



ホームネットワーク対応高速PLC技術

Power Line Communication technology for Home-network application

高遠 健司^{*1}

Takato Kenji

あらまし

2006年10月4日の官報で2M～30MHzの帯域を使用するPLC（電力線通信）が屋内での利用に限り許容された。日本ではADSLやFTTHで高速通信が各戸で可能な環境にある。屋内のみの使用であっても既存のコンセントがそのまま高速LANの出入口になることは、家庭内のネットワーク環境の一大革新である。本論ではPLCの歴史から最新のOFDM技術・法律制定の背景などPLC技術に関して分かり易く解説している。そして富士通アクセスの製品として、家庭のネットワークに安心・安全をキーワードとしたホームゲートウェイにPLCを内蔵する意義について考察する。

Abstract

Regulation of Power Line Communication of Japan (PLC) was presented in an official gazette on October 4th, 2006. The accepted frequency for PLC is between 2MHz and 30MHz, and it is only available for in-Home applications. Broadband telecommunication is already available in homes in Japan through ADSL or FTTH technology. Even if PLC is allowed to be used only in in-Home applications, a large evolution of the network will be required to allow existing AC power wall sockets to be changed to high-speed LAN interfaces without re-developing the home. In this paper, the history of PLC, the latest technologies such as OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), and the background of the regulations are presented. Finally, the reason why Fujitsu Access is focusing on PLC with Home-Gateway, considering network safety and security as key words, is described.

*1 R&Dセンター

1. ま え が き

2006年10月4日の官報でPLC（電力線通信）Power Line Communicationの許容値が改正された。これにより家庭内での高速電力線通信が解禁になる。本論ではPLCの歴史と経緯並びに技術について解説し、今後のネットワークへの可能性と製品展開について考察する。電力線に信号を載せて通信するという方法は電力会社が自社の送電線を使って送電設備の保守のため専用の電話などで使われてきた。また家庭内ではインターホンなどで実用化されている。PLCはシールドされていない通常の電灯線に高速信号を載せるため、漏洩電波の観点から慎重な取り扱いが要求される。今まで450kHzまでの周波数帯域を使ったPLCは認められていた。今回改正されたのは家庭内での使用に限り、2M～30MHzの周波数帯域である（図1参照）。家庭内とはいえ、各コンセントからLANのケーブルに匹敵する100Mbps級の信号伝送が可能になることは、家庭内のネットワークの一大革新と考えられる。富士通アクセスとしても、この新技術に対応した製品を開発しネットワークの進化に貢献したいと考えている。

2. PLCの歴史

電力会社の送電線は電話線も敷設されていないような山岳地域や過疎地域を通る場合があり、従来から送電線自体を使用した保守のための電話システムが電力会社の社内用として実用化されていた。送電線の高電圧を介するため、その設備は大掛かりなものになる。最近話題になっている高速PLCは従来の電話レベルのナローバンドの情報量でなく、ブロードバンドに対応したものである。

もっとも発展途上国の中には電話線は無いが電灯線なら来ているという地域もあり、送電線を利用し

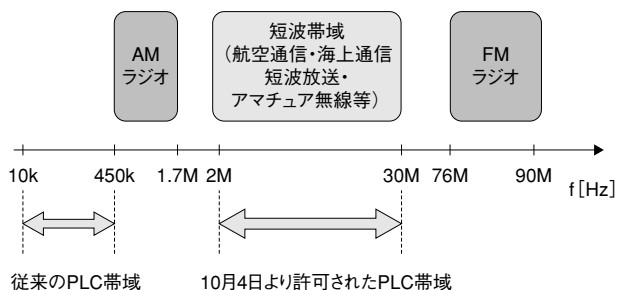


図1 PLC（電力線通信）利用帯域と無線帯域

た通信基幹網の需要もある。送電線は高圧で大電流が流れるが、単純に信号伝送の媒体として見ると、空間に張られた線であり、間に損失を与える誘電体がないため、伝送損失が少ない理想的な媒体ともいえる。架空の高圧線から各家庭に信号を分岐して伝えるというのがPLCのアクセス系での応用である。

