電波雑音

石上 忍†

1. まえがき

「雑音」という言葉には「音」という単語が含まれている*1。しかしながらこれに「電波」という言葉が上に重なると、多くの場合、音として聞こえるものではなくなってしまふ。そればかりか、この「電波雑音」は人間の目にも見えないため、その実体を想像しにくい。

そもそも「電波」という用語は、我が国の電波法¹⁾第2条において「電波」とは、300万メガヘルツ以下の周波数の電磁波をいう。」と定義されている。本来であれば「電磁波雑音」という言葉を使いたいところであるが、Googleによれば、「電磁波雑音」の検索件数が約1,030件なのに対し、「電波雑音」は約13,600件であるので、少なくとも本稿のタイトルについては、善(?)等しければ衆に従うことにする。

さて、一口に電波雑音と言っても、能々調べるとその発生原因はさまざまであり、またそれらを測定する方法についても周波数や強度などによって異なる。さらに「雑音」と「信号」とは何を持って区別するのか、電磁環境と電磁両立性とは何か、といった疑問もある。本稿では、それらについて概説する。

2. 電波雑音の種類

2.1 自然雑音

電波雑音を大きく2種類に分けると、自然雑音と人工雑音がある。自然雑音は自然現象によって発生する電磁雑音であり、主に次のようなものがある²⁾³⁾。

(1) 雷(空電)

雲間空電、対地空電(落雷)によって電磁雑音が発生する。周波数帯域はLF(長波)からUHF(極超短波)に及ぶ。遠距離伝搬では、電離層の影響を受けほとんどHF(短波帯)のみとなる。

*1 英語の“noise”ももともとは「音」に対し用いられた言葉である。ご承知のように、電磁波が発見されてまだ100年ちょっとしか経過していないので…。

† 国立研究開発法人情報通信研究機構 電磁波計測研究所

"Radiowave Propagation Channel (2): Radio Noise (Electromagnetic noise)" by Shinobu Ishigami (National Institute of Information and Communications Technology, Tokyo)

(2) 静電気放電 (ESD*2)

帯電した物体(人体を含む)同士が接近することにより強電界が作られ、空気の絶縁破壊が起こり放電が発生する。この放電によってSHF(サブミリ波)にまで及ぶ電磁界が発生する。主に帯電が起こりやすい冬季に発生しやすい。

(3) 宇宙からの電磁雑音

この雑音は幾つかに分類できる。まず太陽の黒点活動に伴う電波雑音、また太陽そのものから放射される電波雑音、さらに銀河系からの電波雑音である。太陽黒点活動に伴う地球の電離層電子密度の増大による通信障害や、放送衛星における、太陽輻射の電波雑音による通信回線の雑音レベルの上昇などの現象が問題となっている。また銀河系内外に存在する中性子星や超新星爆発などに伴う電磁波も微弱ながら地球に到来する。

(4) 熱雑音

抵抗体内の自由電子の不規則な熱振動によって生ずる雑音であり、回路の動作限界を決定する要素の一つである。回路における入力等価雑音電力 N_i は次式で与えられる。

$$N_i = kT\Delta f \quad (1)$$

ただし k はボルツマン定数[J/K]、 T は回路の絶対温度[K]、 Δf は雑音(信号)の帯域幅[Hz]である。この雑音は絶対温度に比例しているので、雑音レベルを低減させるには、回路(抵抗体)を冷却すればよい。微弱な電波を扱う電波望遠鏡の増幅器などでは、液体窒素で回路を冷却することがある。

2.2 人工雑音

われわれの身の回りにある電気・電子・通信機器、機械およびシステム、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波(電磁)雑音が発生している。これらはすべて、人工雑音の発生源である。代表的な人工雑音の発生源を表1に記す。

2.3 ITU-R勧告における周回雑音

ITU-R*3では、電波雑音に関する勧告ITU-R P.372⁴⁾が発行されており、第1版が発行された1951年より計12回の

*2 ESD: Electrostatic Discharge.

