

# 高速電力線搬送通信への JARLの取り組み

平成17年2月23日

社団法人 日本アマチュア無線連盟  
The Japan Amateur Radio League Inc.  
電磁環境委員会 委員長  
芳野 赳夫

- HF帯アマチュア無線とPLC
- 国内外におけるPLCの最新情報
- JARL/PLC-Jとの第1回合同実験
- 漏洩電界発生メカニズムの考察
- PLC機器の外部電磁界に対する防護体制強化
- PLCに対するJARLの取り組み

# HF帯アマチュア無線とPLC

【背景として】

高速電力線搬送通信(PLC)の考え方は、1996年頃に欧州に生まれた。

欧州の電力網は一部の地域を除き地中配線で、都市部は年代の経た石造りの建物が多く、古いコンジェットパイプに新たな通信線を通すことは非常に難しい事情があった。そこで、宅内の各部屋に配線されている電力線を使用して高速通信はできないかと考え、宅内PLCの実用化に関する研究が始まった。

2

## ヨーロッパ

ヨーロッパの多くの地域は地中配線のため宅内引込み線終端までの電波放射はそれほど問題にならず、比較的スムーズにPLCが導入され実験を開始した。しかし、宅内配線からの電磁干渉が意外に多く、加えてドイツ、英国などでアクセス系PLCの実験を行った結果、大反対が起こり、規制についての研究が始まった。

特にこの問題はアマチュア無線への混信がひどく、国際アマチュア無線連合(IARU)Region Iで大きな反響を生み対策に動き出した。

3

# アメリカ

電力会社の高速通信網への参入の良い機会として Home Plug等がテストを始めた。しかし、米国アマチュア無線連盟 (ARRL) の強い反対と連邦通信局 (FCC) の指導によって、アマチュアバンド内のPLCレベルを30dB低下させた。

しかし、市街および郊外地の多くは架空送電線が多く、特に引込み線からの放射が目立ち、反対意見がアマチュア無線のみならず、軍、航空無線標定、その他広い範囲で起こり、2004年夏の時点でFCCとARRLに対して反対意見が総計12万件を超えた。

実験地域付近はもとより、10km以上離れた地域でもPLCの干渉を受けることが確認されている。

4

# 日本

わが国では2001年より九州電力、関西電力等の電力会社が通信事業参入の手段としてPLCが取り上げられ、総務省に対して短波帯の規制緩和を要望するとともに検討を開始した。この動きに対して有志のアマチュア無線家たちがJARL関西地方本部主催で仮設電線路に信号発生器 (SG) を接続して実験を行い、漏洩電界強度が強く電波干渉への危機感を強くした。

また、(社)電波産業会との合同実験を2001年1月に行い、アマチュア無線の通信を阻害するレベルの漏洩を検出した。総務省は2002年4月から7月までの日程で「電力線搬送通信設備に関する研究会」を開催し、JARLは積極的に関与した。

5

# 国内でのPLC実験

「電力線搬送通信設備に関する研究会」が実施した、実環境実験は「戸建て」、「集合住宅」、「オフィスビル」など条件の異なる建造物等で実施された。これらの実験にもJARLは積極的に参画し、漏洩電界の実態を把握した。

近傍電磁界については、2002年1月に電力中央研究所赤城試験センターを始め各地で実施した実験で、単純な近傍界の測定で、電波法施行規則で定められている免許を要しない局の範囲を10dB以上も超えた漏洩電界を実測した。