もともとPLCはこのようなアクセス系の技術として発展してきたものである。さて、日本においてはADSLの普及によりブロードバンドが一般化し、更にFTTHで100Mbpsクラスの高速度のサービスが普通に受けられるようになった。したがって、日本ではアクセス系の要求は必須ではなかった。更に日本では電灯線を家庭に引き込むにあたり、ほとんどの場合に地中でなく電柱、つまり架空線を経由するためPLCの使用周波数による電波漏洩の懸念がある。PLCの信号が2M～30MHzを使用し、この帯域には航空通信・海上通信・アマチュア無線など既存の無線利用があるからである。2002年にPLCが時期尚早であるとして却下された理由はこのアクセス系からの電波漏洩の問題にあった。その後漏洩電界を更に20dB程度低減する技術が開発されたため、2005年1月から屋内での使用に限った範囲での実用化へ向けた総務省の研究会が1年間開催され、PLCへの許容値の案が作成された。2006年1月から電波監理審議会による審議を経て、2006年10月4日に官報により許可されたのはアクセス系を除く屋内のみのPLCの使用である。

3. 最悪の伝送媒体 PLCが可能な理由

家庭用の電灯線はもともと通信用の伝送線路ではない。伝送路として最悪なのが第一にノイズ問題である。電灯線には多くの電気機器が接続され、モーター等の動力機器の発生するノイズ、最近ではインバータ蛍光灯やエアコン等の発生する数10kHzのノイズなどが多く存在している。更に携帯電話のチャージャ等の電源アダプタ（スイッチングレギュレータ）の出すスイッチングノイズが顕著になった。第二に各コンセントまでの配線方法はもともと通信を目的としたものではないため、配線方法には通信に必要な条件が配慮されていない。およそ高速の伝送線路であれば特性インピーダンスによる線路の終端や分岐無しの配線・シールド等が必須であるが、電灯線はこれらすべての条件が満たされていない。

したがって、家庭の電灯線は通信用の媒体としては極めて劣悪なものといえる。それでも電灯線という既存の配線・インフラが着目されたのは、その悪条件を克服する技術が開発されたことによる。

4. PLCの使用する周波数

つぎに、どうして2M～30MHzの周波数がPLC用に使われるかといえば、30MHz以上では電灯線での伝送損失が顕著になるからである。単純な電線で2MHzと30MHzの損失を比べると20dB程度の差がある。損失の理由はケーブルの絶縁材料（例：塩化ビニル）の誘電体損失 $\tan \delta$ や表皮効果、そしてもっとも顕著なのが分岐による損失・インピーダンスの乱れである。屋内の損失は実測で30～50dB程度なので、送信信号のレベルと受信感度の関係で、30MHzより高い周波数では信号を送っても現実的に届かない。また低い周波数はどうかというと、450kHzまではすでに許可されているが、2MHz以下の周波数帯域ではインバータ蛍光灯やスイッチングレギュレータなどの動作周波数とその高調波が非常に大きなノイズとなって存在する。したがって、PLCで使用しようという周波数帯域は両方の限界の谷間であるといえる。なお情報理論によれば、送信する情報量に対して必要な周波数帯域とS/N（信号とノイズ）の関係は次のシャノンの定理で定まる。

$$C = W \cdot \log_2 (1 + S/N) \quad [\text{bps}]$$

2M～30MHzの28MHzの帯域幅Wに対し、S/Nが256倍（2の8乗）であれば単純な計算で $C = 28\text{MHz} \cdot \log_2 (1 + 256) = 28\text{M} \times 8 = 224\text{Mbps}$ となり、200Mbps級の情報が伝送できることになる。図2にシャノンの定理による帯域幅とS/Nの関係を示す。横軸数字はS/Nを2のべき乗で表しており、S/N=8は256段階のS/Nに相当する。S/N=8はADコンバーター（DAコンバーターも含む）の精度が8ビットで背景ノイズが最小ビット以下であることが必要条件である。実際の帯域はノイズ等でフルには使用できないので、例えば帯域が20MHzしかないとする、10ビットのADコンバーターが必要になる。ちなみに従来の450kHzの帯域しかない、10ビットのADコンバーターを使用しても2Mbpsが最大なので、帯域幅の確保は絶対的な条件である。2M～30MHzの帯域での理論

