電界は想定値を33dB、実際の周囲雑音を43dB上回ることになる。

図2のLは、コモンモード電流が許容値を15dB程度まで超過している周波数がある。漏洩電界は19MHz付近と24MHz付近で42dB μ V/mに達しており、想定値を24dBも超過している。23.5MHzではコモンモード電流は許容値と同じであるが、漏洩電界は想定値を20dBも上回っている。15MHz以下でも漏洩電界が周囲雑音を18dB程度上回っている。

図3のHは、コモンモード電流が15MHz以下で最大10dB以上、15MHz以上では最大20dB以上、許容値を超過してい

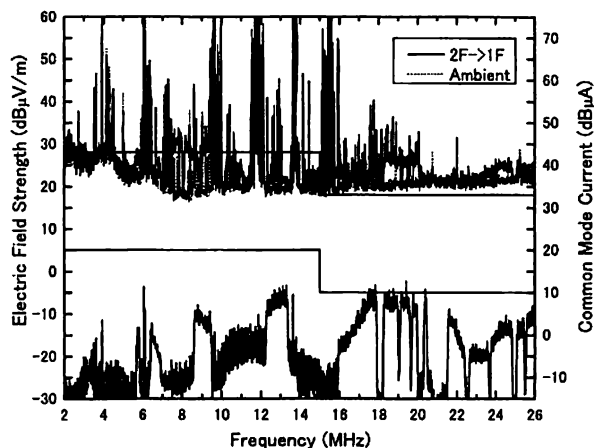


図1 P: Panasonic BL-PA100 (HD-PLC)

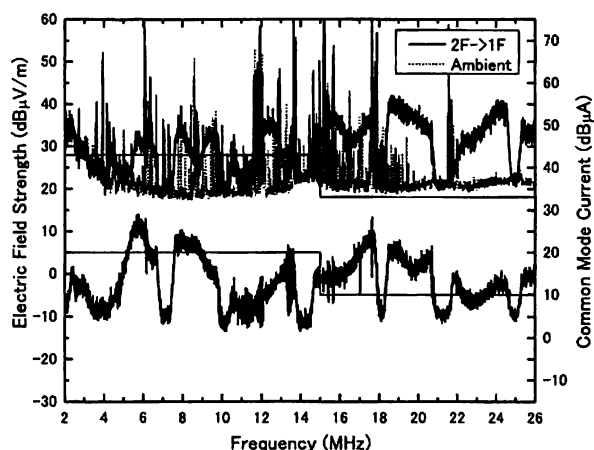


図2 L: Logitec LPL-TX (UPA)

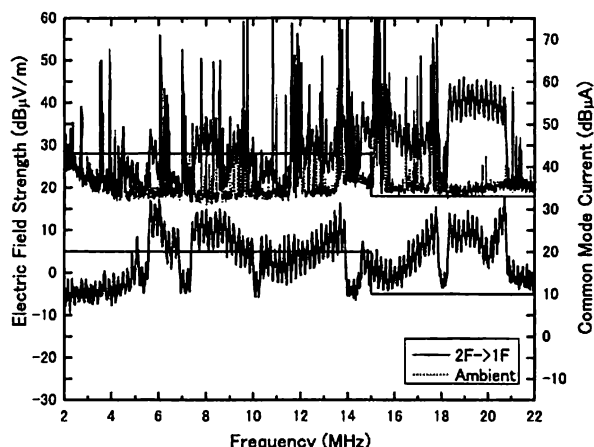


図3 H: Hikarinets CNC-1000 (HomePlug)

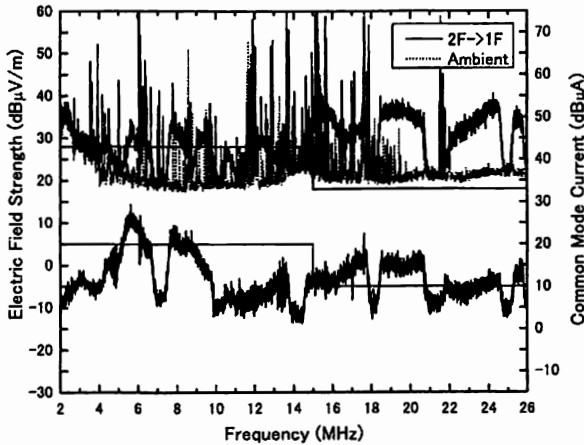


図 4 N: Netgear HDX101 (UPA)