6

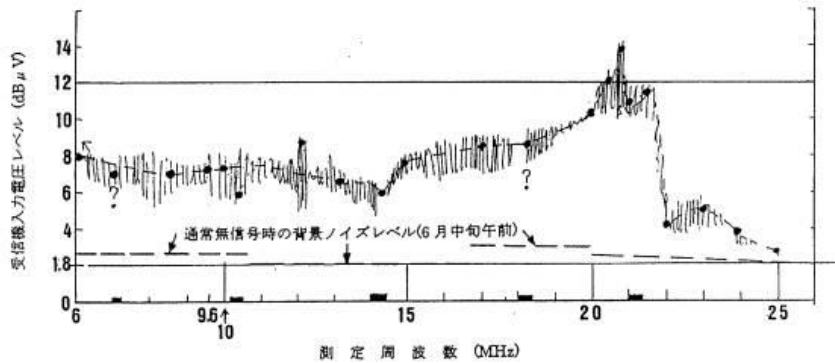
## PLC実験によるアマチュア局への干渉

2002年6月20日の9時30分ごろ、杉並区の自宅で偶然、短波帯受信機の電源を入れたところ広帯域にわたってノイズが出ていることを確認した。3素子のロータリービームアンテナを回転して最大方向を探すと15dB  $\mu$ V/m以上の電界強度で、その方向にはNTT-ATビルがあった。その建物を訪ね、ノイズの原因がPLCの実験であることを確認した。

自宅の短波帯アンテナと実験場所は見通しであり、その距離は592mである。

7

## 離隔距離592m地点での モデム1の電界強度



6月20日のPLC放射電界強度 vs 周波数特性測定結果 (モデム 1)

8

## 離隔距離592m地点での モデム2の電界強度

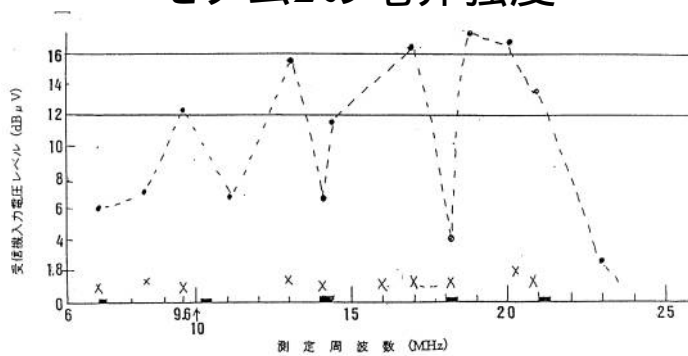


図3 6月21日のPLC放射電界強度 vs 周波数特性測定結果 (モデム )

(現地測定：測定アンテナの設置条件が適当のため参考データ)

受信機：Watkins Johnson WJ-8611

デジタルレベル表示でモデム作動時と無作動時の差値を示す。

モデム：当時測定中の数種のものの区別なし。

9

**PLCによる電磁界漏洩は、単に近傍電界のみならず、  
場合により電波法の規定に抵触するほどの強力な遠方  
放射電磁界の存在が実証された。**

**「電力線搬送通信設備に関する研究会」は、時期尚早  
との報告をまとめ、規制緩和は見送られた。**

10

## **欧米等におけるPLCの最新事情**

**講演者は、公演日の前日にチューリッヒで開催された  
EMCシンポジウムから帰国。**

**シンポジウムで行われたPLCセッションの最新情報を  
報告する。**

11

- アクセス系PLCの内、アメリカ、スペイン、イタリアにおける郊外地域を除き、殆どは地中配線系のため、短波無線との干渉については比較的問題になっていない。
- ドイツをはじめヨーロッパ各国では、宅内配線間の主として伝導妨害波の相互干渉による誤動作などについて問題が多発しており、1戸建てではほぼ実用化の目途が立てられているが、特に集合住宅などで混信、通信速度低下など泥沼化しているところが多く、一部で無線LANへの変更が行われている。(オランダ、フィンランド等)
- ヨーロッパの一部の国ではPLCから撤退を考慮中の国がある。(オランダ、フィンランド、スウェーデン等)

12

## 規制の現状(欧州 CISPR)

1999年よりPLCの規格化の審議を開始したが、線路長と波長の関係、測定法の複雑さ、電磁波としての放射を含む(CISPRの作業範囲外)等のことから統一化が不可能な状態にある。

2004年9月に上海で開催されたCISPR会議でも、この統一化について審議が交わされ、議長が提案したPAS(PLCに使用する機器の不要輻射の許容値と測定法)は否決された。CISPRでの規格化までの間は、各国の認証機関でCEマークを交付して使用すると意向もある。

しかし、多くの国では短波使用局、その他の伝送系統に干渉が生じた場合、この防止に努めると共に、解決不能の時は使用を停止、または破棄することを義務づける方向に向かっている。