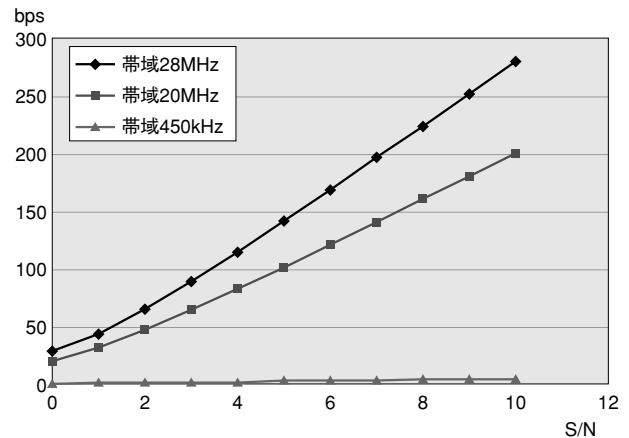


図2 シャノンの定理による情報量とS/Nの関係

的な最大情報転送量は、以上の関係から帯域幅とADコンバーターの精度、それと現実的な背景雑音の大きさにより決定される。

5. OFDM変調方式 PLCの技術

ノイズが非常に多い環境下で信号を送る技術としてはスペクトラム拡散技術 (Spread Spectrum) がある。これは元々は軍事的な目的で、敵の妨害電波に対して対抗でき、かつ情報の秘匿を守る技術として開発された。原理は送るべき信号を広範囲のスペクトルに分散して変調し伝送する。受信側では分散されたスペクトルを復調して元の信号を再生する。特定の周波数の電波に妨害ノイズがあってもその部分の情報も欠けても、最終的に元の信号が復元される。PLCモデムを実現する技術の一つであり、現在数10Mbpsクラスの伝送能力のLSIとモデムが実用化されている。情報を広範囲のスペクトルを拡散するという基本的な考え方は、形を変えてさまざまな変調方式に応用されている。

PLCで使用されるもう一つの技術はOFDM（直交周波数分割多重 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) という方式であるが、これも情報を多数のサブキャリアのスペクトルに分散するという点では同じ思想である。通常のFDM (Frequency Division Multiplexing) では周波数が異なるサブキャリア同士が重ならないようにして、多数のサブキャリアに信号をそれぞれ独立に載せる。OFDMでは直交する信号を使うために、隣接する周波数のサブキャリア同士が一部重なる形である（図3参照）。つまり、FDMではサブキャリア

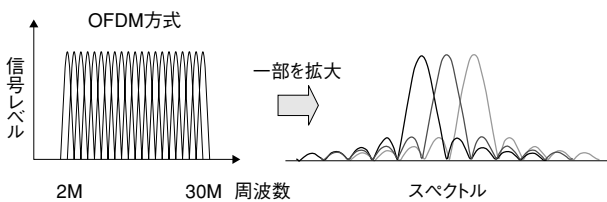


図3 OFDM信号のサブキャリア配置

同士が重ならないように一定幅ずつ離して配置する必要があるのに対し、OFDMではサブキャリア同士を一部重なるまで密集して配置できるので、周波数帯域を有効に利用できる方式である。OFDM自体のアイデアは1950年代にあったようだが、実現したのは最近である。それが可能になったのはデジタル信号処理であるFFT（高速フーリエ変換）による計算アルゴリズムが1965年にJ.W.CoolyとJ.W.Tukeyによって発明され、信号のデジタル演算の処理量が少なくて済むようになったからである。もちろん高速で高精度のAD・DA変換器がLSI化され経済的に使用できるようになったことや、計算するための高速演算可能なCPUや大容量のメモリが可能になったなど、一連のLSIの進化が必要条件であることは明らかである。これら最近のLSIの性能向上（高集積化、演算能力の向上）の上にOFDMのような高度な変調方式が可能になった。

