

**■S4 群(宇宙・環境・社会)- 1 編(電波環境)****2 章 電磁妨害波と電磁干渉**

(執筆著者：松本 泰) [2010年12月受領]

**■概要■**

通信システムにおいて、所望の通信信号とともに不要な電磁波が受信されると通信品質の劣化を生ずる(電磁干渉と呼ばれる)。電磁干渉を発生させる可能性のある不要電磁波は、電磁雑音、電磁干渉波もしくは電磁妨害波などと呼ばれる(本章では電磁雑音あるいは単に雑音と呼ぶ。ただし、雑音レベルの規制・規格に関する記述においては、国際規格における electromagnetic disturbance を訳して電磁妨害波と呼ぶことにする)。本章では、通信システムの性能に影響を与える電磁雑音について概要を述べる。

通信システムの設計において、受信機(復調部)における雑音のレベルや性質が事前に予測されている場合には、それによる通信品質劣化が許容範囲内に収まるように通信システムの諸元(送信電力や伝搬距離、通信方式など)が検討される。通信品質への影響を検討する際には、実際の雑音を用いる実験的手法、単純化された雑音モデルを用いた数値シミュレーションや理論計算、それらの組合せなどの方法があるが、実験的手法では実験機材への依存性や雑音波形の再現性が問題となり、雑音モデルを用いる方法ではモデルの妥当性が問題となる。

一般に電磁雑音の発生源や発生機構は様々であるので、ある通信システムの動作環境において電磁雑音の性質やレベルを予測することは難しい場合も少なくない。このような場合、通信システムを保護する(通信品質への影響を許容範囲内に保つ)ことを目的として、雑音源から発生する雑音のレベルに一定の許容値(限度値)が設けられる。雑音レベルの許容値(電磁妨害波レベルの許容値)を定める際には、様々な波形をもつ雑音に対して通信品質の劣化量と良い相関をもつ物理量(例えば雑音の平均振幅、ピーク振幅、平均電力、rms(自乗和平方根)など)を、雑音レベルの定義として定めることが重要である。このため雑音許容値の検討においても、雑音の特性と通信品質劣化量の関係を把握することが重要である。

近年、通信システムではアナログ通信方式からデジタル方式への移行が進んでいるが、電磁雑音による通信品質への影響の仕方や、通信品質の評価尺度自体もアナログ通信とデジタル通信では大きく異なることに注意が必要である。アナログ方式における電磁干渉の影響は、復調された音声信号や画像に表れる雑音として表れ、通信品質は SN 比(信号対雑音電力)比や、復調された音声または画像の主観評価値で表現される。一方デジタル通信システムにおける通信品質は、伝送ビット中の誤りビットの発生確率を示す BEP(Bit Error Rate: ビット誤り率)のほか、PER(Packet Error Rate: パケット誤り率)、Throughput(スループット)、あるいは復号された音声や画像の主観評価値など、いくつかの評価指標があるが、デジタル通信システム全般に適用でき、かつ最も基本的な指標は BER である。

現在、電磁妨害波の測定法及び許容値として CISPR(国際無線障害特別委員会)の定めた規格が国際的に適用されているが、現行の許容値は基本的にアナログ通信との相関に基づいて定められている。このため、近い将来アナログ方式に取って替わるデジタル通信・放送の保護を目的として、新たな電磁妨害波測定法を制定・適用しようとする取組みが行われてい

る<sup>1)</sup>。

### ■本章の構成■

本章では電磁雑音による干渉問題、特にデジタル通信システムへの干渉を検討するために必要な事項として、まず 2-1 節では雑音のモデル化と通信品質劣化量の評価について実例を交えて述べる。具体的には雑音を確率過程とみなす統計的雑音モデルと、雑音波形を時間の関数として決定論的に記述する時間領域雑音モデルを紹介し、通信品質への影響の評価方法について述べる。次に 2-2 節では、雑音レベルの規制に必要な電磁妨害波の許容値及び測定法について述べる。

### ■参考文献

- 1) CISPR16-1-1 ed. 3.0, “Specifications for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - part 1-1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Measuring apparatus,” International Special Committee on Radio Interference, June 2010.

## ■S4 群-1 編-2 章

### 2-1 電磁雑音による通信への妨害と評価法

(執筆者：松本 泰) [2010年12月 受領]

電磁雑音による通信品質の劣化量を理論解析や数値計算によって求める際には、雑音波形の性質をなんらかの簡単な数式で表現したモデル（雑音モデル）が必要になる。一般に雑音は不規則に変動しており、その波形を時間の関数として予測することは困難なことが多い。そこで雑音波形を、時間とともに変動するランダム変数として表すモデル（ここでは統計的雑音モデルと呼ぶ）を用いると便利である。一方、特定の電気・電子機器から放射される雑音においては、その発生機構に応じて雑音波形に規則性が見られる場合がある。このようなケースでは雑音波形を時間の関数として決定論的に記述したモデル（時間領域の雑音モデル）も有効である。通信品質の評価を目的とした具体的なモデルについて以下に述べる。

#### 2-1-1 統計的雑音モデルと通信への影響評価法

通信品質の評価のために用いられる統計的雑音モデルとして一般的なものは、加法性（所望の通信信号に線形加算によって重畳する）雑音の同位相成分と直交成分（所望通信信号の搬送波の位相を基準とする）の確率分布を定めたものである。なお雑音の包絡線振幅と位相の確率分布で規定する場合もある。雑音の周波数分布については、受信機帯域内で電力スペクトル密度が一定な雑音（白色雑音）の仮定が簡単のためしばしば用いられる。