13

## 規制の現状(米国)

FCCでは2004年10月、産業界の強いロビー活動とブッシュ政権の強い指導により、FCC規則の改正を行いPLCの周波数を従来の2~30MHzから80MHzまで広げ、アクセス系PLCの漏洩電界をFCC part15 (69.5dB  $\mu$  V/m at 3m)まで許可することとした。発行は15ヶ月後となっている。

ARRLは大統領に対して再考を求める抗議文を送り、他の短波利用者、EMC関係者も献身的な抗議活動を続けた結果、次に紹介する規制事項を獲得した。

14

## FCCの規制事項

主としてアクセス系PLCを含む場合について次の規制を実施する。

**問題が生じた場合は周波数を切り替える。**

**(80MHzまで、A、Bの2つの範囲で)**

**問題が生じた場合はシャットダウン可能なシステムとする。**

**設置者は設置場所の情報をデータベース化して一般に公開する。**

これらは、従来からもPLC試験運用の許可条件として、住民の了解を得るなどの事項が義務付けられていたことであるが、今回さらに明文化された。

15

## 規制の現状(オーストリア)

昨年秋にIARU Region IのEMC WGのチェアマンであるChristian Verhold氏(OZ8CY)から、オーストリアにおいて4000モデム加入のPLCシステムが、アマチュア無線等の無線設備に与える混信で、システムの使用を永久に停止されたとの情報が寄せられた。

16

## JARL/PLC-J合同実験

2003年の総務省の新たな実験許可後、JARLとPLC-Jとの間で今後開発される改良型モデムの漏洩電界について、合同実験を行い、公正を期すことで合意した。

JARLとしては今後の改良の成果を数学的に的確に判定できるように、基礎特性を一定の条件の下に測定する基準値の決定が必要であることを提案し、この了解の下に第1回合同実験を実施した。

17

# 第1回JARL/PLC-J合同実験

## 実験の目的

一定の条件を持ちデータの再現性のあるサイトを用いて、今後の改良の基準となるデータの取得を目的とする。  
管理された環境下で基礎データを取得する。アマチュア無線周波数帯以外の電磁干渉評価は行わない。

実施期間 : 平成16年10月27日～28日  
実施場所 : アクゾノーベル(株)鹿島EMCサイト  
(茨城県鹿島郡波崎町)

18

## 実験方法(SG使用)

測定周波数 : アマチュアバンド8バンド毎に各1周波数  
(3.5、7、10、14、18、21、24、28MHz)  
検波方式 : Sample検波値の平均値 (BW=1kHz)  
センサー : ループアンテナ(EMCO/6507)2軸合成偏波  
短DP(水平2方向、垂直) JARL試作品

線路上のコモンモード電流 :  
50cm間隔(上記8周波数で測定)

19

## 実験方法(モデム使用)

測定周波数 : 2MHz~30MHz

検波方式 : Sample検波値の平均値 (BW=1kHz)

モデム ON/OFF交互測定

センサー : ループアンテナ(EMCO/6507)2軸合成偏波  
短DP(水平2方向、垂直) JARL試作品

線路上のコモンモード電流 :

50cm間隔(上記8周波数で測定)

20

## 測定項目

放射電界特性の把握(SG及びモデム)

距離 : 10m、30m、100m(200m)

(離隔距離200mでの測定はSGのみ)

受信方法 : ループアンテナとスペアナ

短DPとスペアナ

ループアンテナとアマチュア無線機

短DPとアマチュア無線機

予備計測

架線特性(LCL、ノーマル、コモンインピーダンス、バラン特性)

SG及びモデムによるコモンモード電流測定(間隔50cm)

21

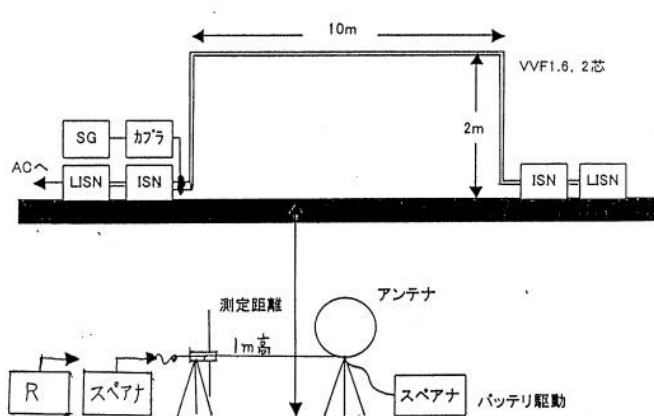
## 疑似宅内電力配線と測定器の配置

宅内配線の典型例としてVVF1.6ケーブルをターンテーブル上に垂直に高さ2m、水平に幅10m、下に垂直に2m仮設して、一端にカプラを通してSG (HP8656B)とISN、LISNを接続し、多端はISNとLISNで終端した。