6. OFDMの変調方式

この変調を簡単に説明するとスペクトルアナライザの動作原理に良く似ている。単純なサイン波以外の周期的な波形（例：矩形波や三角波）をスペアナで見ると何本ものスペクトルが観測される。つまり、このような周期的な信号には多くのスペクトルが含まれているということである。反対にこのスペクトル情報を合成すると、もとの周期的な波形が合成できる。これがフーリエ変換と逆フーリエ変換の原理であるが、OFDMではスペクトルに当たる部分が伝送しようとするデータであり、そのデータを元にOFDM信号が作られる。スペクトルに相当するサブキャリアの数はFFTの動作原理上2のN乗を基本にするが、OFDMの方式により数100本～1000本以上となり、2M～30MHzの全体が分割される（図4参照）。各サブキャリアには数ビットの情報が割当てられるが、このときに電灯線自体に現存するノイズの状態を考慮して可能な情報量の情報が与え

◆フーリエ変換と逆フーリエ変換自体は以下の数学的処理による。

$$\begin{aligned}
 & \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt = F(\omega) \\
 & f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega
 \end{aligned}$$

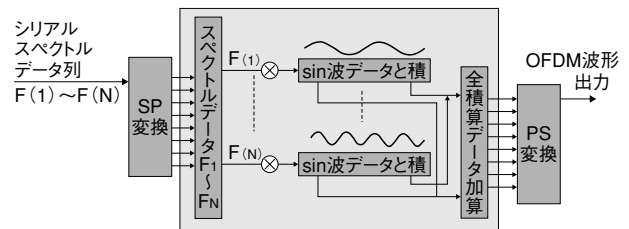


図4 フーリエ変換の式とOFDM信号の生成原理

られる。ノイズが多いスペクトル部分のサブキャリアには与える情報量が少なくなるように制御する。スペクトラム拡散の方式と同様に広い帯域を同時に使用し、ノイズ等の影響で伝送に適さない周波数域のスペクトルは使用しない、または転送する情報量を下げることによってノイズが多い環境でも、全体として高い伝送レートを得ることができる。現在200Mbps級のLSIが実用化されている。

7. PLCの実力、カバー率

PLCはOFDMのような高度の信号処理技術を用いて、電灯線のようなノイズ環境が非常に悪い伝送媒体の上で信号を伝送する。OFDM方式は周波数帯域は違うが、すでに無線LANに使われ、次世代の地上波デジタルTVにも使われるので、有線・無線の差なく使われている重要技術である。OFDMはこのように高性能の技術であるが万能ではない。各家庭の電灯線の状態によってはPLC-LSIの持つ最高の性能を出せない。つまり家庭の電灯線に存在するノイズや分岐による伝送路の良し悪しに応じて最大伝送量が変わるベストエフォートの伝送となる。例えば200MbpsのPLC-LSI（片側伝送で100Mbps）を使っても、家の中で例えば30Mbps以上が実現できるのは家の全コンセント数の80%という状態になる。この80%のように一定の性能を保証する範囲のことをカバー率という。カバー率が高ければ高いほど家の中で快適なネットワーク環境といえる。