*3 ITU-R: International Telecommunication Union Radiocommunications Sector. 国際電気通信連合無線通信部門。

表1 人工雑音の例

電力線	架空線	送電線からの低周波電磁誘導による雑音。送電線に誘導した電磁雑音等の伝導および再放射。
	コロナ放電	導体および碍子沿面のコロナ放電による雑音。
	火花放電	不良碍子等による火花放電の雑音。
輸送	自動車	内燃機関のスパークプラグからの雑音。電気自動車やハイブリッド車におけるインバータ雑音。
	航空機	内燃機関による雑音。
	電車	架線とパンタグラフとの摺動による雑音。離線時のコロナ放電、IGBT*1やGTO*2などのVVVF*3インバータ制御装置の雑音。
工業	高周波利用設備	高周波加熱装置 (IHクッキングヒータ、電子レンジなど) からの雑音。
	放電加工機	アーク溶接機、高周波ウェルダなどのからの放電雑音。
	電動機	整流子電動機の摺動接点からの雑音。交流サーボ制御用波形に起因する雑音。
	インバータ制御	サイリスタ等を用いたパルス変調による電源等の制御装置から発する雑音。
医用電子機器	加温機器	ハイパーサーミアなど加温治療機器からのISM帯の雑音。
	電気メス	高周波大電流による雑音。
	MRI	数テスラの強磁界強度。
放送・通信	放送通信機器	ラジオ・テレビなどの放送、各種通信、携帯電話、レーダなど、その信号を必要としない機器にとっては雑音となる。特に近年の放送・通信のデジタル放送・通信は通信帯域が広く、したがって雑音の帯域も広い。
	不要輻射	送信機などが完全に動作していないために生じる、高調波、過変調、寄生振動などの不要輻射。
	スペクトラム拡散	通信方式の他、コンピュータのクロックなどにも利用されているが、他の機器には雑音。
電子機器	ディジタル回路	クロック波形は矩形のため、スペクトルの広い雑音が放射される。近年は家電にもコンピュータが組込まれており、雑音源となっている。
	インピーダンス不整合	回路内の多重反射を引き起こし定在波による雑音を引き起こす。
	コモンモード雑音	通信路の不平衡などにより、コモンモード雑音を引き起こす。
核パルス	NEMP*4/HEMP*5	高高度または地表の核爆発による強力で広帯域な電磁パルス。

*1 Insulated Gate Bipolar Transistor.

*2 Gate Turn Off Thyristor.

*3 Variable Voltage Variable Frequency. 可変周波数可変電圧制御。

*4 Nuclear Electromagnetic Pulse. 核電磁界パルス。

*5 High-altitude Electromagnetic Pulse. 高高度電磁パルス。

改訂が行われている。同勧告では、0.1 Hz から 100 GHz までの、自然雑音および人工雑音の ambient な電磁雑音 (周囲雑音) について、さまざまな環境や地域においてそのレベルを観測し、統計処理を行った結果をまとめたグラフが掲載されている。図1に同勧告における 10 kHz ~ 100 MHz

までの雑音レベル、図2に 100 MHz ~ 100 GHz までの雑音レベルをそれぞれ示す。ただし同図において、縦軸は雑音指数で表現されており、定義は次式の通りである。

$$F_a = P_n - B - 10 \log (kT_0) = P_n - B - 204 \text{ [dB]} \quad (2)$$

ただし P_n は等価無損失アンテナによって測定される雑音電力 [dBW], T_0 は基準温度 (290 [K]), B は受信システムの雑音電力帯域幅 [dB (Hz)] である。受信アンテナとして垂直モノポールアンテナを使用したとき、この雑音指数を電界強度 E_n に換算する式は次のようになる。

$$E_n = F_a + 20 \log f_{\text{MHz}} + B - 95.5 \text{ [dB}\mu\text{V/m]} \quad (3)$$

ただし f_{MHz} は雑音の中心周波数 [MHz] である。

図1において、A は1時間ごとの中央値で時間率 0.5% を超える大気雑音 (自然雑音), B は時間率 99.5% を超える大気雑音, C は静かな環境における人工雑音, D は銀河雑音 (宇宙からの雑音), E は都市部の人工雑音である。また、図2の A は都市部の人工雑音, B は銀河雑音, C は銀河中心へ極めて鋭い指向性の受信アンテナを向けたときの銀河雑音, D は静穏太陽, E は大気の雑音 (図中の角度は仰角), F は黒体輻射 (宇宙背景放射: 2.7 K) である。