疑似宅内電力配線と測定計を次に示す。

22

## 疑似電力配線と測定器の配置図



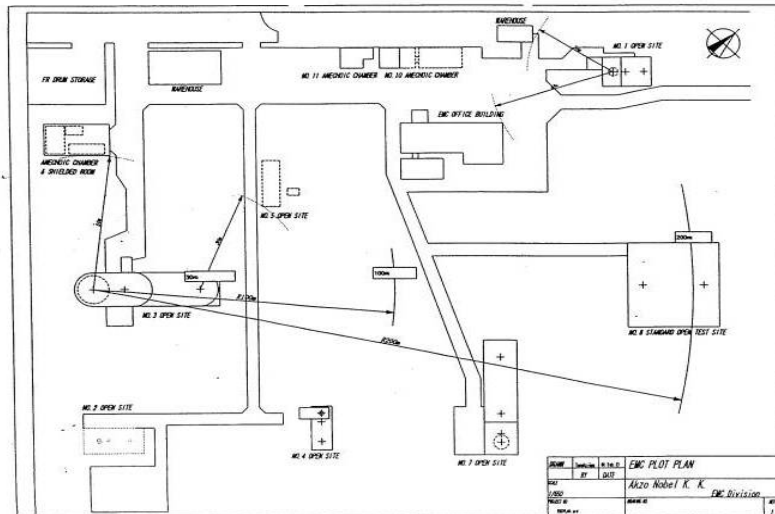
23

測定は、疑似宅内配線から、10m、30m、100m(SGによる測定では200mを追加)の離隔距離の各点に、標準ループアンテナの下端が1mの高さとなるように設置してスペアナで測定した。また、この位置で短ダイポールアンテナ(DP)の給電点が1mとなるように設置してスペアナとアマチュア無線用受信機を接続して測定した。このとき屋内用電力線の各測定周波数ごとにターンテーブルを回転して、常に放射パターンの最大点を求めて測定した。

この結果、この疑似配電線が、進行波アンテナの放射パターンに類似のパターンを持っていることを確認した。

測定サイトの平面図を次に示す。

24



25

## 短ダイポールアンテナの概要

今回、短波帯の放射電化位置を直接測定し、従来の標準ループアンテナセンサーから得た電界測定値と比較することを考えて、JARLでは電界強度測定用短ダイポールを試作して、今回の実験に使用した。



26

試作したダイポールアンテナは、全長1mで給電点に広帯域作動アンプを接続したものである。

試作アンテナは、共同実験を行ったアクゾノーベル(株)鹿島EMCサイトの第3サイトで事前に特性試験を実施した。全長5mのダイポールアンテナを高さ4mに設置して送信アンテナとし、試作アンテナを離隔距離3m、給電点高1mの地点に配置して特性を計測した。

このテストでは、参照用アンテナとして標準電界法で較正されたループアンテナを用い、両者の比較を行った。このアンテナの特性を次に示すが、試作したアンテナの係数は約12~13dBと見積もることができる。