8. 標準化の動き 研究会の議論・法律改正

実験によれば、家庭の電灯線であっても電灯線の

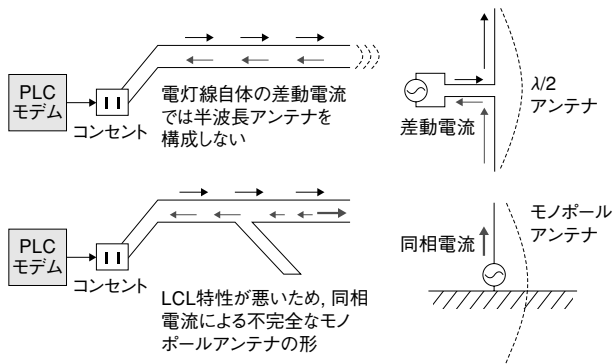


図5 電灯線の配線方法とアンテナの関係

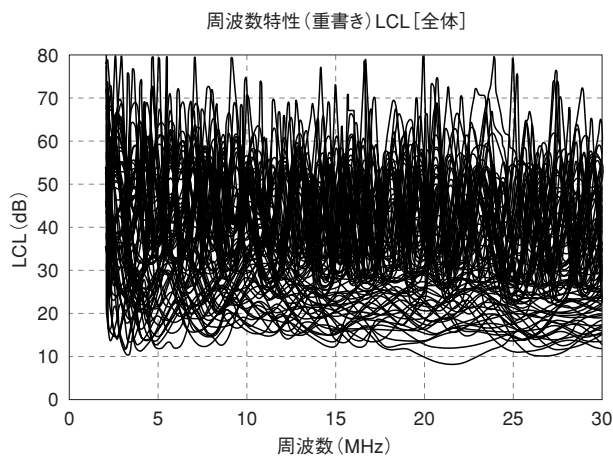
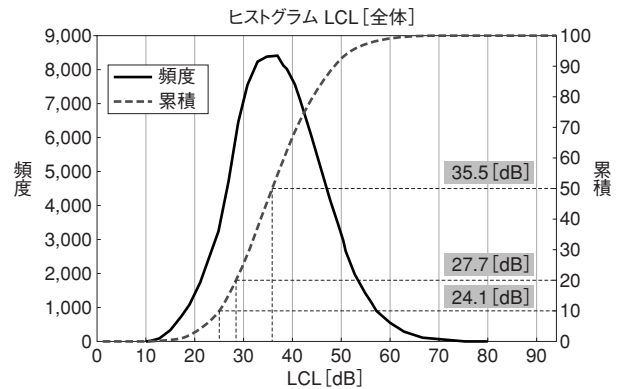


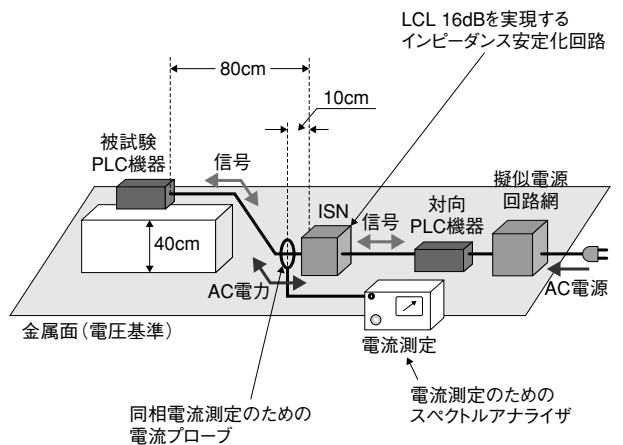
図6 LCL実測データ (総務省研究会報告書より)

外部に漏れる電波の量は多くない。FM放送やUHFのアンテナを見ると分ると思うが、300Ωの通称メガネケーブルと呼ばれるものは、単純な2本の平行線である。この平行線は装置からアンテナまでは伝送ケーブルとして働き、そのケーブルをTの字型に開くか、更に折り曲げてループ状にしたものがアンテナその物である。つまりTの字型のTの頭の部分の長さを電波波長の1/2にしたのがλ/2アンテナである(図5参照)。綺麗な2本の平行線のままであれば、電灯線からの電波の漏れはほとんど無視できる。問題は家の中の電灯線の配線(VVFケーブル等)がこのように最後まで2本の線のままで配線されていないことである。家庭内の配線では複数のコンセントに分けるために分岐があり、また電灯を点灯させるスイッチは通常の平行線のままでなくスイッチまでの分岐線だけが長く配線される場合が多々ある。電線が2本の線のまま平行の状態であれば対称な状態であるが、手元スイッチ



