電気加工ビギナーのためのリレー講義（その２）

－電磁ノイズと信号計測－

仁田周一*

Lecture for Beginners Studying Electrical Machining (2)

- Electromagnetic Noise and Signal Measurement -

Shuichi NITTA

１．身近にある電磁ノイズによる障害例

飛行機に乗るとまず電子機器の使用を制限するアナウンスがされる。バスや電車に乗ると携帯電話の使用は医療機器（ペースメーカ等）の動作に影響を与えるので優先席付近では電源をオフにして下さいとのアナウンスがある。これらの事象は電子機器から発生する不要電磁波（以下、電磁ノイズ→ノイズと略）が飛行機の計器や制御装置に干渉（いわゆるノイズがのる）し、その正常動作を妨害する、また、携帯電話が発生する電波を医療機器が受信して誤動作が発生する可能性があることを防ぐための措置であり、身近にあるノイズによる障害の一部の例である。

２．ノイズの発生原理

電磁現象の源は電流と電荷であり、電荷からは電気力線が湧き出す（ガウスの法則）。一方、電流と電束密度の時間変化（電荷が変化し電気力線が変化することによる電界の変化：変位電流）は、その周囲に磁界を発生させ（アンペールの法則）、そして磁界（ $B = \mu H$ 、 B ：磁束密度、 μ ：透磁率、 H ：磁界）の時間変化からその周囲

に電界が発生する（ファラデーの法則）。これらの現象が同時に繰り返され、その結果、界が電磁波動として伝播する。言い換えると、すべての電気・電子機器が電力を供給されて動作している以上、大小の差こそあれ、その機器の目的とする性能・機能とは関係のない不要なエネルギー、すなわちノイズを外部空間に放出していることになる。

一方、電流（変位電流を含む）が変化し、これによって発生した磁界が変化し、他の電気回路（ループを構成している）に鎖交すると、その回路に起電力が発生し、回路の機能に有効な電圧、電流以外の電圧、電流が回路上に発生、すなわち回路にノイズがのったことになる。以上が空間伝播ノイズの発生と他機器のノイズの受信の簡単な原理である。厳密性を欠くが、あらゆる電気・電子機器は実用上、他の機器の動作に支障を来すかどうかは別にして、空間へ電磁波を出す送信アンテナであり、また、機器が性能・機能に支障を来すかどうかは別にして、電磁波の受信アンテナである。以上のような空間伝播するノイズを放射性ノイズと言う。

次に、電流が流れる導線上で電流 i が変化すると、線上に不要な電圧 e （ノイズ）が発生する $|e| = -L (di/dt)$ 、 L ：線のインダクタンス。電流は流出した所へ帰る、すなわち電流ループを

* サレジオ工業高等専門学校 (Salesian Polytechnic)

〒167-0021 東京都町田市小山ヶ丘 4-6-8

図1 EMCの概念

構成 ($\phi = Li$, ϕ : 磁束, 電流と磁束の比例定数が L) するので, 線には必ずインダクタンスが存在する。例えば, 商用電源の負荷である電気・電子機器の消費電力が変化する(負荷変動)と, 変動の大小は別として商用電源上に電圧が発生する。この電圧により, その電源に接続された機器は誤動作する可能性がある。以上のような導線上を伝播するノイズを伝導性ノイズと言う。

上記は機器を単位としてノイズの発生/受信を述べたが, 機器の内部回路間で見ても放射性/伝導性ノイズの発生・伝播に伴う干渉が存在する。

3. EMC とは ?

EMC は Electromagnetic Compatibility の略で, 敢えて日本語に訳せば”電磁環境における両立性”²⁾とか”電磁環境の調和”となり, 広く電気ノイズ, 言葉を換えれば電氣的な干渉を扱う学問・技術分野として使われており, 我国では”環境電磁工学”と呼ばれている。両立性とは, 個々の人工機器システムが他に妨害を与えるような電磁エネルギーを放出することもなく, 同時に電磁環境から妨害を受けることもなく, 本来その機器/システムの目的とする機能を発揮できること, すなわち”ノイズを出さない”(EMI: Electromagnetic Interference: 電磁干

