

## 短波帯の電波伝搬と集積効果の重要性について

日本学術会議

国立天文台

資料とりまとめ参加者

日本アマチュア無線連盟

日経ラジオ社

### 1. 短波帯の電波伝搬

短波帯の電波伝搬に関しては古くからよく研究されている。日本はこの分野で世界をリードする研究をしており、電波伝搬に関する書物が多く出版されている。例えば「電波伝搬（前田憲一，後藤三男著 岩波全書 185）」は、電波伝搬の基礎となるマクスウェルの方程式をはじめ、長波，中波，短波，超短波毎に地表伝搬論（対流圏を含む）、電離層伝搬論を展開している。この本の緒言には下記の文言がある。

電波伝搬と称せられる工学上の一分野は、今世紀初頭マルコーニによる大西洋横断通信の成功にその端緒を開き、爾来今日に到るまで多くの物理学者、無線技術者、素人無線家の努力により形成せられ来たる学問で、その根本目的とするところは、地球の 1 地点において発射された電波が如何なる経路を経て所期の目的地に到達するか、又十分な強度をもって受信され得るか否かを明らかにするにある。即ち電波は、もし自由空間内を進行するのであれば、その強度は伝搬距離に逆比例して減少し、伝搬法則は極めて簡単であるが、実際には大地の存在、電離層による反射、大気の不均一性等多くの原因によって複雑な伝搬形態が生ずるのである。（注：原文は旧字体）

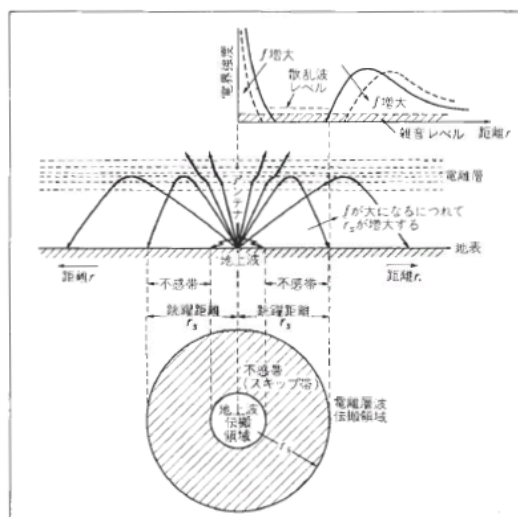


図 1. 短波帯における電波伝搬の概念図  
 （「電波伝搬」CQ 出版社より）

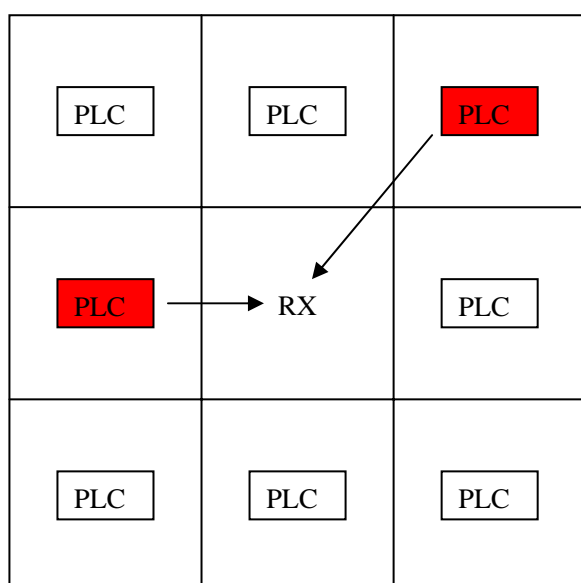
短波帯における電波伝搬は、対流圏波（直接波，大地での反射波，回折波，地表波の合成波）と電離層波(sky wave)に大別することができる。電波伝搬を扱う理論としては Ray theory（幾何光学）と Wave theory（波動光学）があ

る。送受信点の地表からの高さが両者共波長に比べて十分大きい場合は扱いが容易な Ray theory によって伝搬を記述することができる。しかし、その他の場合は Wave theory に寄らなくてはならない。地表波は Ray theory では説明できず、Wave theory を用いなければ説明できない現象である。特に短波帯より長い波長帯の電波伝搬は、Wave theory を用いなければうまく記述できないことがよく知られている。(詳細は、例えば「電波伝搬 (前田・後藤著)」の 82-83 ページを参照いただきたい。)