27

## 試作空中線(センサー)の受信特性

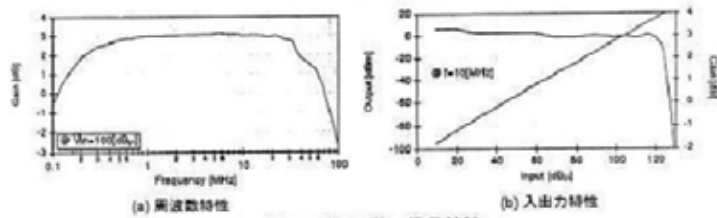
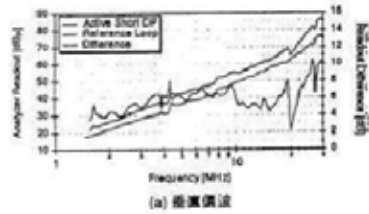
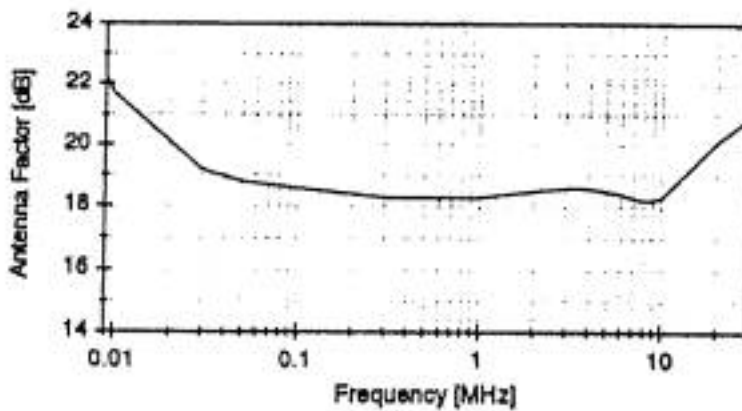