##### (1) ガウス雑音モデル

統計的雑音モデルで最も基本的かつ代表的なものはガウス（Gauss）雑音モデルであり、雑音の同相・直交各成分を、それぞれ平均がゼロで分散の等しい独立なガウス分布で表現する。中央極限定理によると、電力が有限で統計分布が独立かつ同一なランダムな波形を多数加算すると、その統計分布はガウス分布に漸近する。このためガウス雑音モデルは非常に幅広く適用可能である。例えば無線受信機の内部雑音には通常、加法性白色ガウス雑音（AWGN: Additive White Gaussian Noise）モデルが適用できる。また人工雑音に対しても、非常に多数の独立な雑音源からの寄与が合成された場合にはガウス雑音モデルを適用するケースがある。

さらにガウス雑音モデルの利点として、理論解析が単純になる多くの便利な性質を備えていることが挙げられる。例えばガウス分布の統計的性質は平均と分散によって完全に規定される。複数のガウス雑音の線形和もまたガウス雑音であり、同様にガウス雑音を任意に帯域制限した結果もガウス雑音となる（同様の性質は他の雑音では一般的には成立しない）。このため、加法性白色ガウス雑音に対する通信品質の検討は、通信システムの性能評価の基本として数多くの文献で取り上げられている（様々な変調方式に対して例えば文献 1), 2)などに記載されている）。

ガウス雑音モデルでは雑音の同相成分  $x$  及び直交成分  $y$  それぞれの確率密度関数及び両者の結合確率密度関数は下記で表される。

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad P(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2 \cdot 1)$$

$$P(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(x^2 + y^2)}{2\sigma^2}\right) = P(x)P(y) \quad (2 \cdot 2)$$

ここで $\sigma^2$ は分散であり雑音電力に対応し、白色雑音の場合には雑音の電力スペクトル密度と受信機の帯域幅（雑音帯域幅）の積で与えられる。なお、加法性ガウス雑音に対するデジタル通信信号の BER は、ガウス分布の超過確率である下記の関数を用いて表現される場合が多い。

$$Q(x) \equiv \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (2 \cdot 3)$$

$$\operatorname{erfc}(x) \equiv \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty \exp(-t^2) dt = Q(\sqrt{2}x) \quad (2 \cdot 4)$$

一方、ガウス雑音の包絡線振幅  $r$  についても、確率密度分布  $P(r)$  と超過確率 (APD: amplitude probability distribution 振幅確率分布と呼ばれる) は、それぞれ以下のように簡単に表される。

$$P(r) = \frac{r}{\sigma} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2 \cdot 5)$$

$$\operatorname{APD}(r) = \int_r^\infty P(\lambda) d\lambda = \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2 \cdot 6)$$

## (2) 非ガウス性雑音モデル

ガウス雑音モデルは適用範囲が広く解析的にも便利であるが、実際にはガウス性とはみなせない雑音も数多く存在する。特に、限られた時間内に大きな振幅が発生するインパルス状の雑音の場合には、所望波受信電力の増加に対して BER の改善が少ない（エラーフロアと呼ぶ）現象が生ずるので問題になる。ここでは代表的な非ガウス性雑音モデルとして、ミドルトン (Middleton) の雑音モデルについて述べる。

ミドルトンは空間的、時間的にポアソン (Poisson) 分布に従ってランダムに発生するインパルス状の雑音が周囲から到来すると仮定して雑音モデルを導出した<sup>3)</sup>。ミドルトンの雑音モデルは、受信機に入力された単一のインパルス波形に対する受信系の帯域制限の影響に応じて、受信帯域制限に伴う波形の変形と振幅分布への影響が無視できるクラス A 雑音、帯域制限による波形変形の影響が生ずるクラス B 雑音、クラス A 雑音とクラス B 雑音の和であるクラス C 雑音に分類される。このうち、表現が簡潔なクラス A 雑音が最も頻繁に用いられる。クラス A 雑音モデルの同相・直交成分の結合確率密度関数は次式で与えられる。

$$P(x, y) = e^{-A} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{A^m}{m!(2\pi\sigma_m^2)} \exp\left(-\frac{(x^2 + y^2)}{2\sigma_m^2}\right), \quad \sigma_m^2 \equiv \sigma^2 \frac{m/A + \Gamma}{1 + \Gamma}. \quad (2 \cdot 7)$$

ここで $\sigma^2$ は雑音電力に相当し、 $\Gamma$ はガウス成分とインパルス成分の電力比である。 $A$ はインパルス指数 (impulsive index) と呼ばれ、パルスの平均時間長と平均パルス発生頻度の積である (繰返しパルスの duty 比に相当する)。このモデルは $\Gamma$ と $A$ を小さくすれば非常にインパ

ルス性の高い雑音となり、逆に  $A$  を 10 以上にすれば、ガウス雑音にほぼ一致する。

式 (2.7) の表現から、クラス A 雑音モデルは、ポアソン分布に従うランダムな整数  $m$  に伴って分散  $\sigma_m^2$  が変化するガウス雑音とみなすこともできる。このため式 (2.7) の確率密度関数は、異なる電力  $\sigma_m^2$  をもつガウス雑音の結合確率密度関数 (式 (2.2)) を、重み付け加算した形式になっている。ただしガウス雑音モデルとは異なり、クラス A 雑音モデルの同相・直交各成分は互いに独立ではない<sup>4)</sup>。同様にクラス A 雑音の同相成分  $x$  と包絡線振幅  $r$  の確率密度関数、さらに APD も、それぞれ式 (2.1)、式 (2.5)、式 (2.6) のポアソン分布による重み付け線形和の形式で表現される。図 2.1 にいくつかの  $\Gamma$ ,  $A$ ,  $\sigma^2$  に対するクラス A 雑音とガウス雑音の APD を比較して示す。インパルス指数  $A$  が 1 よりも小さい (すなわちインパルス性が高い) 場合には、図に見られるように APD 曲線に平坦な部分が現れるのが特徴である。

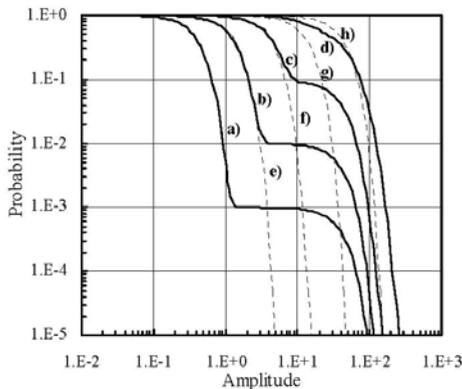


図 2.1 クラス A 雑音とガウス雑音の APD.