放射点近傍では地上波 (直接波, 反射波, 地表伝搬波の合成) が卓越する。地上波は放射点から離れるにつれて急激に減衰する。一方電離層を伝搬する sky wave は放射点からある距離 (跳躍距離) を越えると大きな電界強度を持つようになる。このため放射点から有る程度の距離の地域には散乱波以外の電波が到達せず、この地域は不感地帯と呼ばれる。跳躍距離を越えると複数の伝搬経路を通ってきた sky wave が大きな電界強度を持ち始め、さらに離れると少しずつ電界強度が減少する。しかし、さらに遠方に行くと、電離層と地表で反射した sky wave が大きな電界強度を持つ。これが短波帯では遠距離通信が可能となっている理由である (図 1)。

## 2. 資料 3-8 について

当該資料は PLC-J 殿単独による PLC システムのごく近傍における測定結果に基づいている。結果として 1. に述べた短波帯の伝搬形態を考慮していない資料となっている。PLC-J 殿の測定は、電力線を含む PLC システム及び漏洩電界測定アンテナ高が波長に比べて十分高いとは言えず、その伝搬は wave theory によって解釈するべきものである。また、測定した漏洩電界は直接波, 反射波, 地表波などの合成電界であるため、減衰の距離依存性を議論するためにはデータが不十分である。しかしながら、資料 3-8 の添付資料 2 においては、PLC-J 殿単独の測定データから導いた減衰の距離依存性が十分遠方でも成り立つとの仮定の下、かつ、幾何光学的解釈によって累積効果を見積もっている。これは短波帯の電波伝搬特性を考慮すると正しい見積を行っていないと結論できる。



もし資料 3-8 における伝搬や累積効果に関する内容が正しければ、短波帯では遠方との通信が不可能という結論になる。しかし、実際には数千キロも離れた地点との通信が行われている。これは明らかな矛盾である。

さらに、資料 3-8 5 ページにある累積効果の定義式は誤っている。対数関数内の分子は  $E_{\text{sum}}$  だけでよい。

図 2. 受信サイト近傍の PLC 分布モデル (極めて単純化していることに留意)

また 5 ページ頭にある無線局受信機のごく近傍 (数百メートル) 以内を考えるのであれば, 受信機周囲の PLC システムは離散的に分布するので積分によるのではなく単純に和を取ればよい。積分で置き換えられるのは PLC システムの分布地域を十分遠方から見て, その分布が連続的とみなせる場合である。

東京 23 区内の 1 世帯当たりの平均占有面積が約  $149\text{m}^2$  ( $=1/0.0067$ ) となることを考慮すると, およそ  $12\text{m}$  ( $\cong \sqrt{149}$ ) 間隔に世帯が分布していることになる。即ち, 任意の受信機周囲を  $12\text{m}$  間隔の格子に切り分けると, 図 2 に示すように PLC 機器が分布しているとみなすことができる。(受信機, PLC システムは  $12\text{m}$  四方の各格子の中心にあるとみなす。) PLC-J 殿が仮定している稼働率 30% を採用してみると, 赤で塗りつぶしたものが動作中とみなすことができる。受信機 (RX) の右上の PLC からの漏洩電界強度は, 電界が距離に反比例すると仮定すると, 左の PLC と比べて  $1/\sqrt{2}$  である。よって左と右上の PLC からの合成電界強度は, 単一の PLC の場合の

$$\sqrt{1^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2} = \sqrt{1 + \frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{3}{2}} = \frac{\sqrt{6}}{2} \approx 1.22$$

倍となる。1.22 を dB に換算すれば  $20\log(1.22) = 1.76\text{dB}$  だけ累積することとなる。電界の減衰が距離の 1.3 乗に逆比例する場合でも, 合成電界は 1.18 倍 =  $1.46\text{dB}$  の増加となる。このように近傍においても累積効果が明確に現れると考えられる。

7 ページの航空機への影響評価であるが, 計算結果は積分領域の幅  $w$  の関数であるはずだが  $w$  がいつのまにか消失していること, 航空機無線局で受信する PLC からの信号を計算する際に対象エリアの中心軸上に PLC システムが集中しているという仮定に切り替わって計算していること, sky wave を一切考慮していないことなど, 計算方法に疑問がある。