図7 プリアンプ部の単一信号特性



28

## 参照空中線のアンテナ係数



29

ターンテーブル上に設置した  
実験線路と測定アンテナ



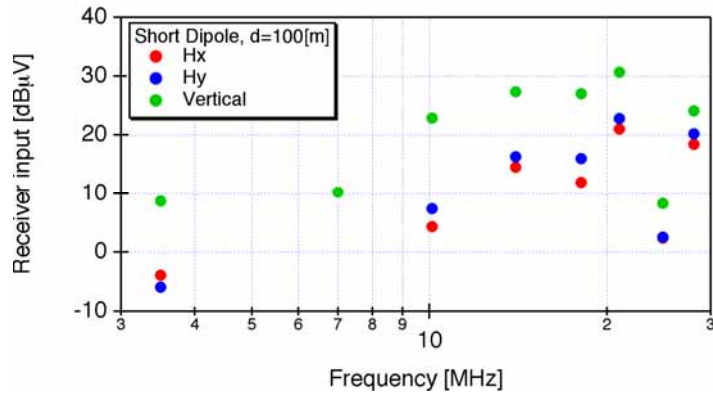
30

実験線路から100m地点での測定



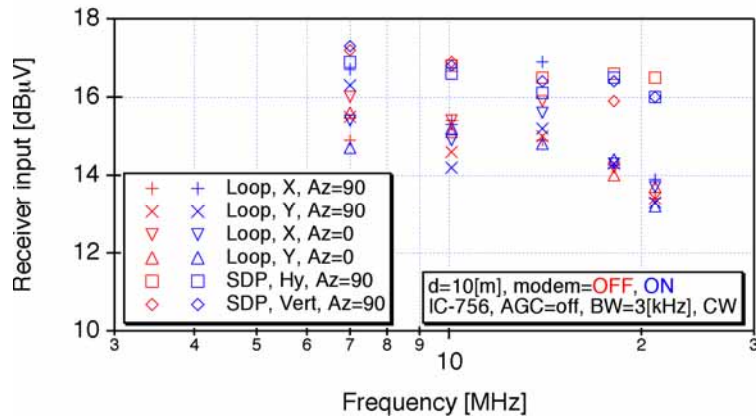
31

## SGを使用した漏洩測定結果 (100m)



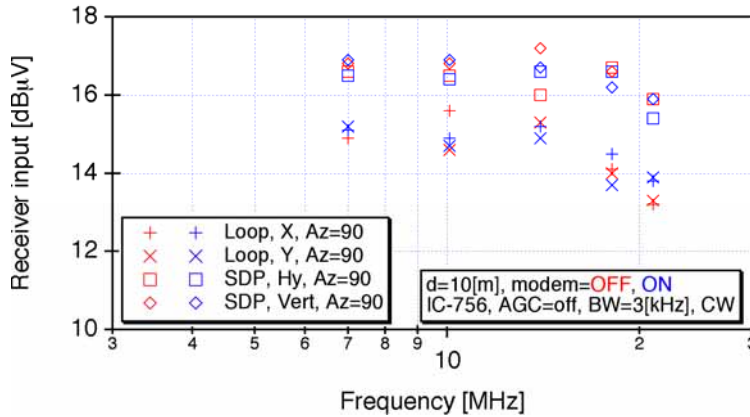
32

## モデムを使用した漏洩測定結果 (10m)



33

## モデムを使用した漏洩測定結果 (30m)



34

## 第1回JARL/PLC-J合同実験結果

屋内配線を想定して敷設した配線による短波帯電波の放射特性は、2線を一つにまとめた線路として働く高周波線路とグランド間に形成された「Beverage Antenna」(進行波アンテナ)の放射パターンを示した。

このため周波数毎に放射パターンの最大値にターンテーブルを回転して、最大放射角方向の電界値を測定した。この配線によるSG出力(10dBm)では100mの距離でもスペアナとアマチュア無線用受信機の双方とも確実に受信できた。通信用高感度受信機では、離隔距離200mでも受信可能である。

スペアナの受信感度に対してアマチュア無線用受信機の感度ははるかに高感度であり、今後の漏洩電磁界の測定には通信用受信機による検出が必要である。今回用いたアマチュア無線用受信機は通信用受信機とほぼ同等の感度を有しており、感度は2MHz~30MHzバンドで $0.1 \mu\text{V}/50$  でS/N 10dBの標準特性を有している。

35

# 測定結果から

今回の測定では10mのターンテーブル上に疑似宅内電力線を回転して測定した。疑似電力線の放射パターンから、この線路が進行波アンテナとしても動作していることが推定されるので、この結果から、遠方電磁波の放射の可能性が考えられる。

36

## 進行波アンテナの放射電磁界を示す基礎方程式

Characteristics for the Traveling-Wave Antenna

$I(z)$	$I_0 e^{-jkz}, \quad 0 \leq z \leq L$
$A_z(r)$	$(I_0 L) \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} e^{-jk(L/2)(1-\cos\theta)} \frac{\sin[(kL/2)(1-\cos\theta)]}{(kL/2)(1-\cos\theta)}$
$E_r(r)$	$\hat{\theta} j\omega\mu (I_0 L) \sin\theta \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} e^{-jk(L/2)(1-\cos\theta)} \frac{\sin[(kL/2)(1-\cos\theta)]}{(kL/2)(1-\cos\theta)}$
$H_r(r)$	$\hat{\phi} jk (I_0 L) \sin\theta \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} e^{-jk(L/2)(1-\cos\theta)} \frac{\sin[(kL/2)(1-\cos\theta)]}{(kL/2)(1-\cos\theta)}$
$P_r[2]$	$\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{I_0^2}{2\pi} \left\{ \ln(2\pi r) - 1 + \ln(2L/\lambda) - Ci(2kL) + \frac{\sin(2kL)}{2kL} \right\}$
$R_r$	$\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{1}{2\pi} \left\{ \ln(2\pi r) - 1 + \ln(2L/\lambda) - Ci(2kL) + \frac{\sin(2kL)}{2kL} \right\}$

37

# 進行波電流分布の放射電磁界

$$J(z) = I_0 e^{-(\alpha + j\beta)z} = I_0 e^{-\gamma z} \quad (1.65)$$

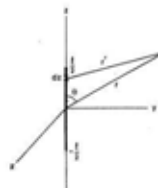
The radiating field is found from the vector potential for the source

$$A_z = \frac{j\mu_0}{4\pi} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \frac{e^{-\gamma z} - jkz'}{r'} dz \quad (1.66)$$

The electric field is given by  $E_\theta = -j\omega \sin \theta A_z$  which after integration gives

$$E_\theta = \frac{j\omega\mu_0 I_0 l \sin \theta e^{-jkr}}{4\pi r} \frac{\sin X_0}{X_0} \quad (1.67)$$