クラス A 雑音 (実線): a) ( $\Gamma=0.1, A=0.001, \sigma^2=1$ ), b) (0.1, 0.01, 10), c) (0.1, 0.1, 100), d) (0.1, 1, 1000).

ガウス雑音 (点線): e)  $\sigma^2=1$ , f)  $\sigma^2=10$ , g)  $\sigma^2=100$ , h)  $\sigma^2=1000$

### (3) 統計的雑音モデルを用いた通信品質劣化量の評価

統計的雑音モデルを用いたデジタル通信システムの通信品質評価法としては、モンテカルロ法による数値シミュレーションと、解析的な方法とに大別される。前者は計算機上で発生させた乱数を用いて雑音モデルに合った雑音信号を生成し、信号+雑音に対する復調動作を模擬して復調後の誤りビット数をカウントする方法が典型的である。今日では様々な機能をもつシミュレーションソフトウェアが入手可能であり、比較的簡単にシミュレーションを行うことが可能である。ただし非常に小さい誤り率を正確に評価するには、多数のシンボルの受信をシミュレーションする必要があり長い計算時間が必要になる。

これに対して解析的な方法は、復調器のビット判定ステージにおける雑音の確率密度分布の数式表現を導出し、ビット判定の論理が誤る確率を得る。得られた誤り率の数式表現を用いると、雑音の様々なパラメータの変化による通信品質への影響を検討できる。ただし、すべての場合に簡単な数式表現が得られるとは限らない。加法性ガウス雑音に対しては様々な

変調方式に対して厳密な BER の表現式が得られている<sup>1),2)</sup>。一方非ガウス性の雑音に対する BER の表現は複雑となる場合が多い。例えば参考文献 4), 5) ではそれぞれクラス A 雑音に対する PSK や QAM (Quadrature Amplitude Modulation) の誤り率が検討されている。

一方、非ガウス性雑音を含む任意の電磁雑音に対して、その APD から BER を近似的に求める方法が最近提案されている<sup>6),7)</sup>。この方法は、通信信号の最小信号間距離の 1/2 よりも雑音の包絡線振幅が小さければシンボル誤りは生じないことを利用して、最悪シンボル誤り率を雑音の APD から求める方法である。またシンボル誤り当たりの誤りビット数を 1 ビットに近似することにより BER は次式で表される。

$$P_{\max} = \text{APD}_R \left( \sqrt{\alpha} \beta U \right) \quad (2 \cdot 8)$$

ここで  $\text{APD}_R(r)$  は雑音の包絡線振幅  $r$  の APD、 $U$  は信号の rms 振幅、 $\beta$  は最小信号間距離の 1/2 を 1 ビット当たりのエネルギーで規格化した量である。また  $1/\alpha$  は 1 シンボル当たりの伝送ビット数である。代表的な変調方式に対する  $\alpha$  と  $\beta$  の値は参考文献 6) にリストされている。なお式 (2・8) の適用には、受信機が同期検波であること、同期に対する雑音の影響は無視できること、通信用の受信機と同一の受信帯域制限を行った雑音の APD を用いること、の条件が必要である。この方法によれば雑音の APD が解析的あるいは実験的に定められれば、与えられた変調方式と信号レベルに対して BER の近似値が求められる。逆に、ある通信システムで規定信号レベルにおける BER を一定値以下にするための APD の条件を定めることができる。以上のように APD はデジタル通信システムの保護のための雑音の規制に適しているため、CISPR (国際無線障害特別委員会) における電磁妨害波測定法として国際標準の一つに加えられている<sup>8)</sup>。

## ■参考文献

- 1) S. Stein and J.J. Jones, Modern Communication Principles, McGraw Hill, 1967.
- 2) J.G. Proakis, Digital Communications, McGraw Hill, 2001.
- 3) D. Middleton, "Statistical-physical models of electromagnetic interference," IEEE Trans. EMC, vol. 19, no. 3, pp. 106-127, Aug. 1977.
- 4) S. Miyamoto, M. Katayama, and N. Morinaga, "Performance analysis of QAM systems under class A impulsive noise," IEEE Trans. EMC, vol. 37, no. 2, pp. 260-267, May 1995.
- 5) A.D. Spaulding and D. Middleton, "Optimum reception in an impulsive interference environment - Part I: coherent detection," IEEE Trans. Commn., vol. 25, no. 9, pp. 910-923, Sept. 1977.
- 6) K. Wiklundh, "Relation between the amplitude probability distribution of an interfering signal and its impact on digital radio services," IEEE Trans. EMC, vol. 48, no. 3, pp. 537-544, Aug. 2006.
- 7) Y. Matsumoto, "On the relation between the amplitude probability distribution of a noise and bit error probability," IEEE Trans. EMC, vol. 49, no. 4, pp. 940-941, Nov. 2007.
- 8) CISPR16-1-1 ed. 2.1, "Specifications for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - part 1-1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Measuring apparatus," Nov. 2006.