渉), ”ノイズの影響を受けない”(イミュニティ: Immunity, ノイズ耐性, あるいは Susceptibility: 感受性) という二つの事項を両立させねばならないところから生まれてきた要求のことを言っている。図1に EMC の概念を示す。図1における静電気放電は, 例えば帯電した人体が直接機器のきょう体に触れた時に流れる放電電流によるノイズや, この放電電流により発生した磁界によるノイズの他の機器への間接的な干渉を示しており, 重要なノイズ源である。図中の () 内は次節で述べるノイズ低減技術である。

なお, 電磁界の生体への影響 (Bioeffect) も EMC の一分野である。

4. 代表的なノイズ低減技術

ノイズが問題になるのは,

- 1) ノイズを出すものがあること (加害者)
- 2) ノイズの影響を受けるものがあること (被害者)
- 3) 上記の二つの間に伝導経路があること

の3つがある場合で, このうちの1つをなくせば問題が解決する。図2にノイズ対策の基本の概念を示す。ここで「ノイズ対策部品」とは, 電流をバイパスさせるキャパシタ C や電流の変化を抑制するインダクタンス L , この両者を合わせた LC フィルタ (高周波成分を抑制するローパ

図2 ノイズ対策の基本

図3 コモンモードノイズとノーマルモードノイズ

スフィルタ）等のことで、一般に導体伝導（伝導性ノイズ）を抑制する役割を持つ^{3),4)}。また、空間伝導（放射性ノイズ）には、回路や機器を金属で覆うシールドがノイズ低減技術となる。

なお、図2での導体伝導→空間伝導は、導体が発信アンテナとなって伝導性ノイズが放射性ノイズとして空間を伝播すること、逆に、空間伝導→導体伝導は、導体を受信アンテナとなって放射性ノイズが伝導性ノイズとして導体を伝播することを表している。

図1の（ ）内の接地は、安全のためと回路の基準電位を与えるためのものであり、絶縁・分離は加害者と被害者間の間隔を大きくとることや、絶縁トランスのように1次～2次巻線間の

浮遊容量や漏洩インダクタンスを小さくし、ノイズの伝播を抑制するものである。

ここでは主としてフィルタとシールドの原理について説明する。

(1) フィルタ⁵⁾

図3に示すように、フィルタはノイズが伝播する導体と機器/システムとの間に挿入され、機器/システムから導体へ、導体から機器/システムへの伝導性ノイズを抑制するものである。一般に信号は2本の線間の差動信号として伝送される。伝導性ノイズには図3に示すように2本の線に共通にのるコモンモードノイズ E_{CM} と、線間にのるノーマルモードノイズ E_{NM} がある。機器/システムの対グラウンドに対する不平衡イ

図4 商用電源線に挿入されるノイズフィルタの回路例

図5 コモンモードチョークの構造

ンピーダンスや、2 線の不平衡などにより E_{CM} は E_{NM} へ、あるいは E_{NM} は E_{CM} へ変換される。 E_{CM} が発生する原因の一つは、図 3 に示す商用電源線の接地点 A と機器／システムの接地点 B の間の接地電位差である。 E_{CM} の信号の計測精度への影響を避けるためにも、伝送には 2 本の線が使われる。

図 4 に商用電源線と機器／システム間に挿入される、LC で構成されるノイズフィルタの回路例とそれぞれの素子の役割を示す。ここでコモンモードチョークとは図 5 に示すように、実線で示すコモンモード電流に対しては、コア内の磁束が加算され、インピーダンスを大きくすることによってコモンモード電流を抑制し、ノーマルモード電流による磁束は上下の巻線から出る方向が互いに反対で打ち消されインピーダンスを小さくしている。これによって、例えばノ