下段の値以上となる割合(%)	99	98	97	96	95	94	93	92	91	90	80
LCL (dB)	15.70	17.57	18.97	20.05	20.92	21.69	22.38	23.02	23.60	24.09	27.69

図7 LCL実測データのヒストグラム(総務省研究会報告書より)



出典:総務省 高速電力線搬送通信に関する研究会報告書(図8.2)

図8 LCL測定系(総務省研究会報告書より)

のような片線状態では信号線が平行の状態ではなく対称性がくずれる。対称性がくずれると、差動のPLC信号から同相の電流成分が発生し、電灯線の一部が1本のアンテナ(モノポールアンテナ)のようになり漏洩電波発生の原因になる。この対称性の良し悪しを表す量をLCL(対地不平衡, Longitudinal Conversion Loss)と呼ぶ。図6は2005年の総務省研究会に提出されたLCLの実測データで62の建物の487のコンセントのデータを重ね書きしたものである。LCLが周波数に対してうねっていることがわかる。

一つのコンセントでも周波数によってLCLの良い値と悪い値がある。このデータのすべてを周波数も含めてプロットしてヒストグラムにしたのが図7である。単純な例で説明すると今回の法令化で示さ

表1 PLCの規制値

許容値	周波数 (MHz)	準尖頭値 (dBuA)	平均値 (dBuA)
	2~15	30	20
	15~30	20	10
測定法	インピーダンス安定化回路 (ISN) を使用 ・縦電圧変換損 (LCL) : 16dB ・コモンモードインピーダンス (CMZ) 25Ω		

れた測定系でのLCLは16dBであり、電灯線のインピーダンスが+/-30%程度ずれている状態と等価になる。16dBという値はヒストグラムの累積99%の値である。ほぼ最悪値で決めた値と考えて良いだろう。このように、漏洩電波に起因するのは差動電流でなく同相電流であるため、今回制定されたPLCを規制する法律は、LCLが16dBの測定系 (ISN) に対して、同相電流の値が規制値以下であることを定めている。

図8に同相電流の測定系、表1に規制値を示す。PLCの実用化に向けた計画は2001年3月にe-Japan重点計画に盛り込まれ早期の実用化に向けた検討がなされたが、2002年の7月の総務省研究会報告では従来の無線局に与える影響が大として認められなかった。その後、漏洩電界低減の技術開発や検証実験がなされ、2005年1月からアクセス系での使用を行わず、宅内利用に限っての総務省研究会が開かれ、同12月にパブリック・コメントによる議論を経て最終的な提案がなされた。この提案に対し、更に厳しい許容値に修正されたが2006年10月4日の法律改正により晴れてPLCが許容された。通常の電波を利用した機器では送信電力の規定として電界強度 (dBV/m) で規制されるが、PLCの装置はもともと無線機器ではない。擬似的にアンテナとなってしまうのは各家庭の配線の部分である。したがって、PLCの規定としては、LCLを規定した基準ネットワーク (ISN) に接続時に流れこむ電流値 (dBuA) で決まった。ちなみに2M~15MHzの許容値が30dBuAであり、15M~30MHzの許容値が20dBuAである。dBuAという単位は一般的ではないが、1uAを0dBuAと規定し対数表現 (dB) したもので、30dBuAは偶然にも30uAに相当する。

9. トリプルプレイ PLCの応用例

日本以外ではPLCの応用は実用段階からトライアル段階までさまざまである。米国では同軸ケーブル

によるケーブルTVの普及割合が大きく、各家々でセットトップボックスを使ってTVを見る例が多いようだ。電話会社も独立系の業者が多くいることから、電話・TV&ビデオ・インターネットのいわゆるトリプルプレイの応用が多く、PLCはその口を各部屋に配信する形になる。

欧州では既存の石造りの建物等で、新たな配線等が非常に困難なので既存の電灯線を使用したPLCによる情報ネットワーク構築のニーズが高いようである。日本ほどブロードバンド化は進んでいない。