9 ページの距離減衰であるが,  $102\text{dB}$  は放射点から真空中を等方的に伝搬する場合の電力減衰の値である。等方的に電波が広がる場合, 電界強度の減衰量  $51\text{dB}$  となる。短波のように大地と電離層間を進行する波の遠方までの伝搬は, 明らかに等方的ではなく, むしろ導波管内の伝搬に近いと考えるべき。よって 9 ページの議論は不適切である。

短波帯の遠方への電波伝搬は wave theory を用いた勧告 ITU-R P.533 に基づいて求めるべきである。

### 3. 諸外国の検討における累積効果の扱い

欧米においては、実測により累積効果が生じることを確認した上、累積効果が生じる前提で検討を行っている。本研究会においても当然累積効果を踏まえた検討を行うべきである。下記に事例を紹介する。

#### 3.1 米国

NTIA Report 04-413 では累積効果(aggregate interference)について述べた部分を抜粋する。括弧内はレポートの章番号を表している。実測の結果、集積効果が見られたことも分かる。特に航空管制は乗員・乗客の生命に関わるものであり、累積効果を重視して検討していることが分かる。

#### (5.2.2 Propagation Modes)

Sky waves suffer large losses mainly due to ionospheric absorption and polarization coupling losses. In a dense deployment of BPL systems, there may be **aggregation of co-frequency BPL emissions** toward the ionosphere. Emissions in directions above the power lines may aggregate via sky wave or via ground wave and space wave, and emissions toward or below the power lines generally may aggregate via ground wave. Preliminary modeling of power lines (Appendix E) suggests that there is relatively strong radiation in directions above the power line horizon (i.e., higher than radiation toward directions below the power lines), and so, **aggregation of BPL signals** at locations above power lines may be more significant than at lower heights where BPL signal propagation is less efficient.

#### (6.7 CONCLUSION)

For the aircraft receiver, **aggregate interference effects** were considered for simultaneously active, co-frequency BPL systems deployed at a density of one per square kilometer over an area having ten (10) kilometers radius. The power lines were assumed to be randomly oriented and an average of the power line far-field gain levels were used in each direction under consideration. Aircraft were assumed to be operating at altitudes of 6 to 12 km at locations ranging from zero to fifty (50) kilometers from the center of the BPL deployment area. Results showed that aggregate interference levels to the aircraft could exceed average ambient RF noise levels at two frequencies (15 MHz and 25 MHz), at distances ranging from thirty-three kilometers (six kilometers altitude) to over fifty kilometers (altitudes between six and twelve kilometers). The S/N reduction exceeded 10 dB at only one frequency, at six kilometers altitude within twelve kilometers of the center of the BPL deployment area. At the two frequencies where the assumed BPL systems produced the lowest interfering signal power levels (i.e., 4 MHz and 40 MHz), S/N reductions peaked at about 0.8 dB and 0.3 dB directly over the center of the BPL deployment area. Higher or lower densities of active

co-frequency BPL units would raise or lower the predicted interference levels in direct proportion to the unit density.

(7.3 MEASUREMENTS SHOULD ADDRESS AGGREGATED EMISSIONS FOR THE FULLY DEPLOYED BPL NETWORK)

**Part 15 specifies that the aggregate emissions from a composite system must satisfy the field strength limits applicable for a single device.** As BPL networks are substantially deployed in a community, **the aggregated BPL emissions for the overall network are expected to increase above the levels generated by a single BPL device. This aggregation has already been observed by NTIA at one of the trial BPL systems** where multiple simultaneous transmissions occur.

(8.6 IMPLEMENTATION OF A “ONE ACTIVE DEVICE PER AREA” RULE)

Several manufacturers have noted that BPL devices in a given area tend to transmit one at a time, and their signals therefore **do not aggregate**. Making such a configuration standard practice (i.e., only using one power line phase in a given area and only one signal injection point per wire) would help to ensure such were the case, at least for a local receiver.