ーマルモードである 50Hz/60Hz の電力を低損失で通過させ、所要の電力を機器／システムに供給できるようにしている。図 4 から判るように、ノイズ対策部品としてのインダクタンスは線に直列に、キャパシティは線間に挿入される。

ノイズフィルタは理想的には図 6 に示すようにローパス（低域通過）フィルタで、高周波ノイズを低減させる。

図6 ノイズフィルタの理想的特性

図7 ケーブルシールドの構成

なお、伝導性ノイズの抑制には非常に高い電圧を持つパルス状のノイズの波高値を抑制するためのサージアブソーバ（バリスタ、アレスタ等の呼び方もある）、フェライトを円筒状に整形したビーズ（インダクタンス）や、三端子キャパシタ、貫通キャパシタ、およびこれらを組み合わせたものが用いられている^{3), 4)}。

(2) シールド（遮蔽）⁶⁾

シールドは、導線や回路を導電性の材料で覆うことによって、放射性ノイズの伝播や侵入を抑制するノイズ低減技術で最も代表的なものである。我々がよく経験するトンネルへ入るとラジオが聴こえなくなるのも、土（導電性）でラジオが覆われて電波が届かなくなったため、一種のシールドである。

ここでは、導線のシールド（ケーブル・シールド）ときょう体によるシールドに分けて原理と有効性を簡単に説明する。

a. ケーブルシールド

図7に示すように、ケーブル（信号線）の回りを金属体で囲んだものをシールド線と呼ぶ。シールド線のシールド部は扱い易いように編組でできていることが多い。図7(a)に示すシールド部の信号源での一点接地は、シールド部が接地によって電位が零であると考えれば、外部から来る電気力線、また内部から外へ出る電気力線もシールド部で終り、前者によるシールド線内部の電界は零、また後者による電界はシールド

線外には出ない。すなわちシールド部の一点接地は電界（電圧性ノイズ）には抑制効果がある。また、2本の線で差動信号を伝送する場合、信号源の一点接地によりシールド部と信号線にのるコモンモードノイズの電圧分布が両者で同じになることから、コモンモードノイズによる信号線から大地（あるいはシールド部）への電流が少なくなり、コモンモードノイズがノーマルモードノイズに変換（CMRR: Common Mode

Rejection Ratio = $20 \log_{10} |E_{CM}/E_{NM}|$ ）され、

信号計測精度を低下させることがない。すなわち、CMRRを大きくし高精度の計測を可能にする利点がある。しかし、電流性ノイズ（あるいは磁界）に対してはシールド効果がない。

電流性ノイズに対しては図7(b)に示すように、シールド部の信号源と受信部の二点接地により信号線～大地間にできる磁界の鎖交面積を少なくすることで抑制することができる。ただし、この場合、シールド部と信号線のコモンモードノイズによる電圧分布が異なるので、CMRRが小さくなるという欠点があり、低周波磁界の抑制効果も少ない。

電流性ノイズの抑制には、図8に示す対撚線を用い、外部から来る磁界による線上の隣り合ったループでの起電力が逆方向になること、また、線から出る磁界が隣り合ったループで逆方向になることによる相殺効果により、電流性ノ

図8 対燃線のノイズ低減の概念

イズの抑制に用いられることが多い。

以上のことから、コモンモードノイズを小さくし、かつ CMRR を大きくして信号の計測精度を向上させる方式として図9に示すようにシールド部を二重にし、内部のシールド部を信号源で一点接地することによる CMRR の向上、外側のシールド部を信号源と受信端で二点接地することによる電流性ノイズの抑制、すなわちコモンモードノイズを抑制する二重シールド混合接地方式が提案され、発電プラントやギャップ放電によるノイズが極めて大きい大型変圧器の試験設備で使用されている。

b. きょう体によるシールド

ここでは金属板によるシールドの基本的な原理を説明する。

(i) シェルクノフの理論⁷⁾

電磁波に対するシールド効果は、シェルクノフの理論により式(1)のように反射と吸収によって得られる。ただし、この理論は無限の大きさを持つ金属板を前提にしており、定性的にシールドの原理を理解するには有効であるが、箱により6面を覆った実際のきょう体のシールド効果を定量的に算出できない。