日本で今後どのような応用例が主流になるかは今後爆発的に普及するようなアプリケーションが何かによる。PLCはコンセントを使用するだけで現在のIPインターフェースの標準であるLANインターフェースに容易に接続できる。日本の情報環境はすでに高速化が進展しているため、今後も高速性を生かした魅力的なアプリケーションが登場し普及が進むと思われる。

10. ホームゲートウェイへの搭載 通信網の拡大

富士通アクセスは通信装置を提供する立場にあるので、ネットワークという観点からPLCを見てみる。光ネットワークに代表される基幹系に対し、アクセス系があり、現在ネットワークの終点はADSLモデムやONUといった装置である。つまり、ネットワークは各家庭の入り口までの部分で終わりである。これにPLCが接続されるとすると家の中のすべてのコンセントが情報の入出力、つまりLANの端子と同等になる。ユビキタスという言葉は、いつでもどこでも高度な情報網もつながるという思想であるから、PLCは正にそれに相応しい手段といえる。PLCと同様にユビキタスに貢献する機器としては無線LANがすでに広まっているが、無線LANとは単純に競合するのではなく、適材適所にて住み分ける、あるいは共存するといった形態になると考えられる。例えばPLCで家の隅々まで配信しそのあとで無線LANにより接続するという形態も十分に考えられる。

情報の入り口として単純なモデムではなくホームゲートウェイの形で、高度なセキュリティ機能を実現し、遠隔操作により自動的に最新に更新しながらPLCのメリットを享受するというのが、ホームゲートウェイにPLCを搭載する理由である (図9、

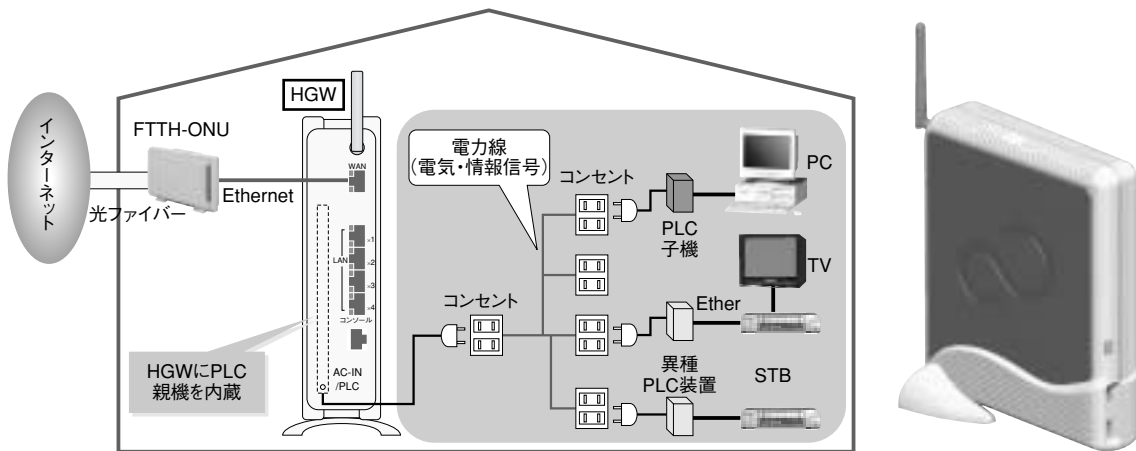


図9 PLC内蔵ホームゲートウェイの応用例と外観

表2 PLC内蔵ホームゲートウェイの主要諸元

項目	仕様
WAN インターフェース	1ポート, 10/100BASE-TX, オートネゴシエーション
LAN インターフェース	4ポート, 10/100BASE-TX, オートネゴシエーション
USBポート	USB2.0 (Hi/Full/Low), 2ポート
赤外線ポート	IrDA
コンソールポート	シリアルポート, 1ポート
ルータ機能	IPv4/Pv6基本機能 DHCPクライアント/サーバ PPPoE, IPルーティング NAT/NAPT, ファイアウォール/フィルタリング UPnP 等
VPN機能	IPsec
無線LAN機能	IEEE802.11a/g/b対応
保守運用機能	ファームウェア更新機能 リモートメンテナンス機能 自動設定 サービスモジュールダウンロード機能 等
電源	PLC MODEM機能内蔵