(9.3.1 Evaluation of Potential Interference Risks)

For the aircraft receiver, **aggregate interference effects** were considered for simultaneously active, co-frequency BPL systems deployed at a density of one per square kilometer over an area having a 10 kilometers radius. The power lines were assumed to be randomly oriented and an average of the power line far-field gain levels were used in each direction under consideration. Aircraft were assumed to be operating at altitudes of 6 to 12 km at locations ranging from 0 to 50 kilometers from the center of the BPL deployment area. Results showed that **aggregate interference levels to the aircraft could exceed average ambient RF noise levels at two frequencies** (15 MHz and 25 MHz), at distances ranging from 33 kilometers (6 kilometers altitude) to over 50 kilometers (altitudes between 6 and 12 kilometers). The S/N reduction exceeded 10 dB at only one frequency, at 6 kilometers altitude within 12 kilometers of the center of the BPL deployment area. At the two frequencies where the assumed BPL systems produced the lowest interfering signal power levels (i.e., 4 MHz and 40 MHz), S/N reductions peaked at about 0.8 dB and 0.3 dB directly over the center of the BPL deployment area. Higher or lower densities of active co-frequency BPL units would raise or lower the predicted interference levels in direct proportion to the unit density.

(9.3.3 Techniques for Prevention and Mitigation of Interference)

Implementation of a “One Active Device per Frequency and Area” Rule. Several implementations of BPL systems use a technique whereby only one device in a local “cell” is active on the same

frequency at any one time. Such techniques would reduce or eliminate the chance of any potential local, ground level **aggregate BPL interference effects**. However, in order to increase BPL network capacity or decrease network latency in a given area, it may be desirable to operate independent, co-frequency BPL devices on two or three phases of the same run of three-phase power lines. In any case, compliance measurements are to address radiated field strength due to all BPL devices operating co-frequency within the BPL network in accordance with §15.31(k).

### 3.2 欧州

ECC Report 24 の Executive Summary 内における累積効果(このレポートでは cumulative effect と称している)を抜粋する。

米国と同様に、累積効果を踏まえて PLC からの干渉評価を行っていることが理解される。

- Cumulative effect of PLT below 30 MHz: depending on the injected power, equivalent antenna gain and density of sources of the PLT system under study, the overall EIRP density of all interference sources ranges from  $-170 \text{ dBW/m}^2/10 \text{ kHz}$  (no cumulative effect problem) to  $-80 \text{ dBW/m}^2/10 \text{ kHz}$  (**definite cumulative effect problem**).
- Propagation conditions (in the frequency range up to 30 MHz) are such that the risk of interference to radio services cannot be limited to a national or regional scale (**cumulative effect**, reflection by the ionosphere of wanted signals as well as interfering radiation originating from cable systems).
- Given the high densities of deployment foreseen for PLT networks including in-house applications, there is a risk of significant rise in overall noise level even in rural areas. Every radiation limit to be developed for networks or output power values of individual PLT products should **be judged on the cumulative interference effect** using the models described in Annex 7.
- Effects on amateur radio of the use of power lines for broadband data communications (PLT): for an antenna location as is common for most amateurs, close to or above the house, **the reception of interference radiating from the mains is very serious for field strength levels equal to the example n° 1 limit (NB30) or the equivalent field strength level of the conducted CISPR 22 Class B limit** (see section 4.1). Even the example n°4 limit (BBC limit) is inadequate to avoid interference in the above mentioned situation, in particular on the higher amateur bands

### 4. 勧告 ITU-R P.533 に基づく遠方での電界強度

短波帯の伝搬特性を踏まえ、PLC 放射点から遠方における電界強度を勧告 ITU-R P.533 に基づいたソフトウェア ([http://elbert.its.blrdoc.gov/pc\\_hf/hfwin32.html](http://elbert.its.blrdoc.gov/pc_hf/hfwin32.html)) を用いて求めて

みた。例として周波数 13.5 MHz, ビーム射出角  $15^\circ$ , 受信帯域幅 10kHz, 時刻 UT12h, 2005 年 8 月とした場合の, 送信電力 1kW (図 3) および 1000kW (図 4) の場合を示す。十分遠方からみた場合, 狭い地域に多数の送信設備が存在する場合, 累積効果は対象送信機出力を一点に集中させることで見積もることができる。