図9 二重シールド混合接地方式

$$S = R + A + M(\text{dB}) \quad (1)$$

ただし、S：シールド効果 (dB)、R：反射損失 (dB)、A：吸収損失 (dB)、M：多重反射損失による補正項 (dB)。

式(1)に示す各項の説明に入る前に、電磁波の持つ特性の一つである波動インピーダンスを紹介する。

電磁波は電界 E と磁界 H が直交し、そのベクトル積 $E \times H$ の方向に進行する。このとき、式(2)で定義される波動インピーダンスをもつ。

$$Z_w = \frac{E}{H} \quad (2)$$

ただし、 E ：電界 (V/m)、 H ：磁界 (H/m)。波動インピーダンスは輻射源（ここではノイズ源）に近い場合、主として輻射源そのものの特性によって決定される。すなわち、ノイズ源が小電流、高電圧の場合は、電界が支配的でインピーダンスが高く、逆にノイズ源が大電流、低電圧の場合は磁界が支配的でインピーダンスは低い。このような領域を近傍電磁界という。

ノイズ源から遠ざかるに従って、電界が支配的な界のインピーダンスは低くなり（変位電流

図 10 反射損失の概念

による磁界の発生), 逆に磁界が支配的な界によるインピーダンスは大きくなり (ファラデーの法則による起電力の発生), ノイズ源からの距離が $\lambda/2\pi$ (λ : 電磁界の波長) 辺りで一定のインピーダンス ($120\pi \Omega$) となり, このインピーダンスをもって電磁界が進む. この領域を遠方電磁界 (自由空間) という.

〔反射損失: R〕

式(1)の反射損失は金属板の特性インピーダンス Z_s と電磁界の波動インピーダンス Z_w とのインピーダンス不整合により, 到来する電磁界を跳ね返すという原理に基いている.

図 10 に反射損失の概念を示す. 一般に, 金属板の特性インピーダンスは式(3)で表される.

$$Z_s (= Z_2) = 3.68 \times 10^{-7} \sqrt{\frac{\mu_r}{\sigma_r}} f \quad (\Omega) \quad (3)$$

ただし, μ_r : 比透磁率, σ_r : 比導電率, f : 電磁

界の周波数である.

反射係数は電界に対して $(Z_w - Z_s) / (Z_w + Z_s)$ であり, 磁界に対しては $(Z_s - Z_w) / (Z_w + Z_s)$ である. 先に述べたように, 近傍電磁界における電界の Z_w および遠方電磁界の Z_w は金属板の Z_s に比べて $Z_w \gg Z_s$ なので, 反射係数はほぼ 1 となり, 電界及び遠方電磁界は反射損失により 100% 近くシールドされる (電氣的に隙間がなければ). しかし, 近傍電磁界における磁界の Z_w は小さいので, 反射係数は小さくなりシールド効果は期待できない.

〔吸収損失: A〕

電磁界が媒質 (ここでは金属板) 内を伝播していく時, その振動は図 11 に示すように指数関数的に減衰していく. この減衰は金属内に誘起した電流によって抵抗損失を生じることによって. このような原理によって電磁界をシールドすることを吸収損失によるシールド効果と

図 11 吸収損失の概念

いい、式(4)、式(5)で表される。なお、吸収損失は電界と磁界の両方に対して同じように発生する。

$$E_1 = E_0 e^{-t/\delta} \quad (4)$$

$$H_1 = H_0 e^{-t/\delta} \quad (5)$$

ただし、

t : 金属板の厚さ

$E_0 (H_0)$: 到来電界 (磁界)