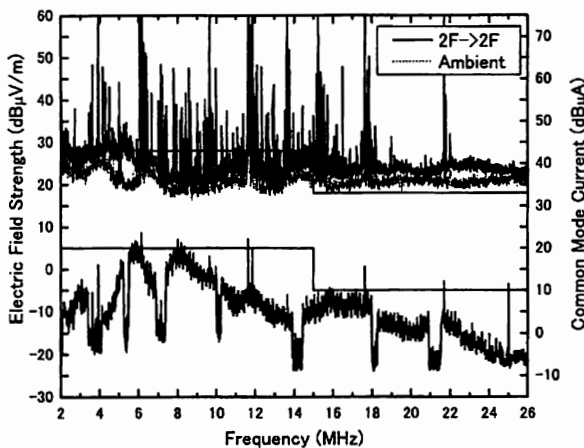


図 5 Z: ZyXEL PLA-400 (HomePlugAV)

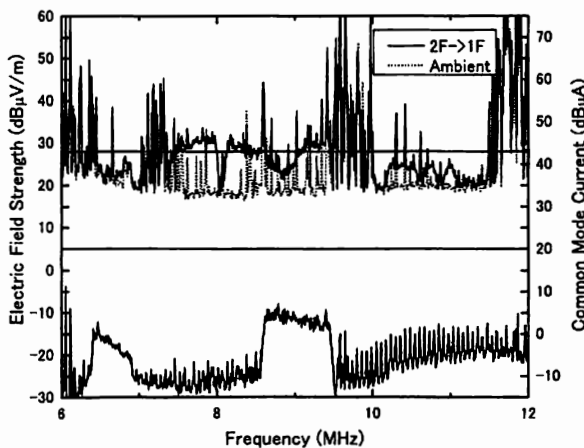


図 6 P: Panasonic BL-PA100 (HD-PLC) 6~12MHz を拡大

るので、本当に技術基準を満たしているのか疑問が残る。漏洩電界は、18.5~20.5MHzで45dBμV/mに達しており、想定値を27dBも超過している。20MHzではコモンモード電流の許容値からの超過は7dBであるが、漏洩電界は27dB超過している。このことから、たとえ許容値を満たしたとしても漏洩電界は20dB超過することが分る。

図4のNは、Lと同じUPA方式であり、コモンモード電流も漏洩電界も非常によく似ている。漏洩電界は最大38dBμV/m@24.5MHzで、想定値を20dB超過しているが、そのときのコモンモード電流は許容値と同じである。コモンモード電流は許容値を7dB程度超過しているところが多い。

図5のZは、コモンモード電流は全周波数範囲で許容値を満たしているが、漏洩電界は5MHz付近で周囲雑音を10dB超えているほか、全周波数範囲で周囲雑音を超えている。

PLCモデムによってコモンモード電流も漏洩電界もかなり差があるが、共通する重要な問題として、下記の点は特筆すべきである。

- コモンモード電流が許容値を満たしていても、漏洩電界が想定される周囲雑音を30dBも超過することがある
- 実環境ではコモンモード電流が許容値を15dB程度も超過することがある

図1, 図2, 図3, 図4の8MHzの漏洩電界はいずれもほぼ35dBμV/mであるが、コモンモード電流は-8dBμA(P), 23dBμA(L), 30dBμA(H), 23dBμA(N)と30dB以上も異なっている。このことから、PLCモデムのコモンモード電流と漏洩電界の間には因果関係は無いと考えられる。

3.2 詳細なスペクトル

3.1では、測定した2~26MHzの全周波数範囲のスペクトルを示したので、放送バンドや18MHz以下などに特に電波利用が過密な周波数では、漏洩電界が周囲雑音レベルをどの程度上回っているのか分りにくかった。しかし、測定そのものはRBW=8kHzで行ったので、必要なデータは取得されており、周波数軸を拡大すれば、十分判別することができる。ここでは、図1(P)の8~12MHzを拡大したものを図6に示す。

漏洩電界のスペクトルは周波数軸を十分拡大しないと、周囲雑音レベルを超過していても、容易に見落としてしまうので、注意を要する。

3.3 周囲雑音レベル

周囲雑音の測定にも3.2と同じ問題があり、放送バンドなど周波数利用が過密な周波数では、見かけ上周囲雑音レベルが持ち上がって見えることがある。周波数軸を拡大すれば、放送波の間では真の周囲雑音レベルまで落ちていることが分る。