## 2-1-2 時間領域の雑音モデルと通信への影響評価法

(執筆著者: 松本 泰) [2010年12月受領]

統計的雑音モデルは、一般に雑音の時間波形に関する情報をもたない。ガウス雑音は例外として、同一の雑音に異なる帯域制限を行うと、帯域制限後の雑音は異なる確率分布をもつ。したがって非ガウス性の雑音に対しては、通信用の受信機と同一の受信帯域制限を行った雑

音に対する統計的モデルが必要である。同様に、ある雑音の統計的雑音モデルは、異なる信号帯域幅をもつ通信システムの評価には使用できない。

一方、雑音発生源や雑音発生機構が特定されており、被干渉通信システムが特定されていない場合には、時間領域で雑音波形を模擬するモデルが有効である。時間領域の模擬雑音波形が得られれば、任意の受信フィルタ特性に対して帯域制限後の時間波形を得ることができ、また様々な通信システムに対して、平均及び最大の BER、誤り制御の効果、パケット誤り率などの性能評価が可能となる。

以下に時間領域雑音モデルの具体例を述べる。

### (1) 電子レンジ雑音の時間領域モデル<sup>1)</sup>

電子レンジ雑音はマグネトロンによって発生した電磁波の一部が筐体外に漏洩した結果生ずる。マグネトロンは、アノード・カソード間電圧が一定値を超えると発振が生じるが、電子レンジでは一般に平滑化していない電源を用いるため、マグネトロン駆動電源の周波数に同期した間欠発振となる。また、発振周波数もアノード電流に応じて変化するので、電源周波数に同期して発振周波数も変化する。市販されている電子レンジは電源部の構成により、トランス型とインバータ型に分類される。前者では、電源電圧を昇圧してそのままマグネトロンに印加するため、商用電源周波数に同期した発振となる。一方後者は、商用電源を 30～50 kHz でスイッチングし昇圧して印加している。このため、スイッチング周波数に同期した発振と周波数変化が現れる。これらの性質を考慮すると、図 2・2 に示すように AM と FM の組合せによって電子レンジ雑音を模擬した波形を発生できる。

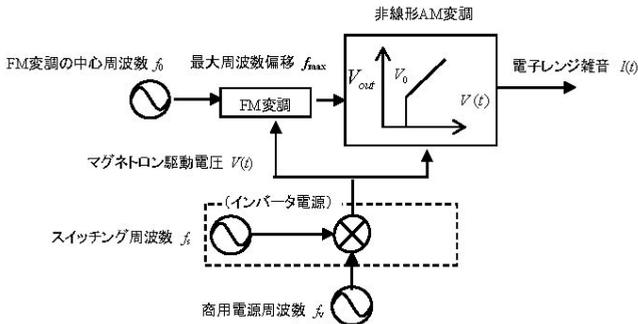


図 2・1 AM と FM の組合せによる電子レンジ雑音モデルの発生

この雑音モデルの時間波形は次式により表わされる。

$$I(t) = I_0 U[V(t)] \exp \left\{ 2\pi j \left[ f_0 t + f_{\max} \int_{-\infty}^t V(\xi) d\xi \right] \right\}, \quad U(V) \equiv \begin{cases} V & \text{for } V \geq V_0, \\ 0 & \text{for } V < V_0. \end{cases} \quad (2 \cdot 9)$$

ここで  $I_0$  は振幅と初期位相を含む定数、 $f_0$  は周波数変調波の中心周波数、 $V_0$  は規格化したマグネトロン発振閾値、 $f_{\max}$  は最大周波数偏移である。 $U$  は非線形 AM を表す関数である。

また、駆動電圧  $V(t)$  は商用電源周波数  $f_v$  とスイッチング周波数  $f_s$  を用いて下記のように表す。

$$V(t) = \begin{cases} \cos(2\pi f_v t) & \text{for transformer-type, (2a)} \\ \cos(2\pi f_v t) \cos(2\pi f_s t) & \text{for inverter-type I, (2b)} \\ |\cos(2\pi f_v t) \cos(2\pi f_s t)| & \text{for inverter-type II. (2c)} \end{cases}$$

式 (2a) はトランス型、式 (2b) はインバータ型の場合であり、式 (2c) はインバータ型において昇圧後に両波整流した機種に適用する。この雑音モデルによる無線システムに対する影響は、通信信号の 1 シンボル内での雑音の周波数変化がシンボルレートに対して小さければ、無変調干渉信号による影響と同等となり、雑音の周波数変化が速い場合にはインパルス状雑音による影響に類似する<sup>2)</sup>。また無線 LAN などパケットを用いて通信する無線システムでは、RF バースト状の干渉波をパケットと誤認識する結果、通信性能が劣化する場合もある。

## (2) 電子機器のクロック高調波雑音の時間領域モデル

パーソナルコンピュータ (PC) などの情報機器や家電製品の多くは、多機能化の実現のためにマイクロプロセッサを搭載しており、その動作周波数も年々上昇している。図 2・3 はノート PC からの放射雑音のスペクトルの例であり、数 GHz までの雑音が観測される。スペクトルには等周波数間隔のピークが見られ、内部クロックの高調波が支配的であることを示している。また、近年の電子機器では、電磁妨害波の適合性試験において上記のスペクトルのピークを低減するために、クロック周波数を意図的に周波数変調している場合が多い (スペクトラム拡散クロックと呼ばれる)。

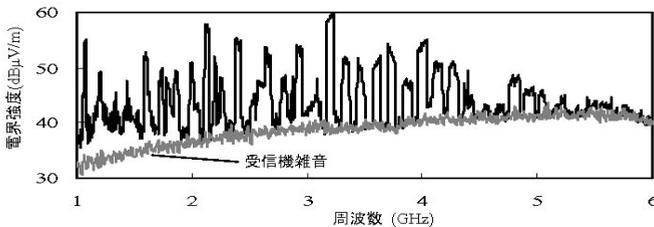


図 2・2 ノート PC からの放射雑音スペクトルの例。

測定距離 1 m, 分解能帯域幅 1 MHz, ダブルリジッドガイドホーンアンテナ使用

周波数変調を行わない場合、クロック信号による放射雑音  $u(t)$  は、基本周波数  $f_{CLK}$  とその高調波によるフーリエ級数で表わされる。

$$u(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n \exp(j2\pi n f_{CLK} t) \quad (2 \cdot 10)$$