$E_1 (H_1)$: 金属板表面からの距離 t における
電界 (磁界)

$$\delta: \text{浸透の深さ} = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}$$

ω : 到来界の角周波数

μ : 金属体の透磁率

σ : 金属体の導電率

金属板の吸収損失によるシールド効果 A は式(6)で表される。

$$A = 8.69 \left(\frac{t}{\delta} \right) \quad (\text{dB}) \quad (6)$$

〔多重反射損失による補正項: M 〕

先に述べたように、電界は図 10 の境界面 I でほぼ 100% 反射されるが、磁界は反射が少ないので金属板に侵入する。この時、金属板が厚くて(厚さ t が浸透深さ δ と等しいか、それ以上)吸収損失が大きい場合は問題にならないが、金属板が薄い場合、吸収損失が小さく界は境界面 II で反射し、境界面 I に戻り、再び反射して境界面 II に到達することを繰り返す。これを多重反射と呼ぶ。吸収損失が小さく 10dB 以下では多重反射を無視できなくなり、金属板によるシールドが磁界を増幅したかのように逆の効果を表す。

ここで磁界に対する多重反射損失による補正項 M は式(7)で表わされ、例えば t/δ が 0.1 の場合 $M=14\text{dB}$ にもなり、シールドをしたことが逆効果になるので注意しなければならない。

$$M = 20 \log(1 - e^{-2t/\delta}) \quad (\text{dB}) \quad (7)$$

図 12 磁界に対するシールドの概念

(ii) 磁界に対するシールド

磁界に対するシールド効果は(1)で述べたように吸収損失には期待できないし、また、シエルクノフの理論だけでは説明できない。ここでは、直流／低周波磁界と高周波磁界に分けて磁界シールドの概念を説明する⁶⁾。

図 12(a)に示すように直流磁界と低周波磁界に対しては、フェライトやパーマロイのような高透磁率を持つ厚い材料で機器を囲むことによって、磁界が磁気抵抗の小さいシールド部を通過し、内部磁界 H_1 を小さくする方法である。この原理を適用して、CRT (TV モニター) の商用電源からの漏れ磁界による“ゆれ”をなくすために使われた例がある⁸⁾。

高周波磁界に対するシールドは図 12(b)にその概念を示すように、導電体へ磁界 H_0 が到来すると、その変化を妨げる方向にうず电流 i_1 , i_2 が流れ、この電流によって反対方向の磁界 H_1 が生じ、互いに打ち消し合うという原理によっている。この場合、磁界の変化によって生じる起電力(ファラデーの法則。この起電力がうず電流を流す源となる)は、周波数が高いほど大きくなるので、周波数が高いほどシールド効果は大きくなり、また、うず電流を流れやすく、反

対方向の磁界を大きくし、シールド効果を大きくするには、金属体の抵抗が小さいほどよい(例えば鉄よりアルミの方がシールド効果が大きい)。

5. ノイズ低減対策事例

ここでは劣悪な電磁環境(ノイズの大きい場所)でのノイズ低減対策事例を紹介する。

(1) 電子計測器による衝撃波電流の測定⁹⁾

ギャップ間の放電に伴うノイズは極めて大きい(例えば、リレー接点のような小ギャップ間の放電でも)。本事例では大型変圧器に対する落雷時の絶縁耐力を確認するためのインパルス試験時の衝撃波電流を市販されているメモリスコープによって測定する際のノイズ低減対策を紹介する。図 13, 図 14 に示す放電ギャップ間隔は大きいときで 1m もあり、そのときのピーク電圧と電流はそれぞれ数千 kV, 数十 kA に及ぶこともある。図の測定回路において、ギャップ g への配線は高さ 30m の天井を走り、その帰路は大地となっており、大きなループを構成しているので大きな放射ノイズが発生し、また、CRO (オシロスコープ) への供給電源線にも大きなノイズがのる。CRO は銅箔によって何重にも囲まれ、銅箔は接地され、電源は絶縁トランスを介して