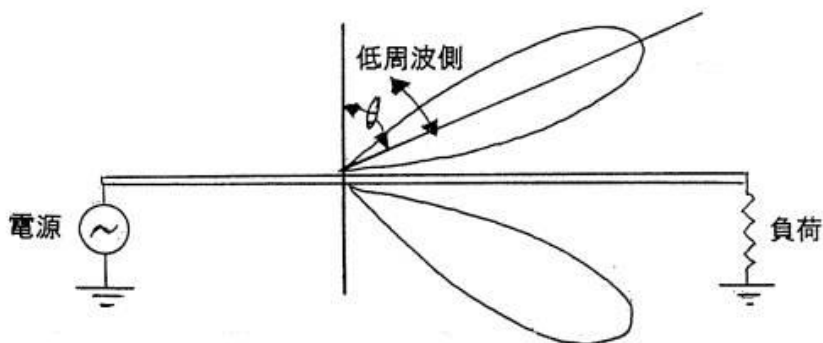
where  $X_0 = \frac{l}{2} (k \cos \theta + j\gamma)$ . For the case of uniform amplitude ( $\alpha = 0$  and  $\gamma = j\beta$ ),  $X_0$  becomes  $\frac{l}{2} (k \cos \theta - \beta)$ .



The  $(\sin x)/x$  pattern has already been studied with reference to line source apertures and long linear arrays. The direction of maximum radiation occurs when  $\cos \theta = \beta/k = c/v$ . Thus the cosine of the angle of radiation is proportional to the propagation constant, and for a travelling wave just above cut-off ( $\beta = 0$ ), the radiation is broadside while when the phase velocity approaches the velocity of light the radiation is endfire.

38

# 進行波アンテナの放射パターン



39

## 今後の測定での留意点

今後は一点によるポイントソースの測定値で議論することは意味がない。波長と電線長が同程度となる短波帯の測定では、ラインソースの放射について議論すべきで、通信ポート、ケーブルに沿った電流分布、高さ方向の分布を含む全方向の放射特性データの取得が必要である。このためには、真の電界強度値を測定できる有効なセンサーの開発が必要である。今回、JARLが開発した短ダイポールによる電界強度測定など、新しいセンサーを開発して使用するべきである。電界測定用のループアンテナでは、地表や建造物等の影響で波動インピーダンスが自由空間値(約375 $\Omega$ )とは異なるため、正確な電界値の算出及び測定は不可能である。

40

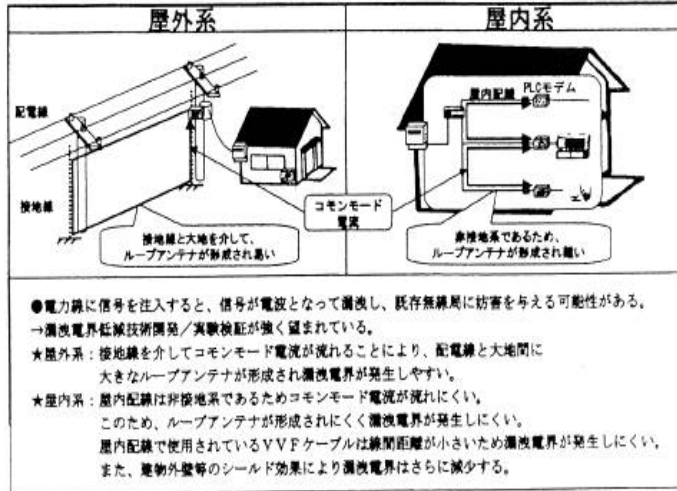
## 漏洩電界発生のメカニズムの考察

アクセス系で最も電磁界放射が多いと考えられるのが、架空引込み線である。この一端にモデム(超広帯域送信機)を接続した場合、わが国の単相電力線ではトランスの一点接地で、引込み線が撚り線なので高周波電流は2本の電力線上に同位相で励起されて、効率の良いアンテナとして動作する。

非接地の屋内配電線はループを作らないということは考えられず、一端がショートまたはオープンの際は、次の図のように半端な周波数でも複雑な電磁放射が起こり、非整合負荷が接続された時は、線路長により前述の進行波のような放射が起こる。これらの場合は、通常周囲状況のファクターを含む多数の複雑な干渉を受け、数学的な解析は極めて困難となる。