クロック信号を変調信号  $V(t)$ 、規格化周波数偏移  $\delta$  で周波数変調すると、クロックの瞬間周波数  $f(t)$  は次式で与えられる。

$$f(t) = (1 + \delta V(t)) f_{CLK} \quad (2 \cdot 11)$$

周波数変調されたクロック信号による雑音  $u_d(t)$  は、式 (2・10)、(2・11) から次式のように FM 波の重ね合せでモデル化される。

$$u_d(t) \equiv u(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n \exp \left( j2\pi n f_{CLK} \left( t + \delta \int_{-\infty}^t V(\tau) d\tau \right) \right) \quad (2 \cdot 12)$$

規格化最大周波数偏移  $\delta$  は、PC では 1% 程度、OA 機器などでは 5% 程度までである。変調信号は周波数 30~50 kHz 程度であり、変調波形としては三角波や三角波を修正した波形が用いられる。PC 雑音の高調波の周波数変化の実測例を図 2・3 に示す。上記の PC クロック雑音モデルは周波数変調波の重ね合せであることから、個々の高調波による通信システムへの影響は前述の電子レンジ雑音との類似性が見られる。ただし図 2・2 のように各高調波が周波数領域で密に配列するので、UWB などの広帯域無線システムに対しては多数の周波数変調波が同時に干渉する点が特徴である<sup>3)</sup>。

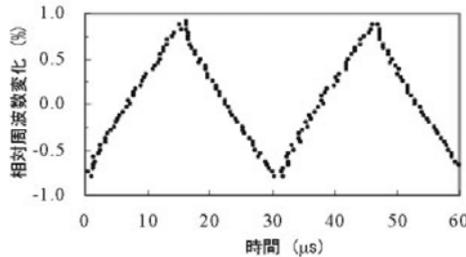


図 2・3 ノート PC のクロック高調波の瞬時周波数変動の例

### (3) 時間領域雑音モデルを用いた通信への影響の評価法

時間領域の雑音モデルを用いると、雑音の波形が時間の関数として得られる。このため受信フィルタ通過後の雑音波形や干渉雑音に対する検波出力を容易に得ることができる。ただし雑音モデルによる雑音波形に、受信機雑音（通常ガウス雑音であり、電力は受信系の雑音温度と等価雑音帯域幅から求められる）を加える必要がある。通信信号の 1 シンボル期間内で干渉雑音の振幅・周波数の変化が無視できる場合には、劣化量（ビット誤り率など）の瞬時値は無変調干渉波による劣化量によって近似でき（多くの変調方式に対して無変調干渉波によるビット誤り率の理論式が利用できる）、平均劣化量は瞬時劣化量の時間平均として求められる。また、誤り訂正符号化に対する影響やパケット誤り率などの評価も、雑音波形が時間の関数として求められるために比較的容易である。

なお、時間領域のモデルは、それを構成するパラメータを具体的に与えれば、雑音の時間波形が決定論的に求まるが、現実にはパラメータ自体が変動することも少なくないので注意が必要である。例えば上述の電子レンジ雑音では、雑音パラメータは負荷（調理庫内の食物）の量や位置、材質や温度に大きく依存するため、電子レンジの運転に伴ってパラメータ自体が時間変動する。したがって実際には雑音パラメータの変動範囲や変動速度も考慮して通信への影響を評価することが必要である。

**■参考文献**

- 1) Y. Matsumoto, M. Takeuchi, K. Fujii, A. Sugiura, and Y. Yamanaka, "A Time-Domain Microwave Oven Noise Model for the 2.4 GHz Band," IEEE Trans. EMC, vol. EMC-45, no. 3, pp. 561-566, 2003.
- 2) Y. Matsumoto, M. Takeuchi, K. Fujii, A. Sugiura, and Y. Yamanaka, "Performance Analysis of Interference Problems Involving DS-SS WLAN Systems and Microwave Ovens," IEEE Trans. EMC, vol.47, no.1, pp.45-53, Feb. 2005.
- 3) Y. Matsumoto, T. Murakami, K. Fujii, and A. Sugiura, "Impact of Electromagnetic Noise from PCs on Performance of Multiband-OFDM UWB Systems," IEEE Trans. Consumer Electronics, vol.56, no.2, pp.348-352, May 2010.

## ■S4 群- 1 編 - 2 章

### 2-2 電磁妨害波の許容値と測定法

(執筆者：石上 忍) [2016年8月 受領]

#### 2-2-1 電磁妨害波の許容値

電磁雑音は主に2種類に分類できる。一つは自然雑音、もう一つは人工雑音である。自然雑音は自然現象によって発生する電磁雑音であり、雷(空電)、静電気放電、宇宙からの電磁雑音、熱雑音などがある<sup>1)2)</sup>。一方、我々の身の回りにある電気・電子・通信機器、機械及びシステム、すなわち電気によって動作するものすべてが、レベルの大小はあれども電磁雑音を発生している。これらはすべて、人工雑音の発生源である。すなわち、情報処理装置(コンピュータ)、家電などのほか、自動車等に搭載されているスパークプラグの雑音や、電車におけるパンタグラフとの摺動による雑音、インバータ制御器の雑音など、様々な雑音源がある。さらに、電磁波を利用してその機能を達成する機器も存在する。IH調理器、電子レンジ、あるいは高周波ウェルダなどの高周波利用設備、また無線局の送信設備がその例である。