また、同勧告における周波数 300 kHz ~ 250 MHz の人工雑音レベルを示したグラフを図3に示す。なお本測定は 1970 年代に米国で測定されたデータである。

同図において、A は都市部, B は住宅地, C は郊外, D は静かな郊外, E は銀河雑音のそれぞれのレベル中央値の周波数特性を示している。予想通り、都市部の電波雑音が一番大きく、住宅地、郊外と人口の減る方向に進むにつれ雑音レベルが小さくなっていることがわかる。縦軸の雑音指数について、式 (3) を用いて電界強度に換算を試みると、仮に雑音の帯域幅 B が約 10 kHz、雑音の中心周波数が 10 MHz であったとき、雑音指数より 35.5 dB 減じた値が電界強度となる。例として、同図の A では 10 kHz で約 12.5 dB μ V/m となる。なお、このデータが取得されてからすでに 40 年以上が経過しており、その間の電子技術の進歩に伴うディジタル通信、インバータ雑音など広帯域の人工雑音が増え続けており、現在はこれらの値よりも全周波数帯域に亘り雑音レベルは上回っていることが予想される。

3. 電磁環境とは

3.1 EMC

電波雑音が、他の電気・電子機器や通信・放送に対し影響を及ぼさないのであれば、何ら問題になるものではないし、そもそも「雑音」とは呼ばれないであろう。しかしながら現実の人間社会では、自然雑音でさえも人間が作り上げた機器や通信システムに影響を及ぼしうる。

さて、英語圏ではこの問題を表現する用語として、EMC (ElectroMagnetic Compatibility) という述語が用いられる。日本語では「電磁両立性」という訳語に相当する。この電磁両立性の定義であるが、「周り (電子機器、無線通信など) に迷惑を掛けない (電磁妨害を与えない)、周りから迷惑を

図1 ITU-R勧告P372における雑音レベル (10 kHz～100 MHz)

図2 ITU-R勧告P372における雑音レベル (100 MHz～100 GHz)

蒙らない (電磁干渉を受けない)」ということがうまくいっている場合、「電磁両立性」が確保されているということに

なる。そういう意味では、「電磁両立性」というのは、人類が発展させてきた文明における自然とのコンフリクト、あ

図3 ITU-R勧告P372における人工雑音レベル (300 kHz～250 MHz)

るいは人類自身が作り出した技術の自己矛盾ともいえる。

図4⁵⁾は、電磁波の人体への影響も含めた電磁両立性を概念図にしたものである。一方、しばしばEMCを「電磁環境」という言葉で表現していることもある。これは「電磁両立性を達成すべき環境」と考えてよいであろう。またEMCを「環境電磁工学」という日本語として使用している場合は、「電磁両立性を達成するために必要な学問的アプローチ」という意味になる。我が国では、「電磁両立性」、「電磁環境」および「環境電磁工学」、この三つをしばしば区別せず、“EMC”という単語で表現してしまうことがあるので、多少の注意が必要である。

3.2 電磁雑音の発生

例えば、ある電子機器から発生する電磁雑音が、他の機器に妨害を与える可能性がある場合、その雑音は電磁妨害波と呼ばれる。図5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

図4 電磁両立性の概念図⁵⁾

図5 電磁雑音の発生と分類

したものである。電子機器への電磁妨害波は主に2種類に分けられる。一つは伝導妨害波であり、例えば、同図のパワーコンディショナー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、他の機器に妨害を与えるものを放射妨害波と呼ぶ。

逆に他の電気・電子機器または通信機器が、これら伝導・放射の各妨害波を受けるとき、その妨害波に耐えて誤動作を起こさない能力を電磁耐性（イミュニティ）という。

なお、ここでは伝導妨害波と放射妨害波は分けて説明したが、実際には伝導妨害波を伝搬している電源線等から放射が起こるため、測定においてこれらを厳密に区別することは困難である。

