

電気回路の「対称性と対称性の破れ」と言う新しい概念に基づくハイブリッド

電気回路理論：

電磁ノイズを制御してゼロにできる、「対称性の破れ」がない、「対称3線方式」の電気回路と電源の実践に成功

2021年8月4日

佐藤健次（満79歳のロートル（老頭児）、加速器物理学研究者）

物理学で重要な役割を演じる基本的な概念の1つに「対称性と対称性の破れ」がある。本稿では、電気回路でも重要な役割を演じる基本的な概念の1つに「対称性と対称性の破れ」があり、電磁ノイズの起源は「対称性の破れ」にあることについて考察する。

今から200年近く前に始まった電気回路では、この概念に思いが至らなかったために、現在もなお、電磁ノイズの起源の解明に悪戦苦闘しており、また、電磁ノイズの低減方法が確定せず、人類は電磁ノイズにまみれた世界に暮らし続けている。例えば、奇妙なことであるが、二酸化炭素による地球温暖化が突然始まったとされる1913年には、水力発電で得られた交流電力のための世界最初の長距離高圧送電線が敷設された。筆者には、地球温暖化と電気とは無関係とは思えないが、その一方で、電磁ノイズの評価は判然とせず、環境に影響を与えているとの議論はない。それどころか、暗黙の裡に、電気は安全とされているが、それを評価する電気回路理論は判然としていないのである。

ところで、本稿で紹介するように、電気回路の「対称性と対称性の破れ」の概念は、原理的には、マクスウェル方程式で理解できるものであったが、優秀な電気技術者や電気工学者さらには物理学者が続々と輩出したにもかかわらず、忘れ物があつたとも言えるかのように、電磁ノイズの解明が進まず、現在に至っている。筆者には、広く普及している配線の本数が2本の電気回路の「電気回路理論は間違っている」と断言する気はなく、従って、「ワインバーグ・科学の発見」の帯書きにあるように、「現代の基準で過去に裁定を下す」と言う気もない。それにしても、抽象的な概念の強力さに、ただただ、脱帽するばかりである。

スティーブン・ワインバーグ著、大栗博司解説、赤根洋子訳、「科学の発見」、文藝春秋、2016年6月5日第2刷発行

物理学での「対称性と対称性の破れ」と言うキャッチフレーズは、物理学に日ごろ慣れ親しむことの少ない人たちにも分かったような気にさせる平易な対義語であるが、実際には、簡単に理解できる中身ではないようである。大部のブルーボックス「サンプル・ヒッグス粒子の発見」は、「素粒子の質量の起源に関する機構の理論的発見」により、ヒッグ

スとアンダレールが 2013 年度ノーベル物理学賞を受賞したときの、受賞直前の LHC でのヒッグス粒子の発見までを記録している。

イアン・サンプル著、上原昌子訳、「ヒッグス粒子の発見 理論的予測と探求の全記録」、ブルーバックス B-1798、講談社、2013 年 10 月 21 日第 2 刷発行

この本の第 1 章や第 2 章は素粒子物理学の現代に至るまでの前史が、登場人物の業績とともに紹介されている。プロローグで、ヒッグス粒子の発見の『すべては「場の目覚め」から始まった』とあるように、前史としては、マックスウェルが場（電場と磁場：電磁場）の概念を提唱したことから解説されている。ヒッグスとアンダレールは、素粒子の質量の起源はヒッグス場の「自発的対称性の破れ」であることを解明したわけであるが、第 3 章で解説されているように、その研究の切っ掛けである「自発的対称性の破れ」の考えは南部陽一郎により提唱された。その功績により、南部陽一郎は、「素粒子物理学と核物理学における自発的対称性の破れの発見（1961 年）」により 2008 年度のノーベル物理学賞を受賞した。それと同時に、「クォークが自然界に少なくとも 3 世代（6 種類）以上存在する対称性の破れの起源の発見（1973 年）」により小林誠と益川敏英がノーベル物理学賞を受賞した。ここでは、南部陽一郎の発見についての解説は、本人によるブルーバックス「南部・クォーク（第 2 版）」に任せることにしたい。何故なら、筆者には、「自発的対称性の破れ」とは何かについて、自信をもって、解説できないからである。

南部陽一郎、「クォーク（第 2 版）素粒子物理はどこまで進んできたか」、ブルーバックス B-1205、講談社、2020 年 5 月 8 日第 12 刷発行

このように、「自発的対称性の破れ」と言う概念を理解することはなかなか手ごわいが、もう一人の受賞者の小林誠による「小林・対称性の破れとは」と題した受賞記念講演は分かりやすいかもしれない。

小林誠、「対称性の破れとは」、受賞記念講演、特集◆ノーベル賞に輝く〈自然科学への好奇心〉、学術の動向 2009.6 [tits_14_6_36 \(jst.go.jp\)](https://jst.go.jp/tits/14_6_36)

「対称性」と言う言葉ですぐ思い浮かべるのは図形の対称性であろう。「対称性がある」とときには、例えば、対称性の軸の周りに折り返すと言う操作をしたとき、「図形が変わらず同じ図形に戻る」場合である。このように図形の対称性は「ある変換をしてその図形が変わらない（不変である）とき、対称性がある」と言う。これに対して、物理学では、自然法則が対象で、自然法則に対して変換を行っても何も変わらないときには、その自然法則は対称性を持っていると言う。このとき、「対称性の破れ」には 2 つの異なる意味がある。1 つは、対称性が厳密に成り立っているかどうかという意味での「破れ」であり、もう一つは、その破れ方が小さい場合で、対称性が近似的な意味では残っている場合である。ところで、CP 対称性の破れが観測され、この対称性の破れは、当時知られていたクォークの数よりもたくさんのクォークが存在しなければならないことに、小林誠は益川敏英とともに気付いたとのことである。この研究がノーベル物理学賞の理由になった。