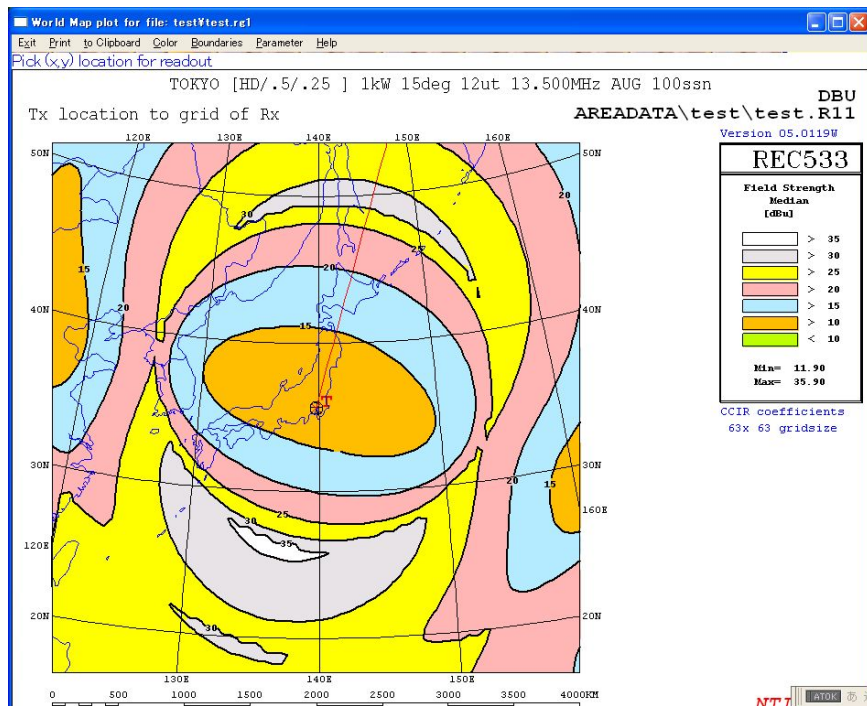


図 3. 東京に出力 1kW の送信機を置き, 周波数 13.5MHz, 射出角  $15^\circ$ , 受信帯域幅 10kHz, 2005 年 8 月 UT12h (JST 21h) の場合の地球表面における電界強度 (dB  $\mu$  V/m)

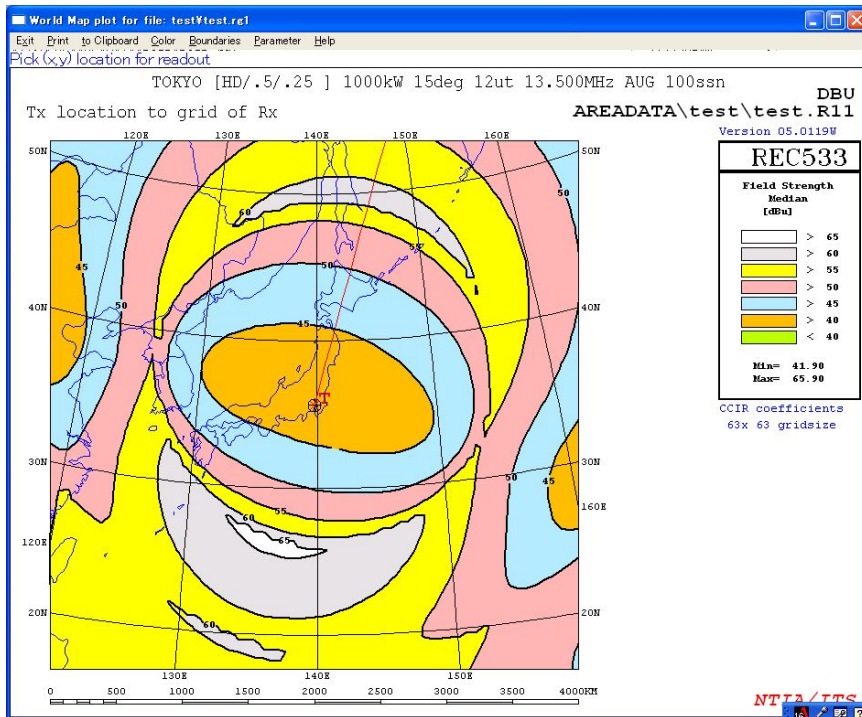


図4. 東京に出力1000kWの送信機を置き、周波数13.5MHz、射出角 $15^\circ$ 、受信帯域幅10kHz、2005年8月UT12h(JST 21h)の場合の地球表面における電界強度( $\text{dB } \mu\text{V/m}$ )