表2参照)。

11. 信頼性と安全性の両立

OFDM信号を使ったPLCは信号の安全性としてはもともと高いものを持っている。複数のPLC装置間であっても、実際には1対1の伝送であり、信号自体の漏洩はあっても外部において継続的に盗聴することは困難だからである。よく心配されるのは配電盤や電力計を通して家の外部にPLCの信号が漏れ盗聴されないかということである。確かに漏れる信号はあるが、周波数が高いので減衰が大きく、OFDM信号自体を盗聴してもそれを意味のあるデータに再現することは不可能なので事実上問題はな

い。むしろ必要なのはインターネットを通じたウイルス、不正アクセス、盗聴、成りすましといった情報社会の負の側面への対応である。PLCを単に家の中だけの情報接続手段として利用するのであれば問題ないが、インターネットを使って外部と接続する場合には、安心・安全をキーワードとするホームゲートウェイのような情報を保護するファイアウォールが必ず必要になるであろう。ホームゲートウェイにPLCを搭載するというコンセプトは、信頼性と安全性を物理的にも確立し、使いやすい形で両立させた商品の提案となる。

12. PLCの課題 相互接続性の無さ

PLCの最大の課題は方式間での相互接続性の無さである。現在200Mbps級のPLC-LSIのチップを提供可能なLSIベンダーは数社あるが、お互いに相互接続はできず、お互いの信号を同帯域内でノイズと見なしてしまう。もし一つの家庭の中に異なるメーカーのPLC-LSIを使った装置があると、伝送レートは当然落ちるし、最悪の場合、信号電力の弱い方のモデムはほとんどつながらないという状況になる。標準化団体としては米国のHomePlug (HomePlug Powerline Alliance), UPA (Universal Powerline Association) 等が同じ方式を提唱し相互接続を可能とする活動をしているが、方式が違うPLC装置同士の相互接続は不可能である。CEPCA (Consumer Electronics Powerline Communication Alliance) という団体ではこうした状況を打開しようと、違った方式同士でも最低限の伝送レートをお互いにシェアするという試みが成されている。PLC

が各家で1台（1対）しかなければ問題はないが、PLC機器の普及につれて、このような問題が必ず起きてくるものと思われる。したがって、PLCの方式をどの方式にすべきかは重大な要件になるし、機器メーカーとして市場の混乱を避けるための社会的な活動も必要となる。

13. むすび 新たな可能性

PLCは昔からある方式と技術であるが、200Mbpsという高速の伝送が可能になったのは、最新の伝送技術、デジタル処理技術、LSI技術の集大成によるものである。伝送線路としては最悪の電灯線であるが、どこにでもあるユビキタスそのものである電源コンセントを使うという発想は正にコンプスの卵である。通信のネットワークでいえば末端まで、毛細血管までネットワークの範囲が広がったことに等しく、新たな可能性をもった技術である。最近の日本は安全・安心といった面で普通の国になりつつある。従来の単に製品が壊れないという信頼性から、ネットワーク内での安全、日常での安全といった信頼性にキーワードが移行し、PLCを含め

た次世代の製品開発の指針になるものと考えている。

参考文献

- 1) 総務省報道資料：高速電力線搬送通信に関する研究会報告書（平成17年12月26日）
http://www.soumu.go.jp/s-news/2005/051226_6.html
- 2) 総務省報道資料：高速電力線搬送通信に関する研究会（第8回）、資料8-5電力線特性測定結果、高速電力線通信推進協議会、（平成17年8月18日）
http://www.soumu.go.jp/joho_tsusin/policyreports/chousa/kosoku_denryokusen/050818_2.html



【開発者】 高遠