「小林・対称性の破れとは」を下敷きにして、本稿の指針を得たいと思う。本稿では、簡単のため、図形の対称性の例として三角形を考える。正三角形は対称軸が3本あって対称性が高く、正三角形は120°回転対称である。二等辺三角形の対称軸は1本のみで、二等辺三角形は対称軸に対して鏡映対称である。このように、二等辺三角形は対称ではあるもの、正三角形に比べて、対称性の破れがあるものと考えられる。さらに、一般の三角形には対称軸がなく、対称性が破れていると考えておこう。正三角形は厳密に対称性が成り立っており、二等辺三角形は対称性が近似的な意味では残っている場合と考えよう。

本稿では、電気回路でも「対称性と対称性の破れ」が重要な役割を演じる基本的な概念の1つであることを、「対称性の破れ」のない、「対称3線方式」の電気回路と電源を実際に製作し、電磁ノイズを制御してゼロにすることに成功した、筆者による「実践」に基づいて、論じる。なお、後程紹介するように、この電気回路と電源は、1994年に完成した重粒子線がん治療装置HIMACで採用され、所定の性能を実現できたこともあり、直ちに営業運転が開始された。

ここで書いたことに誤りはないのだが、この説明では、読者の皆さんの頭の中にすんなりと入り込んでくれないような気がするので、今少し、かみ砕いて分かりやすく説明してみたい。そうは言っても、これまでにない新しい概念であるだけに、言葉だけで説明することも簡単ではなく、かえって、皆さんを混乱させてしまうかもしれないが、よろしく、お付き合いのほどをお願いしておきたい。

まず、配線の数が3本の電気回路を思い浮かべよう。こんな話の出出しからして、変であると思われるに違いない。そんな電気回路は聞いたことも見たこともないと言われて、そっぽを向かれそうであるが、その一方で、3本の配線の幾何学的な配置には「対称性と対称性の破れ」が存在することには直ちに気付くことができるであろう。「対称性の破れ」がない配置は、3本の真っ直ぐな配線が平行に並んでいるときの、長さ方向に垂直な断面において、例えば、正三角形の頂点に、太さが同じ配線が3本設けられている場合である。この3本の配線は伝送線路として機能し、配線の間には電氣的影響と磁氣的影響が同時に働くが、正三角形で「対称性の破れ」がない場合には、これらの影響は相殺する。これに対して、対称軸のない一般的な三角形で、配線の太さが異なっていて、「対称性の破れ」がある場合には、これらの影響は相殺されず、電磁ノイズとして、ノーマルモードノイズとコモンモードノイズさらにはアンテナモードノイズの3種類のノイズが発生する。ただし、ノーマルモードノイズとコモンモードノイズは配線に沿って電磁場が伝搬するのに対して、アンテナモードノイズは電気回路を取り囲む空間即ち環境に電磁波を放射する。結局、3本の配線は「対称性の破れ」がある伝送線路になっていることになる。この分類に従えば、「対称性の破れ」がない場合には、コモンモードノイズとアンテナモードノイズは発生せず、ゼロになると考えられる。これからして、結局、電磁ノイズは3本の配線の間で起こる電磁現象であることになる。

この配線に対して、2端子集中定数回路素子の回路網を2つ設けるが、これまた、広く普及している配線の数2本の電気回路とは異なる配置である。3本の配線を、主配線1と主配線2の2本の主配線と呼び、3番目の配線を中線と呼ぶことにしよう。このとき、主配線1と中線の上に2端子集中定数回路素子の回路網を設け、主配線2と中線の上に2端子集中定数回路素子の回路網を設ける。この場合、3本の配線の幾何学的な配置に加えて、2つの2端子集中定数回路素子の回路網が同一であるか異なるかによって、「対称性と対称性の破れ」が決定されることになる。「対称性の破れ」が無いようにするためには、即ち、電磁ノイズをゼロにするためには、2端子集中定数回路素子の回路網で同じものを2つ設ける必要がある。同じ回路網を2つ設けるため、製作費用の点で、電気技術者や電気工学者には忌み嫌われるかもしれない。しかし、その逆の立場に立てば、何としても電磁ノイズをゼロにするためには、そんな電気回路に対しても、電気技術者や電気工学者は製作費用の低廉化に取り組むべきであると言えよう。

なお、3本の配線が正三角形の頂点になくても、中線に対して2本の主配線が二等辺三角形の頂点にあれば、「対称性の破れ」がない配置と考えられる。このとき、2本の主配線の太さは同じでなければならないが、中線の太さは主配線の太さと違っていても良さそうである。

こうして、電磁ノイズが制御できることになるが、本当にそんな電磁気現象が起こるのかなと疑いたくなるので、後程紹介するように、筆者は、重粒子線がん治療装置 HIMAC の建設に当たって、「対称性の破れ」のない「対称3線方式」の電気回路と電源を実際に製作して、「実践」によって、コモンモードノイズとアンテナモードノイズが制御されてゼロになることを示した。