本実験では、4~15MHzの周囲雑音レベルは18dBμV/m程度であったが、これは2006年5月にITU-TのSG5に報告された東京近郊での測定値[15]とも非常によく一致している。これらの値は、ITU-R勧告P.372[13]のBusinessの値12dBμV/m@15MHz, 16dBμV/m@4MHzを少し上回ることから、我が国の大都市近郊の住宅地はBusinessに近いと考えざるを得ない。ところが、PLCの技術基準のために総務省情報通信審議会CISPR委員会が独自に採用した値は、これより

さらに 10dB も大きく、その妥当性には大いに疑問が残る。そのため、15MHz 以下の許容値が約 10dB 緩くなっている可能性が否定できない。

3.4 非通信状態

パソコンが PLC を介して明示的な通信を行っていない状態を、ここでは非通信 (idle) 状態と定義する。UPA 方式では非通信時の漏洩電界が特に顕著であり、短波ラジオでの聴感上は、むしろファイル転送時よりも耳障りであった。UPA 方式の L の非通信状態の漏洩電界とコモンモード電流の測定結果を図 7 に示す。コモンモード電流は許容値を満たしているが、漏洩電界は最大 $35\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ @ 24.5MHz に達し、想定値を 17dB も上回っている。さらに、ほぼ全周波数範囲で漏洩電界が周囲雑音を上回っており、短波ラジオでどこを聞いても常時 PLC 由来の雑音が聞こえることを裏付けている。

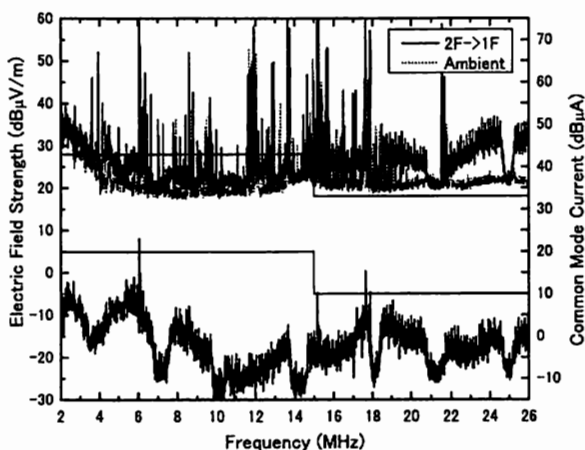


図 7 L: Logitech LPL-TX (UPA) 非通信状態

3.5 コンセントによる違い

コンセントによる漏洩電界やコモンモード電流の違いを見るために、全ての PLC について、一階から送信した時のデータも取得している。例として図 4(N) で、一階側から送信した時のスペクトルを図 8 に示す。図 4 と比較すると、全体的にコモンモード電流が小さく、ほぼ許容値を満たしている。しかし、漏洩電界の最大値は $45\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ @ 25.9MHz であり、想定値を 27dB も超過している。そのときのコモンモード電流は許容値を 5dB 下回っており、許容値を満たしても漏洩電界は想定値を 32dB 上回ることになる。これは、二階のコンセントの場合の 20dB よりもさらに深刻である。

3.6 LCL とコモンモードインピーダンス

漏洩電界の実験に用いた 2 つのコンセントの LCL とコモンモードインピーダンス $\text{CMZ} = |Z_{\text{CM}}|$ を図 9 と図 10 に示す。コンセントによるコモンモード電流や漏洩電界の違いは、技術基準が前提とする考え方では、コンセントの LCL によって説明されるはずである。[3], [23] しかし、本実験の結果からは、LCL と漏洩電界の間に因果関係は認められなかった。