3.3 電磁雑音の帯域と波形

電磁雑音には、周波数スペクトルの広さによって、狭帯域雑音と広帯域雑音とに分類できる。狭帯域雑音は、その多くが、割当てられた周波数で行う無線通信の電磁波が、場合によって電気電子機器に対し雑音になってしまう場合である。一方広帯域雑音は、静電気放電などの放電現象、インバータからの雑音などの他、近年特に普及が目覚ましいデジタル放送・通信などからの電磁波が挙げられる。広帯域雑音は、放電などの場合、図6のようにインパルス性の波形である。また地上デジタル放送や携帯電話などデジタル通信の場合、バースト状の波形となっている。

熱雑音のように振幅がランダムで発生し、その確率分布が正規分布に従うようなものをガウス性雑音という。それに対し、通常の電磁雑音は、発生過程において確率分布が正規分布に従わないインパルス性雑音や、もともと意味のある通信信号として用いられているものが、他者にとって雑音となっているものが少なからず存在するので、必ずしもガウス性雑音とは限らない。しかしながら、非ガウス性の雑音であっても、それらが多数集まることで全体としては正規分布に近づく（中心極限定理）ものと考えられるので、

図6 インパルス性波形の例⁶⁾

あらゆる雑音が集合して形成されている図1や図2のような周囲雑音の場合には、その雑音は概ねガウス性とみなすことができる。

4. 電波雑音の測定方法

4.1 電磁波の測定

空間を伝搬している電磁波を測定するには、それが電波雑音であろうが無線通信であろうが、基本的には図7のように、電磁界センサ（またはアンテナ）によって電磁波を検出、電気信号に変換された信号を測定装置（受信機）で受信する方法が一般的である。極めて弱い無線通信のスプリアスや、宇宙から到来する微弱な電磁波を測定する場合には、同図におけるセンサ部として、パラボラアンテナなどの極めて利得の高いアンテナを使用することが多い。またランダムな雑音と、極めて微弱であるが意味のある信号とを分

図7 電磁波の測定

離するために、同じ到来方向からの電磁波をある一定時間測定し、それらについて積算し相関を求めるなどの信号処理を行う部分がプロセッサ部である。

測定装置については、電磁波の周波数スペクトルを調べたい場合はスペクトラムアナライザ、時間波形を観測したい場合には、オシロスコープが使用されることが一般的である。また電磁界センサまたはアンテナについては、電磁界の強度および周波数によって使い分けられる。測定装置およびアンテナの具体例については、次節で述べる。

4.2 EMC測定法

各種の電子・電気機器等から発生する妨害波の許容値および測定法を定めたEMC国際規格は、IEC^{*4}の特別委員会であるCISPR^{*5}において策定されている。CISPRは、表2の通り6の小委員会から構成されている。

同表からもわかるとおり、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。したがって、機器の種類によって妨害波測定方法に多少の違いはあるが、基本的な測定法はA小委員会で作成する規格(CISPR 16シリーズ)で規定され、放射妨害波の場合、概ね図8のような配置および設備で行われる。

電気電子機器からの放射妨害波測定は、通常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80cm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°回転させら

表2 CISPRの小委員会と担務

A小委員会	無線妨害波測定および統計的手法
B小委員会	工業、科学および医療用高周波装置(ISM装置)からの妨害ならびに電力線、高電圧および電気鉄道からの妨害
D小委員会	自動車および内燃機関に関する妨害および車載受信機の保護
F小委員会	モータおよび接点装置を内蔵している機器、照明装置およ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およびイミュニティ

図8 放射妨害波測定方法

*4 IEC: International Electrotechnical Commission:国際電気標準会議。

*5 CISPR: Comité International Spécial des Perturbations Radio électrique. 国際無線障害特別委員会。

れる。測定アンテナは、周波数ごとに1mから4mまで高さを掃引し、妨害波の最大値を記録する。また水平偏波およ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⁷⁾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。

また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 MHzから200 MHzないし300 MHzまででは、バイコニカルアンテナ(図9上)というアンテナが用いられる。200 MHzないし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(LPDA)が使用される(図9中)。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(DRGH)というアンテナ(図9下)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、伝導妨害波測定に際しては、アンテナの代わりに、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⁹⁾。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10に、電源線の伝導妨害波測定の方法の一例を示す。