ところで、3本の配線をツイストしてやると、これまた、「対称性の破れ」がない配置と考えられる。驚かれる読者もおられるかもしれないが、「ツイスト」は「対称性の破れ」を回復する操作と言うことになる。これも本稿の考え方の1つであり、そんな説明も初耳である読者も多いかと思うが、いずれにしても、配線の数3本である場合、「対称性と対称性の破れ」の議論を始めることができることに注意しておきたい。

ここで、いささか先走った話であるが、「ツイスト」と関連して説明しておきたいことがある。それは「ツイスト」できない導体は、「対称3線方式」の電気回路や電源には組み込めないで、そんな導体を、電磁ノイズを削減するために使用することは、筆者としては、お勧めできないということである。ツイストできない導体として大地（地球）がある。これまでは、こうした広がりのある導体は接地に適していると考え、グラ（ウ）ンドプレーンと呼んでいるようだが、筆者には不適切だと思える。こうした課題を克服するためには、グラ（ウ）ンドプレーンに代えて、中線と称する配線を加え、2端子集中定数回路素子の回路網を2つ対称に設けて、3本の配線をツイストし、その中線を1点で大地（地球）に接地することをお勧めしておきたい。ただし、誤解されたくないの一言、お断りしておきたいことがある。グラ（ウ）ンドプレーンを採用すると、電磁ノイズが大

きくなると言っている訳ではない。何かを行えば何かが変わるので、電磁ノイズが小さくなることもあるが、その延長線上には、電磁ノイズを制御してゼロにできるような飛躍はあり得ないと言っているだけのことである。

遅まきながら、ここで、2端子集中定数回路素子とは何物であるかを説明しておこう。自己インダクタンス、コンデンサー、および、抵抗の3種類あり、それぞれ、回路記号として、L、C、Rと表現される。これらの2端子集中定数回路素子では、キルヒホフの電流則（第1法則）とキルヒホフの電圧則（第2法則）が成立する。

ところで、2端子集中定数回路素子とは別に、4端子集中定数回路素子とも呼ぶことができるトランス（変圧器、変成器）を我々は知っている。トランスは相互インダクタンス（相互誘導係数）として回路記号Mで表現され、2端子集中定数回路素子の自己インダクタンスを2つ用いた回路素子である。即ち、1次巻き線コイルと2次巻き線コイルがあり、2つのコイルが相互インダクタンスを通して、2つのコイルに電圧なり電流なりをそれぞれ誘導する。このとき、1次巻き線の電流と2次巻き線の電流の間にはキルヒホフの電流則は適用されない。トランスの計算方法を学んで知っているだけに、ついつい忘れてしまいそうになるが、キルヒホフの電流則（第1法則）では、一次巻き線と二次巻き線の電流の関係を計算できない集中定数回路素子が存在しているのである。

事ここに至って、何かがおかしいと思い始めた読者もおられるかもしれない。コンデンサーには、自己コンデンサーとか相互コンデンサーとかの2種類のコンデンサーの概念はない。何故、電気と磁気でこんな差ができたのであろうか？そこで、筆者なりに、電気回路の歴史を振り返ってみることにした。

そもそもの電気回路の始まりは、「太田・マクスウェル理論の基礎」の第1章「cの発見」の「1.1 エルランゲンの街角で」の節にあるように、オームによる、1826年のオームの法則の発見にあったようである。「数学のたいまつは物理の中で輝き、その暗い場所を照らす」とオーム自身は言ったそうである。

太田浩一、「マクスウェル理論の基礎 相対論と電磁気学」、東京大学出版会、2002年7月5日初版

ファラデーは1831年に電磁誘導を発見し、ファラデーの法則と呼ばれるようになった。また、1837年にコンデンサーの精密測定を開始した。

太田浩一、「電磁気学I」、丸善物理学基礎コース、丸善、2000年10月20日発行

オーウェン・ギンガリッチ編集代表、コリン・A・ラッセル著、須田康子訳、「マイケル・ファラデー 科学をすべての人に」、オックスフォード・科学の肖像、大月書店、2007年12月14日第1刷発行

さて、オームの法則では電池の強さが登場するが、それは電位のことであることを明らかにしたのはキルヒホフであり、1845年、オームの法則をネットワークに拡張することによって、キルヒホフの電流則（第1法則）とキルヒホフの電圧則（第2法則）が成立することを提案した。

太田浩一、「マクスウェルの渦 アインシュタインの時計 現代物理学の源流」、東京大学出版会、2005年9月20日初版

ここで、ヘヴィサイドに登場してもらおう。「太田・マクスウェルの渦」に書かれているが、ヘヴィサイドは、もとは電信技師で、後には無職であったが、電場と磁場をベクトルとして定義し、マクスウェルの名前と呼ばれているが、マクスウェル自身は言葉でしか述べていない電磁場の微分方程式を、明示的に書き下ろした。その経緯と微分方程式は、「太田・電磁気学Ⅱ」の最終節「19.18 ヘヴィサイド方程式」に示されている。

太田浩一、「電磁気学Ⅱ」、丸善物理学基礎コース、丸善、2000年10月20日発行

この最終節から知られるのは、マクスウェル自身は独立な量として取り入れていた電磁ポテンシャル ϕ と \mathbf{A} を、ヘヴィサイドは排斥したことである。

また、ヘヴィサイドは、トムソン卿（後のケルビン卿）の海底ケーブルのモデルの過ちに気づき、伝送線路の電信方程式を提唱した。その最も簡明なモデルは、2本の配線があるとき、一方の配線は自己インダクタンスを持ち、2本の配線の間にはコンデンサーがあるとするものである。しかし、この伝送ケーブルは伝送損失が避けられないので、伝送途中にインダクタンスを挿入する装荷ケーブルを提案した。