U: インパルス発生器 CRO: メモリスコープ
g: ギャップ IT: 絶縁トランス
 R_0 : 放電抵抗 CT: 電流変成器

(a) 測定回路

(b) 測定結果

図 13 衝撃波電流の測定 I
(同軸ケーブル外被の一点接地)

(a) 測定回路

(b) 測定結果

図 14 衝撃波電流の測定 II

(銅パイプによる同軸ケーブルの遮蔽, 銅パイプを信号線と受端の 2 点で接地した場合の測定結果)

供給される。ここで高周波 CT も銅箔で覆われ、図 13 では同軸ケーブルの外被に、図 14 では銅パイプの外被をも覆い、また受信端では CRO を覆う銅箔同軸ケーブルあるいは銅パイプをも覆っている。ともかく、測定系は電気的な隙間のないように覆われている。

図 14 に示すように、同軸ケーブルを差動信号搬送用として使い、これを銅パイプの中に入れ、信号源、受信端で二点接地した時、良好な測定が行われている。

(2) 保護遮蔽付増幅器を利用したアナログ信号計測システム¹⁰⁾

図 15 は内部、外部、保護の三層遮蔽 (シールド) 層を持つ保護遮蔽増幅器を利用した多点のアナログ信号を計測するシステムで、シールド線のシールド部が保護遮蔽層に接続されている。コモンモード電圧の大きい環境下で使用される。

6. おわりに

以上、電磁ノイズの発生原理及び低減対策の

ADC : A-D 変換装置
 P : 信号のプラス端子
 N : 信号のマイナス端子
 E1~En : アナログ電圧信号
 Vcm1~Vcmn : コモンモードノイズ
 GS : 保護遮蔽 (Guard Shield)

図15 保護遮蔽付増幅器を利用したアナログ信号測定システム

ほんの一端について概説した。ノイズ発生、低減ともに、装置が複雑になるにつれて一筋縄ではいかない。実際のノイズ対策に臨む場合に備えてより深く突っ込まれる方は、次に示す参考文献及びその子文献等を参照していただきたい。

参考文献

- 1) 仁田編：環境電磁ノイズハンドブック（EMCハンドブック），朝倉書店，pp.1-4（1999）
- 2) 仁田：最近の電子機器と EMC，電子情報通信学会誌，Vol. 81, No. 6, pp.607-609（1998）
- 3) 坂本：デジタル回路基板のノイズ対策技術，'88 EMC・ノイズ対策技術シンポジウム，(6)・1-1～(6)・1-16.（1988）
- 4) 坂本：EMC 部品の最適な選択，'96 EMC・ノイズ対策技術シンポジウム，2-2-1～2-2-18.（1996）
- 5) 渋谷：フィルタリングの基礎と対策法，初めて学ぶ EMC 講座，ミマツデータシステム，第4編，第8章，pp.409-424（2000）
- 6) 仁田：シールドングの基礎と対策法(1)(2)，初めて学ぶ EMC 講座，ミマツデータシステム，第4編，第9章，第10章，pp.427-459（2000）.
- 7) シェルクノフ（森脇訳）：電磁波論，岩波書店，pp.321-331.（1958）
- 8) Nitta et al.: CRT Picture Vibration Caused by Low-Frequency Magnetic Field and Its Reduction Method, Proc. Society of Information Display, Vol. 29, No. 1, pp.7-11（1988）
- 9) 仁田：電子機器のノイズ対策法，オーム社，pp.123-131（1986）
- 10) 前花，仁田：保護遮蔽付絶縁増幅器の CMRR 過渡特性，電学論 C, 第115巻，第1号（1995）.

（2005年1月31日 受付）