図9 市販の放射妨害波測定用アンテナの例

図10 伝導妨害波測定方法の一例

5. 電磁環境の分類

IEC TC77（電磁両立性技術委員会）では、電磁環境の分類に関する技術報告書^{*6}としてIEC/TR 61000-2-5¹⁰⁾を作成している。本技術報告書によると、妨害を受ける電気・電子機器あるいは通信機器に対し、電磁妨害波が侵入するポートが存在するという概念を導入している。図11はその概念図である。それによると、機器は大別して5個のポートを持っており、Enclosure portはきょう体からの放射妨害波の侵入、AC power portはAC電源線からの伝導妨害波、DC power portは直流電源からの伝導妨害波、Signal/Control Portは通信制御線からの伝導妨害波、Earth portは接地線からの伝導妨害波をそれぞれ表している。すなわちこれら5つのポートからの妨害波に対し、機器は仕様で定められた電磁耐性を持たなければならないということである。

また同技術報告書では、妨害を与える電磁波の種類やレベルの大きさの程度が地域ごとに異なることを考慮し、Location type（地域タイプ）として、以下の3種類に大別し、実際の電磁環境は、これら三つの組合せと考えている。またこれらの地域に存在するであろう機器、装置、システムの例についても記述している。

- (1) Residential（住宅地域）
- (2) Commercial/Public（商業/公共地域）：オフィスビル、宗教施設、駐車場、駅など

図11 電磁妨害の侵入ポート

^{*6} TR: Technical Report. 強制力のある国際規格 (IS: International Standard) ではないが、他の基本規格、製品群規格等を作成する際の参考になるもの。

表3 電磁妨害の分類（一部を抜粋）

低周波伝導性妨害
<ul style="list-style-type: none"> 高調波 電圧振幅変動、電圧ディップ、短時間停電 コモンモード電圧 搬送信号電圧 低周波誘導電圧
低周波放射性妨害
<ul style="list-style-type: none"> 磁界 電界
高周波伝導性妨害
<ul style="list-style-type: none"> 伝導性連続波 (PLT) 誘導された伝導性連続波 単方向性過渡妨害 振動性過渡妨害
高周波放射性妨害
<ul style="list-style-type: none"> 放射性連続波 放射性変調波（携帯電話、携帯電話基地局、医療用テレメータ、免許不要無線局、ページャ、RFID、アマチュア無線、CBほか） 放射性パルス波
静電気放電 (ESD)

(3) Industrial（工業地域）

さらに、電磁妨害の種類として、表3のような分類がなされている。

6. むすび

本稿では、電磁/電波雑音について、その概念、および「電磁環境」の考え方、発生原因による分類、測定方法、IEC, CISPR, ITU-Rなどの国際規格や勧告などについて概説した。非常に雑駁な話で恐縮だが、読者に対し多少なりとも知識の助けになっているならば、幸甚の至りである。

(2015年12月27日受付)

〔文 献〕

- 1) 電波法、法律第三十一号（1950）
- 2) 電磁波の吸収と遮蔽（6.1節）、日経技術図書（1989）
- 3) 清水、杉浦共著、電磁妨害波の基本と対策、コロナ社（1995）
- 4) Recommendation ITU-R P372-12（2015）
- 5) <http://emc.nict.go.jp/general/general.html>
- 6) 石上：“インパルス性過渡電磁界の時間領域における測定技術”，静電気学会誌，39, 2, pp.65-70（2015）
- 7) CISPR 16-1-1, Ed.3.1（2010）
- 8) <http://www.ets-lindgren.co.jp/>
- 9) CISPR 16-1-2, Ed.2.0（2014）
- 10) IEC/TR 61000-2-5, Ed.2.0（2011）

石上 忍（いしがみ しのぶ）1992年、電気通信大学大学院電子工学専攻博士前期課程修了。同年、電気通信大学電気通信学部電子工学科助手。1999年、郵政省通信総合研究所（現（国研）情報通信研究機構）入所。現在、同機構電磁波計測研究所研究マネージャ。IEC ACEC（電磁両立性諮問委員会）、TC77（電磁両立性技術委員会）WG13、CISPR（国際無線障害特別委員会）A分科会各国際委員、博士（工学）。