ところで、マクスウェルは光の電磁波説を提唱した「電気磁気論考」を1873年に出版した。その電磁波を発生し検出したのはヘルツで1888年のことで、マクスウェルの死後のことであった。そのヘルツにヘヴィサイドは働きかけ、電磁ポテンシャルの排斥の賛意を得た。

さて、マクスウェルは「電気磁気論考」では、磁氣的現象に対しては、自己インダクタンスと相互インダクタンスの両方が登場する方程式を示し、また、電氣的現象に対しては、電位係数（自己電位係数と相互電位係数の両方を含む）が登場する方程式を示した。しかし、ファラデーのコンデンサーの測定に感銘を受けたのかして、孤立した2導体系であるコンデンサーのみに話を限定してしまった。この場合、コンデンサーは2端子集中定数回路素子となるので、キルヒホフの電流則（第一法則）が成立するものの、相互インダクタンスのようにキルヒホフの電流則（第1法則）では計算できない電気現象は不問に付した。

マクスウェルの「電気磁気論考」では、電位係数には自己電位係数と相互電位係数の2種類があることを断っていないが、その式を逆に解いた場合には、容量係数と誘導係数の2種類を定義してある。その説明は、「後藤・山崎：詳解電磁気学演習」の「第2章 静電界Ⅱ：真空中の導体系」に見られる。マクスウェルが「電気磁気論考」を著した当時、電磁気学どころか、電気回路が始まったばかりで、配線の本数を3本にして、電磁ノイズを制御してゼロにすることなど、多くの電気技術者や電気工学者さらには物理学者の天才たちの頭の端にもかすめることはなかったのであろう。

後藤憲一・山崎修一郎共編、「詳解電磁気学演習」、共立出版株式会社、1996年6月20日初版114刷発行

このように、マクスウェルの「電気磁気論考」には、キルヒホフの電流則（第1法則）では計算できない磁氣的影響と電氣的影響が取り扱われているものの、電気技術者や電気工学者さらには物理学者にはいつしか忘れ去られてしまったようである。

もっとも、上に述べた説明には、電氣的影響と磁氣的影響という言葉が登場したが、筆者の造語であるだけに、電気回路にとどまらず電磁気学を教え教えられている皆さんには全く馴染みがない言葉であるだろう。実際、「電氣的影響と磁氣的影響」で web 検索しても、その説明には出会えないので、この場を借りて、説明しておきたい。

ところがどっこい、その説明が簡単ではないので、土岐博と筆者の共著の解説を利用させて頂こう。

土岐博・佐藤健次、「アンテナ過程を含む交流回路理論と電磁ノイズの削減」、解説、日本物理学会誌 Vol.68, No.1, (2013) 11-18. [ja \(jst.go.jp\)](http://jst.go.jp)

この解説の 16 頁の右列の(31)式のスカラーポテンシャルとベクトルポテンシャルの式は、元々(17)と(18)の遅延ポテンシャルに、時間変化を交流として得られるものである。土岐博は、教科書や参考書に載っている遅延ポテンシャルを、交流のときの表式にまで発展させた。これまでにない素晴らしい発想である。配線の本数が 3 本するとき、ノーマルモードノイズとコモンモードノイズに加えてアンテナモードノイズが発生することが判明した。スカラーポテンシャルとベクトルポテンシャルの電磁ポテンシャルは電気回路理論に適用できることが判明したのである。

ここで脱線。マクスウェルは、電場と磁場を場の 1 つと考えると同時に、スカラーポテンシャルとベクトルポテンシャルを場の 1 つと考えたようである。しかし、スカラーポテンシャルとベクトルポテンシャルを計算するに当たって、ゲージには不定性があることが判明した。ゲージとして良く知られているのは、クーロンゲージとローレンス条件であるが、ゲージの選び方によって、スカラーポテンシャルとベクトルポテンシャルの形が異なるのである。ローレンス条件では遅延ポテンシャルが得られ、電磁波が空間を光速で伝搬する波動であることを示す物理的な現象を表わし、しかも、スカラーポテンシャルの源は真電荷体積密度であり、ベクトルポテンシャルの源は伝導電流面積密度になっている波動方程式が得られる。しかし、電場と磁場では、遅延ポテンシャルを議論できるまで、変形整理することは簡単ではない。

簡単ではないが、ここでは、電場と磁場に対する波動方程式を求めておこう。これまでの電磁気学の参考書や教科書で見かけたことがない計算である。言い換えれば、使い道のない方程式とでも言えば良いのであろう。

4 つのマクスウェル方程式。

$$\left\{ \begin{array}{l} \operatorname{div} \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{\epsilon_0} \rho(\mathbf{r}, t) \\ \operatorname{div} \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = 0 \\ \operatorname{rot} \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -\frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \\ \frac{1}{\mu_0} \operatorname{rot} \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{J}(\mathbf{r}, t) + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \end{array} \right.$$