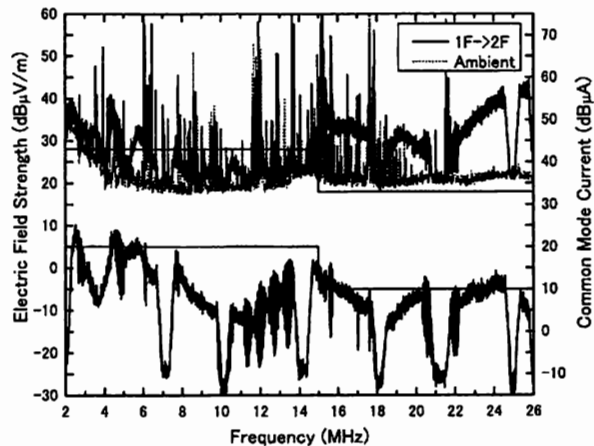


図 8 N: Netgear HDX101 (UPA) 一階から送信

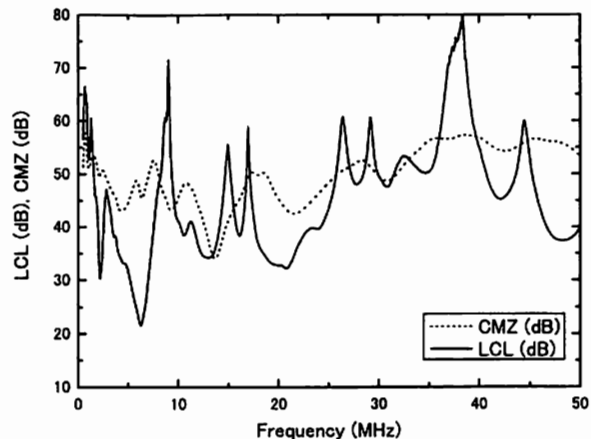


図 9 一階側コンセントの LCL とコモンモードインピーダンス

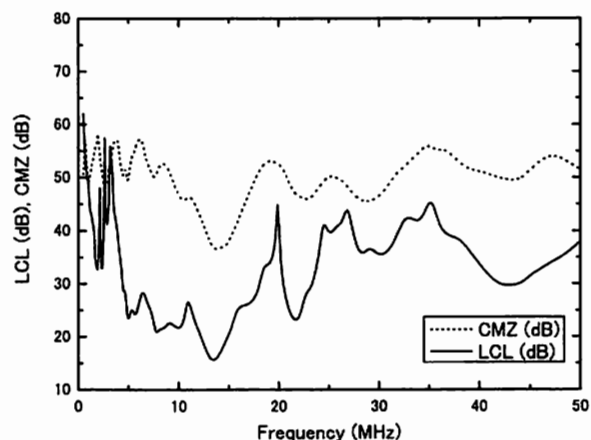


図 10 二階側コンセントの LCL とコモンモードインピーダンス

3.7 屋内配線上のコモンモード電流分布

一階客間右側のコンセントに接続したPLC(H)から送信している状態で、他のコンセントに3mの延長コードを接続して、コモンモード電流を測定した結果を図11に示す。PLC出力のコモンモード電流よりも20dB以上大きなコモンモード電流が、同じ部屋の反対側(左側)のコンセント(@12.5MHz)や玄関のコンセント(@9MHz)に流れている。これは、単にPLCから注入されたコモンモード電流が屋内配線で分配されるのではないことを示している。

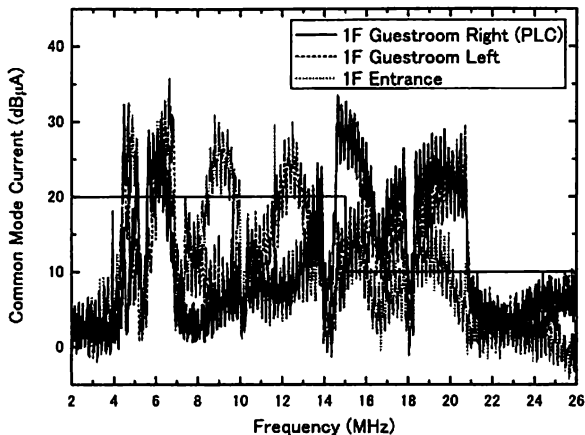


図11 PLCをつないでいないコンセントのコモンモード電流

4. まとめ

今回の定量的な実験から、以下のことが判明した。

- コモンモード電流が許容値を満たしていても漏洩電界は周囲雑音を30dB以上も上回ることがある
- コモンモード電流と漏洩電界の間には因果関係が認められない
- コンセントのLCLが高くても許容値を15dB以上超えるコモンモード電流が流れることがある
- LCLと漏洩電界の間には因果関係が認められない
- モデムから注入したコモンモード電流を20dB以上上回るコモンモード電流が屋内配線に流れることがある
- 技術基準が前提とした15MHz以下の周囲雑音の値は10dB過大である可能性が高い

これらは、当初から私達が予見していたとおり[6],[8]、現行の技術基準には根本的な誤りがあり、技術基準に定められたコモンモード電流規制では漏洩電界を周囲雑音以下に抑制し得ないことを示している。

屋内電力配線は、スイッチ分岐などで起こる顕著なモード変換[16]のために、コンセントのディファレンシャルモードから見ても、短波帯の良好なアンテナとして動作すると考えられる。[6],[8]しかし、現行の技術基準は、屋内配線上のモード変換を無視したためにディファレンシャルモードのアンテナとしての働きを考慮しておらず、通信のために注入されるディファ