これら電磁雑音は、ほかの電気電子機器・システム、あるいは通信・放送に対し誤動作や受信障害等の影響を与える場合、電磁妨害波と呼ばれる。高周波利用設備からの漏えい電波や、無線局の不要放射(輻射)も場合によってはほかの機器・システムにとって影響を与えることもある。機器等より発生する電磁妨害波のレベルは、機器の設計や製作工程が同一であっても、**図2・4**のようにある確率分布をもってばらついている。一方、被害側の機器についても、障害を発生する外来の妨害波強度に個体差がある。妨害波の許容値を設定する場合は、許容値以下の妨害波レベルの製品の全体の製品数に対する割合を規定する必要がある。コミュニティの限度値についても、全体に対しどの程度が規定した許容値の妨害波を受けても障害を発生しないかを規定する必要がある。さらに妨害波の許容値及びコミュニティ限度値は、障害の程度と対策に必要な費用についても併せて考慮した値となる。これら許容値及び限度値は、国際的にはIEC<sup>1</sup>及びその特別委員会であるCISPR<sup>2</sup>で定め、IEC規格及びCISPR規格と呼ばれている。

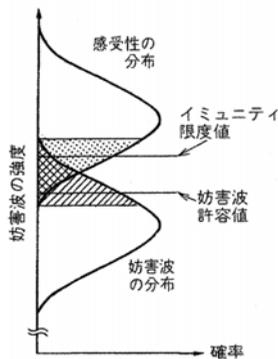


図2・4 妨害波と感受性レベル分布<sup>2)</sup>

<sup>1</sup> International Electrotechnical Commission, 国際電気標準会議

<sup>2</sup> Comité international spécial des perturbations radioélectriques, 国際無線障害特別委員会

機器・設備の電磁妨害波の許容値は、通信・放送システムに障害を及ぼさないように定められている。その際、妨害波の波形、スペクトル、伝搬特性、及び被害を受ける通信・放送システムの感受性を考慮する<sup>2)</sup>。また、機器・設備がどの『地域』に設置されているかによって、通信・放送に及ぼし得る妨害の度合いが異なる。一般には、機器の使用地域は、住宅地域とそれ以外の工業地域・商業地域に分類される。住宅地域では家屋が隣接しており、妨害波による隣家への放送受信障害が発生しやすいとされ、一方、工業・商業地域では付近に住宅が少なく、また機器・装置についても管理された区域に設置されているため、隣家への受信障害は起こりにくいと考えられる。ゆえに表 2・1 の例<sup>3)</sup>のように、機器の使用環境により許容値を設定し、主として住宅地域で使用する機器（クラス B）は、工業・商業地域で使用する機器（クラス A）より厳しい許容値を適用する。

表 2・1 1 GHz までの周波数における電磁妨害波許容値

項	周波数範囲 MHz	測定			許容値 dB (uV/m)
		設備 (表 A.1 参照)	距離 m	検波器種類/ 帯域幅	
クラス A	30~230	OATS/SAC	10	準尖頭値 / 120 kHz	40
	230~1 000				47
	30~230	OATS/SAC	3		50
	230~1 000				57
クラス B	30~230	OATS/SAC	10	準尖頭値 / 120 kHz	30
	230~1 000				37
	30~230	OATS/SAC	3		40
	230~1 000				47

## 2-2-2 電磁妨害波の測定法

各種の電子・電気機器などから発生する妨害波の許容値及び測定法を定めた EMC 国際規格は、CISPR において策定されている。電磁妨害波は、被害を受ける相手への伝わり方によって、2 種類に大別され、一つは伝導妨害波、もう一つは放射妨害波である。図 2・3 は電磁雑音の発生と分類を説明するため、例として一般家屋とその周囲の電磁雑音の様子を示したものである。例えば同図のパワーコンディショナが電磁雑音源であったとき、太陽電池パネルからの DC 電力を受けるための配線、あるいは電力計・分電盤を介し家屋内の AC 電源線を経由して、伝導妨害波が伝搬する。また LED 照明やパソコンなど、電気・電子機器から直接空間に電磁波が放射され、放射妨害波となりほかの機器に妨害を与える。

電気電子機器からの放射妨害波測定は、通常図 2・4 のような床面が金属の電波半無響室にて行われる。供試装置（放射妨害波の発生源）は、高さ 80 cm の非金属（木製または発泡スチロールなど）の台に載せられ、測定の間、回転台によって 360 度回転させられる。測定アンテナは、供試装置から 3 m または 10 m の位置において、1 m から 4 m まで高さを掃引し、周波数ごとに妨害波の最大値を記録する。また水平偏波及び垂直偏波の双方で測定を行う。測定用受信機は、スペクトラムアナライザ<sup>4)</sup>も使用可能であるが、通常は EMI レシーバと呼

ばれる，妨害波測定用に特化した受信機が用いられる。

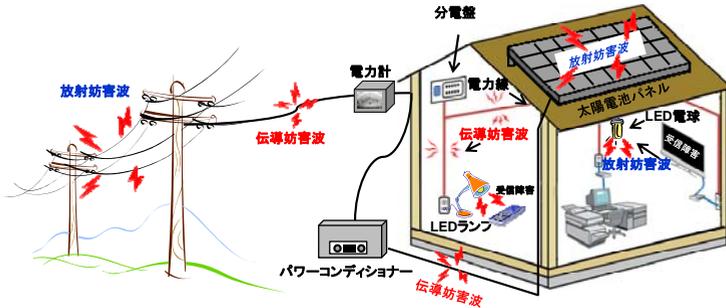


図 2・3 電磁妨害波の発生と分類

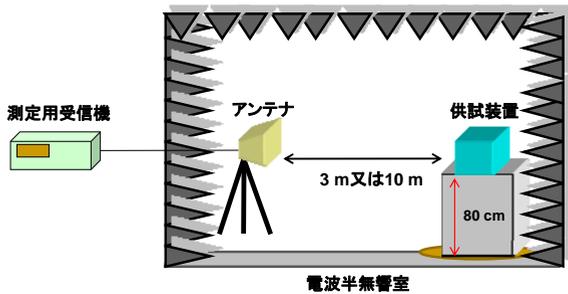


図 2・4 放射妨害波測定方法 (30 MHz~1 000 MHz)<sup>5)</sup>

また妨害波を受信するためのアンテナについては，周波数によって使い分けられる．30 MHz 未満は，通常は伝導妨害波測定のみが行われるが，放射妨害波測定を行う場合は通常直径 60 cm 程度のループアンテナを用いる．30~200 MHz (300 MHz) では，バイコニカルアンテナが用いられる．200 MHz (300 MHz) から 1 GHz までは，対数周期ダイポールアレイアンテナが使用される．1 GHz 以上では，通常ダブルリッジドウェーブガイドホーンアンテナが使用される．これらはいずれも広帯域アンテナである。