計算

$$\frac{1}{\mu_0} \text{rot}\{\text{rot}\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)\} = \text{rot}\{\mathbf{J}(\mathbf{r}, t)\} + \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \{\text{rot}\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)\}$$

$$\text{公式} : \text{rot}(\text{rot}\mathbf{A}) = \text{grad}(\text{div}\mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}$$

$$\text{the left side} = \frac{1}{\mu_0} \text{rot}\{\text{rot}\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)\} = \frac{1}{\mu_0} \text{grad}\{\text{div}\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)\} - \frac{1}{\mu_0} \nabla^2 \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = -\frac{1}{\mu_0} \nabla^2 \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$$

$$\because \text{div}\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = 0$$

$$\text{the right side} = \text{rot}\{\mathbf{J}(\mathbf{r}, t)\} - \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2}$$

$$-\frac{1}{\mu_0} \nabla^2 \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) + \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = \text{rot}\{\mathbf{J}(\mathbf{r}, t)\}$$

$$\text{整理} : \nabla^2 \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = -\mu_0 \text{rot}\{\mathbf{J}(\mathbf{r}, t)\} \quad \because \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = c$$

計算

$$\text{rot}\{\text{rot}\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)\} = -\frac{\partial\{\text{rot}\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)\}}{\partial t}$$

$$\text{公式} : \text{rot}(\text{rot}\mathbf{A}) = \text{grad}(\text{div}\mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}$$

$$\text{the left side} = \text{grad}\{\text{div}\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)\} - \nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{\varepsilon_0} \text{grad}\rho(\mathbf{r}, t) - \nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$$

$$\text{the right side} = -\frac{\partial\{\text{rot}\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)\}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} \left\{ \mu_0 \mathbf{J}(\mathbf{r}, t) + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \right\} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{J}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2}$$

$$\frac{1}{\varepsilon_0} \text{grad}\rho(\mathbf{r}, t) - \nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{J}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = \frac{1}{\varepsilon_0} \text{grad}\rho(\mathbf{r}, t) + \mu_0 \frac{\partial \mathbf{J}(\mathbf{r}, t)}{\partial t}$$

まとめ

$$\begin{cases} \nabla^2 \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = -\mu_0 \text{rot}\{\mathbf{J}(\mathbf{r}, t)\} \\ \nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = \frac{1}{\varepsilon_0} \text{grad}\rho(\mathbf{r}, t) + \mu_0 \frac{\partial \mathbf{J}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \end{cases}$$

このようにして、磁場と電場に対して、波動方程式を得ることができる。しかし、右辺は、真電荷体積密度や伝導電流面積密度の項から成るとは言え、なかなか見かけない形をしている。

参考のため、スカラーポテンシャルとベクトルポテンシャルの電磁ポテンシャルに対する偏微分方程式を示しておこう。ただし、電磁ポテンシャルに対してはゲージ変換の任意

性があり、代表的なものに、クーロンゲージとローレンス条件があるが、ローレンス条件の場合には、次のような偏微分方程式が得られる。

$$\begin{cases} \nabla^2 \phi(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = -\frac{1}{\epsilon_0} \rho(\mathbf{r}, t) \\ \nabla^2 \mathbf{A}(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{A}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = -\mu_0 \mathbf{J}(\mathbf{r}, t) \end{cases}$$

電磁ポテンシャルに対する偏微分方程式には、先に得た電磁場に対する偏微分方程式と異なり、素直な説明が可能な気がする。場の理論では、場（スカラーポテンシャルとベクトルポテンシャル）と物質（真電荷体積密度と伝導電流面積密度）とが区別され、場の源は物質であるとする。電磁ポテンシャルに対する偏微分方程式の右辺の源の項は、真電荷体積密度と伝導電流面積密度がそのままの形で登場する。

これに対して、本稿で計算した電場と磁場に対する偏微分方程式の右辺の源の項は、真電荷体積密度と伝導電流面積密度がそのまま登場するのではなく、それが変形されたものになっている。このように波動方程式の形にまで整理すると、電場と磁場に対する波動方程式の源は素直に真電荷体積密度と伝導電流面積密度にはならない。しかし、通常の方では、4つあるマクスウェル方程式のそれぞれを解釈して、電場と磁場について語る方が良い。

とは言え、電磁気学の歴史があるため、4つのマクスウェル方程式も色々な解釈の下で命名されており、ここでは、比較的新しい参考書の「グリフィス・電磁気学 I、II」の命名を示しておこう。(1) (電場に関する) ガウスの法則、(2) 名前なし (昔は、磁場に関するガウスの法則と呼んだ)、(3) ファラデーの法則 (昔はファラデーの電磁誘導の法則と呼んだ)、(4) マクスウェルの修正を加えたアンペールの法則 (アンペール・マクスウェルの法則と呼ぶことが多い)、と呼んでいるが、それぞれの式の由来や起源を解明して来た。

D.J.グリフィス著、満田節生・坂田英明・二国徹郎・徳永英司訳、「グリフィス・電磁気学 I」、丸善出版、令和元年 12 月 10 日発行

D.J.グリフィス著、満田節生・坂田英明・二国徹郎・徳永英司訳、「グリフィス・電磁気学 II」、丸善出版、令和 2 年 12 月 20 日発行

ところで、スカラーポテンシャルとベクトルポテンシャルの電磁ポテンシャルの遅延ポテンシャルから真電荷体積密度や伝導電流面積密度で電場と磁場を表わすことができ、ジェフィメンコ方程式と呼ばれている。その式を見ると、磁場は伝導電流面積密度で定まるものの、電場は真電荷体積密度と伝導電流面積密度の両方で定まる。

「ジェフィメンコ方程式」、[ジェフィメンコ方程式 - Wikipedia](#)