レンシャルモード電流を規制していない。いわば未知のアンテナに未知の電力を供給することを許しているのであるから、これで漏洩電界を抑制できると考えることに無理がある。

広帯域PLCの漏洩電界を真に周囲雑音以下に制御して、通信・放送との電波共存上の問題を解決するには、屋内電力配線のアンテナとしての能力の正当な評価が不可欠である。屋内配線のアンテナ能力の測定はそれほど難しいことではないので、その結果に基づいて早急に技術基準を見直す必要がある。

文 献

- [1] 総務省, 電力線搬送通信設備に関する研究会報告書, http://www.soumu.go.jp/s-news/2002/020809_4.html, 2002.8
- [2] 総務省, 「実験用高速電力線搬送通信設備の設置許可に係る方針の決定」, http://www.soumu.go.jp/s-news/2004/040121_1.html, 2004.1
- [3] 総務省, 高速電力線搬送通信に関する研究会報告書, <http://www.soumu.go.jp/s-news/2005/pdf/051226.6.bt2.pdf>, 2005.12
- [4] 総務省, 情報通信審議会情報通信技術分科会 CISPR 委員会報告, http://www.soumu.go.jp/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/bunkakai/pdf/060629_3.1-2.pdf, 2006.6
- [5] 西本修一, 総務省, 電波監理審議会意見書(第415回意見の聴取) http://www.soumu.go.jp/joho_tsusin/policyreports/denpa_kanri/pdf/060823.2.pdf, 2006.9
- [6] 同上, 別紙, pp.21-27 (北川意見); pp.27-31 (大石意見)
- [7] 総務省, 電波監理審議会(第909回)議事要旨, pp.1-2, http://www.soumu.go.jp/joho_tsusin/policyreports/denpa_kanri/pdf/060913.2.pdf, 2006.9
- [8] 総務省, 「電力線搬送通信設備の技術基準等の整備に関する無線設備規則の一部改正案に係る電波監理審議会からの答申及び関係省令案等についての意見募集の結果」, 別添7, http://www.soumu.go.jp/s-news/2006/pdf/060913_9.7.pdf, 2006.9
- [9] 無線設備規則第59条第1項第1号, 同第2項, 第60条第2号
- [10] 電波法施行規則第46条第1項第5号, 同条の2第1項第5号
- [11] 総務省告示第520号(平成18年10月4日)
- [12] 杉浦, 上, 雨宮, 山中, “我が国的高速PLC規格とその技術的背景,” 信学技報, EMCJ2007-36, 2007.7
- [13] ITU-R Recommendation P.372-8, “Radio Noise,” 2003.4
- [14] F. Weinmann, K. Dostert, “Verification of background noise in the short wave frequency range according to recommendation ITU-R P.372,” Int. J. Electron. Commun., 60, pp. 208-216 (2006).
- [15] R. Kobayashi, “Example of Electromagnetic Environment below 30MHz in Japan,” ITU-T SG5 TD297, 2006.5
- [16] 石原, 梅原, 萩広, “屋内電力線通信における漏洩電界の測定,” 信学技報, EMCJ2005-145, 2006.3
- [17] ITU-T, Recommendation G.117, “Transmission aspects of unbalance about earth,” 1996.2
- [18] ITU-T, Recommendation O.9, “Measuring arrangements to assess the degree of unbalance about earth,” 1999.3
- [19] I. P. Macfarlane, “A Probe for the Measurement of Electrical Unbalance of Networks and Devices,” IEEE Trans on EMC, Vol. 41, No. 1, pp. 3-14 (1999).
- [20] J. Verpoorte, “Application of the LCL method to measure the unbalance of PLC-equipment connected to the Low-voltage Distribution Network,” NLR-TP-2003-274, National Aerospace Laboratory NLR, Netherlands, 2003.6
- [21] 川上, 都築, 和崎, 山田, “屋内電力線用LCLプローブ製作に関する考察,” 電学論C, 124巻7号, pp. 1375-1381 (2004).
- [22] 神宝, 西山, 前川, 石川, 稲田, 牧, “既設住宅における電力線のLCLとコモンモードインピーダンスの測定,” 信学技報, EMCJ2005-70, 2005.9
- [23] 渡邊, 徳田, 牧, “分岐のある電力線モデルの平衡度と漏洩電界に対するモーメント法計算,” 信学技報, EMCJ2005-69, 2005.9