一方，伝導妨害波測定については，電源線の伝導妨害波測定には擬似電源回路網 (AMN: Artificial Mains Network)，通信線の伝導妨害波測定にはインピーダンス安定化回路網 (ISN: Impedance Stabilization networks) が使用される<sup>6)</sup>．いずれの回路網も，電源線あるいは通信線を伝搬している伝導妨害波を分離し，測定するものである．図 2・4 に，電源線の伝導妨害波測定の方法の一例を示す。

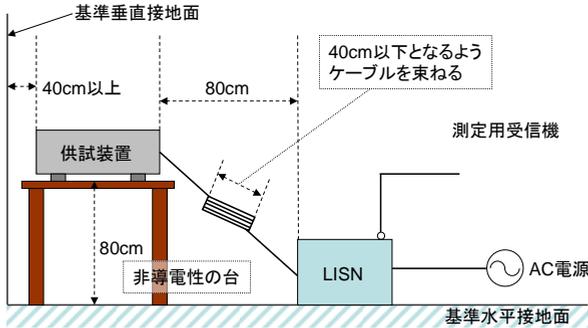


図 2・5 伝導妨害波測定方法の一例

### 2-2-3 電磁妨害波に関する国際規格の概要

電磁妨害波の国際規格は、SC77A (TC77 の小委員会) 及び CISPR の元で作成されている。妨害波の規格は、基本規格、共通規格、製品群・製品規格の 3 種類に分類される。基本規格は、電磁雑音の性質及び周波数に対応した試験方法などを定めた規格である。共通規格は、試験する機器は限定せず、使用環境（地域）別に試験レベルなどを定めた規格、製品群・製品規格は、共通の特徴をもつ製品別に試験レベルなどを定めた規格である。表 2・2 は、妨害波規格について、種類ごとに異なる所掌する組織を示したものである。製品群・製品規格では、試験法に関しては基本規格を参照している。同表において、”SC-”は小委員会を表しており、CISPR については表 2・3 のとおり 6 個の小委員会から構成されている。同表では C, E, G 各小委員会がないが、以前は C 小委員会（電力線）、E 小委員会（放送受信機）、G 小委員会（コンピュータなどの情報技術装置）も存在した。2001 年 6 月に C 小委員会は B 小委員会に吸収され、また E 小委員会と G 小委員会は I 小委員会に統合され、現在の姿になっている。A 小委員会と H 小委員会を除き、妨害電磁雑音を発生させる機器の種類ごとに小委員会が構成されている。各規格には、『有効期限』（Stability Date）が定められており、定期的にメンテナンス作業及び規格の改訂が行われる。

表 2・3 CISPR 小委員会と担務

A 小委員会	無線妨害波測定及び統計的手法
B 小委員会	工業、科学及び医療用高周波装置 (ISM 装置) からの妨害並びに電力線、高電圧及び電気鉄道からの妨害
D 小委員会	自動車及び内燃機関に関する妨害及び車載受信機の保護
F 小委員会	モーター及び接点装置を内蔵している機器、照明装置及び類似のものからの妨害並びにイミュニティ
H 小委員会	無線通信保護のための妨害波許容値
I 小委員会	マルチメディア機器等の妨害及びイミュニティ

表 2・2 妨害波規格の所掌組織と主な規格番号<sup>7)</sup>

規格の種類	電磁現象	所掌組織と主な規格番号
基本規格	低周波 (9kHz 以下)	<b>SC77A</b>
		IEC 61000-4-7 (電源高調波) IEC 61000-4-15 (電圧変動・フリッカ)
	高周波 (9kHz 超)	<b>CISPR/SC-A</b>
		CISPR 16-1-1 (妨害波試験器の仕様) CISPR 16-2-1 (伝導妨害波測定方法) CISPR 16-2-3 (放射妨害波測定方法)
共通規格	全周波数	<b>CISPR/SC-H</b>
		IEC 61000-6-3 (住宅・商業・軽工業) IEC 61000-6-4 (工業)
製品群・製品 規格	低周波 (9kHz 以下)	<b>SC77A</b>
		IEC 61000-3-2 (高調波電流エミッション限度値/16A 以下) IEC 61000-3-3 (電圧変動・フリッカ限度値/16A 以下)
		<b>CISPR/SC-B, D, F, I</b>
	高周波 (9kHz 超)	SC-B: CISPR 11 (ISM 装置) SC-D: CISPR 12 (自動車) SC-F: CISPR 14-1 (家電製品) SC-I: CISPR 32 (マルチメディア機器)
		<b>製品委員会 (TC17, TC18, TC22, TC62, TC65 等)</b>
	全周波数	SC17B: IEC 60947-2 (低圧開閉装置及び制御装置) TC18: IEC 60533 (船用電気設備及び電子機器) SC22H: IEC 62040-2 (無停電電源装置) SC62A: IEC 60601-1-2 (医用電気機器) SC65A: IEC 61326-1 (工業用プロセス計測制御)