ところで、電気回路を教え教えられる皆さんには、電場と磁場の電磁場の取り扱いには馴染みがあるものの、スカラーポテンシャルとベクトルポテンシャルの電磁ポテンシャルには馴染みがない。電磁場しか学ばないからであると言える。何故なのだろうか疑問を持ち始めていた筆者は、「 Ψ の暗殺」と呼ばれる出来事があったことを知った。

ロバート・P・クリース著、吉田三知世訳、「世界でもっとも美しい10の物理方程式」、日経BP社、2010年4月26日
1版1刷

この「クリース・美しい10の物理方程式」の「第6章十九世紀最大の出来事—マクスウェル方程式」の「第1歩—数学で表現された力」の節では、マクスウェルはトムソン（後のケルビン卿）からベクトルポテンシャルを学んだと書かれている。しかし、「オリヴァー・ヘヴィサイドと「マクスウェル方程式」」の節にあるように、独学で電気技師になり、「最後のアマチュア科学者」と称せられたヘヴィサイドは、静電ポテンシャル Ψ （プサイ）とベクトルポテンシャル \mathbf{A} を「形而上学的」で「数学的虚構」だとして非難し、これらのポテンシャルを「暗殺」しろと言う短い声明を発表した。その声明は、ヘルツが電磁波を人為的に発生させたことを発表した、1888年のバース（イングランド西部の天然温泉観光都市）での会合の直後に発表され、ヘルツの賛意も得た。ヘヴィサイドもヘルツも当時の電気技術の業界の大物であったためか、電気技術者や電気工学者の世界は電場と磁場即ち電磁場一色で塗りつぶされたようである。

しかし、最近ではスカラーポテンシャルとベクトルポテンシャルの電磁ポテンシャルこそが電磁気現象の表現できることに気付かれるようになってきている。後程、その例を解説したい。

閑話休題。ここで再び「土岐・佐藤：アンテナ過程」に話を戻そう。そこでは、配線の数が3本のときのスカラーポテンシャルとベクトルポテンシャルの電磁ポテンシャルが与えられている。

$$\begin{cases} V_i(x, t) = \sum_{j=1}^n P_{ij} Q_j(x, t) + \tilde{V}(x, t) \\ A_i(x, t) = \sum_{j=1}^n L_{ij} I_j(x, t) + \tilde{A}(x, t) \end{cases} \quad (31)$$

スカラーポテンシャル $V_i(x, t)$ とベクトルポテンシャル $A_i(x, t)$ は、電気回路の配線上の電位と電流との(32)の関係を満たすので、(33)の連立偏微分方程式を解けばよい。

この(31)式に登場したスカラーポテンシャルとベクトルポテンシャルの関係式を、それぞれ、電氣的影響および磁氣的影響と呼んでいる。また、係数 P_{ij} は電位係数と呼ばれ、係数 L_{ij} は誘導係数と呼ばれているが、静電気と定常電流のときの係数の交流のときの拡張版である。

砂川重信、「理論電磁気学 第3版」、紀伊國屋書店、2020年6月11日第20刷発行

この「砂川：理論電磁気学・第3版」では、102頁に、静電気のときの電位係数が与えられており、142頁に、定常電流のときの誘導係数が与えられている。「土岐・佐藤：アンテナ過程」では、そのときの誘導係数は(9)式で与えられており、電位係数は(11)式で与えられている。両者は同形の数式であり、真空の誘電率を ϵ_0 とし、透磁率を μ_0 とすると、電位係数と誘導係数の割り算や掛け算の値は、電磁波の伝搬速度と真空の特性インピーダンスと知られ、

$$\sqrt{\frac{P_{ij}}{L_{ij}}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = c$$

$$\sqrt{P_{ij} L_{ij}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \Omega$$

となる。このことは、電氣的影響と磁氣的影響とは独立に切り離して議論できないことを意味している。これに対して、我々は、普段、配線の本数が2本の2端子集中定数回路素子の回路網に慣れ親しんでいるためか、2種類の影響があることを忘れがちである。例えば、配線の本数が2本の電気回路に加えて大地（地球）の影響を取り入れるときには、コンデンサーのみを描くが、それでは不十分で、磁氣的影響を考慮しなければならない。そうは言っても、磁氣的影響を電気回路図に表現する方法が判然としないので、打つ手がなくなり、実際の電気回路でも電磁ノイズを減らす方法を思い当たらず、途方に暮れているばかりである。このとき、配線の本数を3本にすることなど、思い浮かべることさえできない。

土岐博は、この論文で示したように、静場のときだけでなく、動場のときにも、同様の数式を得た。そのとき、遅延ポテンシャルを取り扱い、静電気や定常電流の場合にはなかった、(31)の右辺の第2項にある $\vec{V}(x, t)$ と $\vec{A}(x, t)$ を得た。これらの式は(25)のように、純虚数の係数を持つが、このことは、電位係数や誘導係数に従って変化する電位や電流とは位相が90度異なることを意味している。即ち、電気回路の電磁場エネルギーが減少してゆくことを表現しており、言い換えれば、電磁波の放射が起こることを示している。これまで、このような電気回路理論との関係で電磁波の放射現象が語られたことがないだけに、素晴らしい表現が得られたものである。