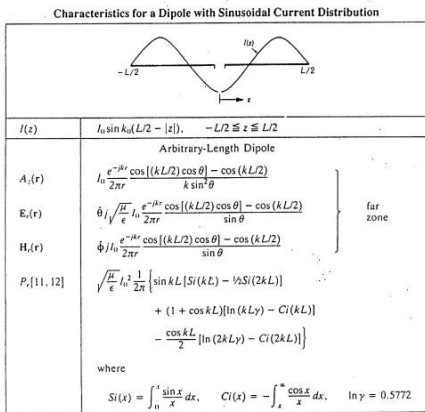
41

# 漏洩電界の発生メカニズム



42

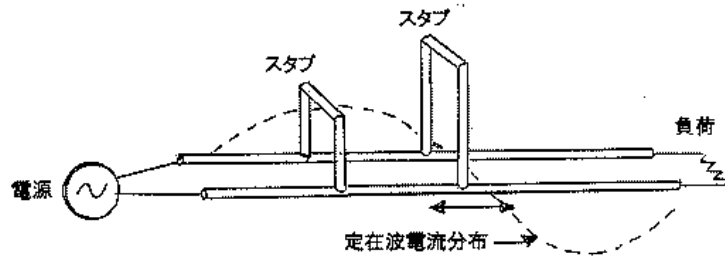
# ダイポールの放射特性の基礎解析方程式



Half-Wavelength Dipole ( $L = \lambda/2$ )	
$A_s(r)$	$I_0 \frac{e^{-jk_0 r}}{2\pi r} \frac{\cos(n/2 \cos \theta)}{k \sin^2 \theta}$
$E_s(r)$	$\hat{\theta} j \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} I_0 \frac{e^{-jk_0 r}}{2\pi r} \frac{\cos(n/2 \cos \theta)}{\sin \theta}$
$P_s$	$\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} I_0^2 \frac{1}{4\pi} [\ln(2\pi y) - Ci(2\pi)] = 0.194 \sqrt{\mu_0} I_0^2$
$R_s$	$\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{1}{4\pi} [\ln(2\pi y) - Ci(2\pi)] = 0.194 \sqrt{\mu_0} (R_s = 73 \Omega \text{ in free space})$
$G_s(\theta, \phi)$	$\frac{4 \cos^2(n/2 \cos \theta)}{\sin^2 \theta [\ln(2\pi y) - Ci(2\pi)]} = 1.644 \frac{\cos^2(n/2 \cos \theta)}{\sin^2 \theta}$
$D$	$\frac{4}{\ln(2\pi y) - Ci(2\pi)} = 1.644$

43

伝送線路で考えても、多数のコンセントに様々な負荷が接続された場合には、波長と線路長の関係で、レール線に多数のオープン、ショートスタブを接続した場合と同様に負荷インピーダンスの変動で線路特性が変動して、定在波が立ち、複雑な電磁放射が発生する。



44

## PLC機器の外部電磁界に対する 防護体制強化

- 国内での短波帯アマチュア無線の最大電力は1kWで、アンテナ近傍での電磁界強度は、数百V/mに達する。
- 配電線に誘起した電圧により、PLCモデムの通信途絶などの障害が発生する可能性もある。
- アマチュア無線局の送信波によりPLCシステムに不具合が発生した場合に、それを理由としてアマチュア無線が制限を受ける事をJARLは危惧している。

45

## 短波帯アマチュア無線は

- 短波帯アマチュア無線の醍醐味

遠方の海外アマチュア局からの微弱でノイズに埋もれた信号を受信し、交信が成立した時の喜び。また、数W以下(数mWから数W)の小電力で海外交信が成立したときの喜びが醍醐味である。

- 許容干渉レベル

アマチュア無線における許容干渉レベルは、電波天文など短波を利用した自然観測と同様に**背景雑音以下**。

46

## PLCに対するJARLの取り組み

PLC-Jとの合同実験は、HF帯アマチュア無線の運用に大きな障害を与える漏洩電波の抑圧技術等の開発という観点から、その抑圧技術や漏洩電波の低減などについてPLC-Jとの共同実験を通じて、慎重に対応していきたいと考えている。

### JARLからの提言として

近傍電磁界の屋外測定も必要であるが、屋内に敷設される接地されない電源線を通した伝導雑音の混入を解決することを必須条件として強く提言する。

47