### 2-2-4 低周波妨害波基本規格

低周波妨害波の測定法を示している基本規格は、IEC 規格では 61000-4 シリーズの中に分類される、このうち SC77A が所掌する規格を表 2.4 に示す。このうち、61000-4-7 は、50 Hz 及び 60 Hz の電力供給システムの基本波に重畳する 9 kHz 以下の周波数範囲内のスペクトル成分を測定することを目的とする計装について、61000-4-15 はフリッカメータの機能と使用について、61000-4-30 は 50 Hz または 60 Hz の基本周波数の AC 電源システム用電源品質パラメータの測定方法をそれぞれ規定している。

表 2・4 低周波妨害波基本規格

規格番号	規格名称
IEC 61000-4-7	高調波及び次数間高調波の測定方法及び計装に関する指針
IEC 61000-4-15	フリッカメータ機能及び設計仕様
IEC 61000-4-30	電力品質の測定法

## 2-2-5 高周波妨害波基本規格

CISPR SC-A が所掌する高周波妨害波測定基本規格のなかで、主なものを表 2・5 に示す。CISPR 16-1-1 は、測定用受信機の仕様及び、準尖頭値・ピーク値・平均値、実効値の各検波モード、APD 機能、ディスターバンスアナライザなどについて、CISPR 16-1-2 は、伝導妨害波測定用補助装置である擬似電源回路網、電流及び電圧プローブ、伝導イミュニティ測定用結合回路、信号線測定用結合装置、擬似手について、CISPR 16-1-3 は、妨害波電力測定用補助装置として吸収クランプについて、それぞれ仕様が規定されている。また CISPR 16-1-4 は、放射妨害波測定用アンテナ、30～1000 MHz 帯放射妨害波測定用サイト、全放射電力測定用反射箱、放射イミュニティ測定用 TEM セル、1～18GHz 帯放射妨害波測定用サイトなどについて規定されている。IEC 61000-4-20, 4-21, 及び 4-22 は CISPR SC-A と TC77 の小委員会である SC77B との合同作業部会によって制定された規格で、それぞれ TEM セル、反射箱及び全電波無響室を用いた放射妨害波測定及びイミュニティ試験について規定している。

表 2・5 高周波妨害波基本規格

規格番号	規格名称
CISPR 16-1-1	測定用受信機の仕様
CISPR 16-1-2	伝導妨害波測定用補助装置の仕様
CISPR 16-1-3	妨害波電力測定用補助装置の仕様
CISPR 16-1-4	放射妨害波測定用補助装置の仕様
CISPR 16-1-5	30 - 1 000 MHz のアンテナ校正用サイトの仕様と評価手順
CISPR 16-1-6	アンテナ校正法
CISPR 16-2-1	伝導線妨害波測定方法 (9kHz～30MHz)
CISPR 16-2-3	妨害波電力測定方法 (30～1000MHz, 吸収クランプ)
CISPR 16-2-3	放射妨害波測定方法
CISPR 16-4-2	測定装置の不確かさ
CISPR 17	妨害波低減フィルタの特性測定法
IEC 61000-4-20	TEM セル試験方法
IEC 61000-4-21	反射箱試験方法
IEC 61000-4-22	全電波無響室 (FAR) における試験

## 2-2-6 妨害波製品・製品群規格

表 2・6 は、妨害波に関する主な製品・製品群規格、及び所掌の小委員会を示している。CISPR 11 が取り扱う ISM 機器の中には、電子レンジ、電磁誘導加熱式調理器 (IH 調理器) などのほか、系統電力変換装置 (GCPC: Grid Connected Power Converter) なども含まれている。CISPR 12 における『非搭載機器』とは、車両に搭載しない携帯発電機などが該当する。一方 CISPR 25 は車両に搭載するすべての電気・電子部品及び機器を対象としている。CISPR 14-1 は、家電や電動ドリルなどの器具、CISPR 15 は、LED 照明を含む照明機器の妨害波測定法及び許容値を規定している。CISPR 32 は、元々音声及びテレビジョン放送受信機並びに関連機器の妨害波測定を規定している CISPR 13 と、情報技術機器 (ITE) の妨害波測定を規定している CISPR 22 の内容を併せ、いくつかの改訂事項を経てマルチメディア機器の妨害波測定と許容

値の規定として成立したものである。これにより、近年のスマートフォンなどに代表されるように、テレビジョン放送受信とコンピュータ（すなわち情報技術機器）が一筐体中に存在する機器に対して、どちらの製品規格で試験すべきかという問題に対応可能となった。この規格の成立に伴い、現行の CISPR 13 及び CISPR 22 は、平成 29 年 3 月 5 日をもって廃止となることが決定している。

**表 2・6 妨害波測定製品・製品群規格**

規格番号	規格名称	所掌
CISPR 11	工業用、科学用及び医療用機器（ISM 機器）	SC-B
CISPR 12	車両、ボート及び内燃機関（非搭載機器）	SC-D
CISPR 14-1	家庭用機器、電動工具および類似の器具	SC-F
CISPR 15	電気照明と類似機器	SC-F
CISPR 25	車載受信機保護のための妨害波許容値と測定法	SC-D
CISPR 32	マルチメディア機器	SC-I

#### ■参考文献

- 1) “電磁波の吸収と遮蔽（6.1 節）,” 日経技術図書, 1989 年.
- 2) 清水, 杉浦共著, “電磁妨害波の基本と対策,” コロナ社, 1995 年.
- 3) 総務省 電気通信技術審議会諮問第 3 号「国際無線障害特別委員会（CISPR）の諸規格について」のうち「マルチメディア機器の電磁両立性—エミッション要求条件—」答申, 2015 年 12 月.
- 4) CISPR 16-1-1, Ed.3.1, 2010.
- 5) 石上, “電波雑音,” 映像情報メディア学会誌, Vol.70, No.2, pp.313-319, 2016.
- 6) CISPR 16-1-2, Ed.2.0, 2014.
- 7) 佐藤利三郎監修, “EMC 電磁環境学ハンドブック資料編,” 2009.