この表現では、一般的には、電氣的影響は自己電位係数と相互電位係数から成る電位係数で表現され、磁氣的影響は自己誘導係数（自己インダクタンス）と相互誘導係数（相互インダクタンス）から成る誘導係数で表現される。このとき、驚くほどのことではないかもしれないが、電位係数と誘導係数との間には特殊な関係が成り立つ。誘導係数を電位係数で割り算したときの商の平方根は光速（ $c=3 \times 10^8 \text{m/s}$ ）となり、また、電位係数と誘導係数を掛け算したときの積の平方根の逆数は真空のインピーダンス（ $Z_0=377 \Omega$ ）になる。このことからして、電気回路を検討するに当たって、電氣的影響のみを考えたり、磁氣的影響のみを考えたりすることは、許されないことになる。しかし、やってしまいがちであり、その一方で、うまい表現を思い付かないので、最後は諦めているのが現状であろう。

ところが、広く普及している配線の本数が2本の2端子集中定数回路素子の回路網の理論はこの考えとは異なり、電氣的影響にはコンデンサーが採用されている。

$$V = \frac{Q}{C}$$

(ただし、 V は電位差、 Q は2つの電極のそれぞれの電気量、 C はコンデンサー)

この場合、導体の数が3つ以上になると、自己電位係数と相互誘導係数から成る電位係数が正しい物理量になるので、コンデンサーは不適切な物理量になる。しかし、これまで、配線の数が3本になる場合は想定されたことがなく、従って、誰一人として、電位係数を使用した電気回路理論を検討した経験がないようである。そのため、どんな場合でもコンデンサーを使用してきたきらいがある。繰り返しになってくどいようであるが、孤立した2つの導体の間の電气的影響であるコンデンサーを知ったばかりに、導体の数が3つ以上になっても、電气的影響をコンデンサーで考える悪い癖がついてしまっているのである。このときの問題は、先にも述べたが、磁气的影響を電気回路に取り入れる等価回路が描けないことである。さらに言えば、コンデンサーのみを描くと、ノイズの大きさを減らすために、静電容量の値を小さくしたくなるが、そのとき、磁气的影響が大きくなり、良い結果は得られないのである。この説明が分かりにくい可能性もあるので、少しかみ砕いて説明しておきたい。簡単に言えば、電位係数はコンデンサーの逆数のようなものである。誘導係数と電位係数を割り算した商の平方根は光速度で一定であるから、コンデンサーが小さくなると、即ち、電位係数が大きくなると、誘導係数も大きくなり、従って、磁气的影響が大きくなる。この関係が無視された議論が横行している。

2つの導体の孤立系でコンデンサーが定義されることを論じたが、コンデンサーに関連して、様々な観点から、議論は多い。例えば、コンデンサーでは、2つの導体の間では変位電流が流れるとされ、その変位電流が交流電流になっていると考えられている。我々は、この性質を利用して、配線の数が2本の2端子集中定数回路素子の回路網では、コンデンサーの有用性に頼って、現代の科学技術を発展させてきた。そのため、コンデンサーの動作に疑いを持つ説明は少ない。

しかし、この変位電流に関する問題は、例えば、「変位電流は磁場をつくるか／つくらないか」が判然としていないことが挙げられる。「変位電流は磁場をつくらぬ」と言うことになると、変位電流そのものは存在しない物理量と思えるので、頼るものがなくなってしまう。何を問題にしているかについて、簡単に示そう。マクスウェル方程式の1つに、アンペール・マクスウェルの法則がある。マクスウェルは右辺に変位電流の項を加えて、変位電流も磁場をつくると考えた。

$$\frac{1}{\mu_0} \operatorname{rot} \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{J}(\mathbf{r}, t) + \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t}$$

この法則の限りでは、コンデンサーを形成する2つの導体の間の間隙では、右辺の第1項はゼロであるので、右辺の第2項が右辺の第1項より大きいので、間隙では「変位電流は磁場をつくる」と言えそうである。

しかし、この式の右辺にある変位電流の項を左辺に移項して

$$\frac{1}{\mu_0} \operatorname{rot} \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) - \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = \mathbf{J}(\mathbf{r}, t)$$

と書くと、左辺の磁場と電場の偏微分方程式が右辺の伝導電流面積密度を源にして、発生するとも解釈できる。そのとき、コンデンサーの2つの導体の間隙では伝導電流面積密度がゼロになっているので、右辺はゼロになり、ここでの議論は破産するように見える。何だか不思議な議論になってきたが、こう言う議論の進め方自体が変であるらしい。その理由として、この式は4つあるマクスウェル方程式の1つであり、4つ全体を一挙に解いて解を知る必要がありそうなのに、この式単体で議論するからであるらしい。

そう言うことを了解すると、4つのマクスウェル方程式を同時に解くと、とんでもないことが起こるのである。しかし、とんでもない現象と言う訳でもなく、正しい電磁気現象で、遅延現象と呼ばれる。光は電磁波の1種であり、電磁波が真空中を伝搬する速さは30万 km/s ($3 \times 10^8 \text{m/s}$)である。伝導電流面積密度が、交流電流として、時間変化すると、電磁波が放射される。即ち、電場と磁場が時間的に振動しながら空間を伝搬してゆくのである。そうすると、伝導電流面積密度がゼロの空間においても、電場と磁場が存在できるのである。最も分かりやすい例は、超新星の爆発かもしれない。

「超新星爆発ニュートリノ検出から30年を迎えました」、スーパーカミオカンデ公式ホームページ、2017年2月23日
[スーパーカミオカンデ 公式ホームページ \(u-tokyo.ac.jp\)](http://u-tokyo.ac.jp)