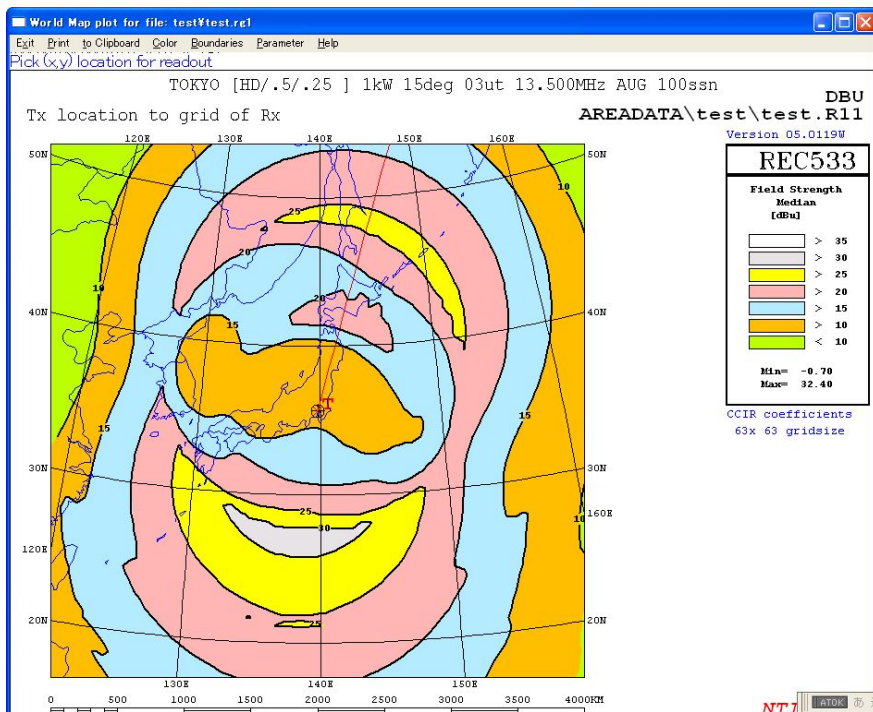


図5. 東京に出力1kWの送信機を置き、周波数13.5MHz、射出角 $15^\circ$ 、受信帯域幅10kHz、2005年8月UT03h(JST 12h)の場合の地球表面における電界強度( $\text{dB } \mu\text{V/m}$ )



これを見れば明らかに送信電力に比例して遠方の電界が上昇することが明らかである。また送信出力 1kW で、時刻を UT03h にした場合 (図 5) も示す。

容易に理解できるように、1kW 相当の放射が複数の PLC システムによって行われた場合、数百キロ以上離れた地点で 20(dB  $\mu$  V/m)を越える電界強度が生まれる。これはアマチュア無線、短波放送、航空管制、電波天文等の保護という観点からは大きすぎる値である。また日本上空の電離層の電子密度は昼夜で変化するため、昼のほうが受信電界強度が高くなる地域も生じる (図 3 と 5 を比較すると北海道では昼大きな電界が測定される)。実際には、PLC システムは全国に展開されることが考えられる。多くは都市部に存在するであろうから、上記のような電界強度の重ね合わせとして漏洩電界が日本領土内のみならず 1000 km 以上離れた地点でも測定されることが予想される。

## 5. 結論

短波帯の電波伝搬特性を踏まえた場合累積効果により放射点から十分遠方で大きな電界が測定される可能性があることが明らかになった。PLC システムの許容値を設定するならば、日本で利用される可能性がある PLC システムの総数、稼働率などを考慮して許容値を設定しないと無線通信システムに大きな障害を起こす可能性があることが明らかになった。

単一の電気設備 (コンピュータ) が中波ラジオに妨害を与えないという観点で設定している CISPR22 に基づいて PLC 許容値を設定する方法は大きく見直す必要がある。