この報告にもあるように、1987年2月23日、地球から距離にして16万光年離れた大マゼラン星雲で超新星爆発が起こった。超新星爆発が起こるのは400年ぶりのことで、小柴昌俊が建設したカミオカンデは、超新星爆発で発生したニュートリノを11個検出した。ニュートリノ質量はゼロに近いので、光の速度に近い速度で宇宙を進んできた。もちろん、光でも超新星爆発は観測された。光は電磁波であることはマクスウェルが論じたところであり、16万年前、16万光年離れたところから宇宙に放たれて伝搬して来た電磁波が1987年に電場と磁場として観測されたのである。このように、発生したところより離れた場所では、電場と磁場は発生した日時よりも時間的に遅れて観測されることになる。即ち、遅延現象が起こるのである。この遅延現象は、光即ち電磁波の速度は有限であることから生じている。

話を元に戻そう。コンデンサーの電極の間隙で観測される電場や磁場は、その電極につながっている配線を通る電流の遅延現象として発生しているので、間隙に流れる伝導電流面積密度が存在しなくても良いわけである。例えば、コンデンサーの配線から電極の間隙までの距離を3mmとすると、電極間隙での電場と磁場の变化は、配線を通る電流よりも $3\text{mm}/(3 \times 10^8 \text{m/s}) = 10 \times 10^{-12} \text{s} = 10 \text{ps}$ (ピコ秒)遅れる。50Hzの交流とすると1周期は20msであるから、 $10 \text{ps} \times (360^\circ / 20 \text{ms}) = 1.8 \times 10^{-7}^\circ$ の位相のずれとなる。この程度の遅延であれば、遅延がないと考えるのも悪くない近似でありモデルである。従って、この近似やモデルの限りでは、配線を通る伝導電流面積密度がコンデンサーの電極間隙の電場と磁場を発生させるのではなく、「変位電流が磁場をつくる」と考えても良さそうである。繰り返すようになってくどいようであるが、遅延現象であれば、真電荷体積密度や伝導電流面積密度が電場や磁場をつくり、その遅延した電場や磁場を観測していることになり、「変位電

流は磁場をつくらない」と考えられる。しかし、その遅延時間が極端に短い場合には、「変位電流は磁場をつくる」という近似やモデルも悪くないことになっている。

「変位電流は磁場をつくる」という近似やモデルをそのまま受け入れることにすれば、従って、共通の時刻でアンペール・マクスウェルの法則が成立すると考えれば、2端子集中定数回路素子の回路網の素子の1つとしてコンデンサーを受け入れることができる。その結果、2端子集中定数回路素子の回路網は電気回路として実現できると考えることができる。この簡明さに頼って、広く普及している配線の数が2本の電気回路網を発展させてきた。その結果、電気回路は現在の科学技術には必須の技術となっており、疑いようのない事実であるだけに、コンデンサーは正しい物理量であると考えて良い。

しかし、繰り返し述べているように、配線の数が2本の集中定数回路素子の回路網は、それ自体で閉じた世界をつくっておらず、実際には、大地（地球）を3番目の配線になっている。従って、配線の数が3本の電気回路になっており、「対称性の破れ」がある場合には、電磁ノイズとしてノーマルモードノイズとコモンモードノイズさらにはアンテナモードノイズの3種類が発生する。この場合、電磁ノイズを制御してゼロにするためには簡単な方法はなく、もう一度、「対称性の破れ」がない電気回路にやり直す必要がある。

孤立した2端子集中定数回路素子の回路網の配置自体に「対称性の破れ」があったり、また、配線の数が3本であっても、配線そのものの配置や2端子集中定数回路素子の回路網の配置に「対称性の破れ」があるとき、これらの「対称性の破れ」により、電磁ノイズが発生すると考えられる。繰り返すようでくだい話になるが、広く普及している配線の数が2本の2端子集中定数回路素子の回路網は、大地（地球）が3番目の配線になっており、今一度、正確に、配線の数が3本の電気回路として数理的に解を求める必要があることになる。言い換えれば、電磁ノイズとして、ノーマルモードノイズとコモンモードノイズさらにアンテナモードノイズが発生することは、大地（地球）が存在することが原因であることになるが、ノイズの教科書や参考書で大地（地球）の存在が説明されているものの、残念なことに、「対称性と対称性の破れ」の概念が欠落しており、そのため、どんな電磁気現象が起こるのかを知る解法が正確ではないのである。そのため、電磁ノイズを低減する方法が解明できていない。その意味では、電気回路の「対称性と対称性の破れ」という概念は、電気回路理論を構築する上で、大きな指針になる。

なお、広く普及している配線の数が2本の2端子集中定数回路素子の回路網が孤立していて、大地（地球）が電気回路に影響を与えない場合には、「対称性と対称性の破れ」は果たしてどうなるのであろうか？2本の配線の太さが同じで平行している場合は「対称性の破れ」がない場合と思われ、コモンモードノイズやアンテナモードノイズは発生せず、ゼロになる。この場合、配線の数が2本の電気回路の世界は閉じていると、本稿では、呼んだりしている。しかし、2本の配線の太さが異なるときには「対称性の破れ」があると思われる。例えば、同軸ケーブルのように内導体が外導体で囲まれているとき、2つの導体の太さが異なるので、「対称性の破れ」があると思われる。この場合、内導体と外導体

を流れる電流の大きさが異なり、電磁波の放射、即ち、アンテナモードノイズが発生するものと考えられる。ただし、ここでの議論は孤立系の話であり、実際の場合には、大地（地球）が存在しているので、数理的に正しい解を求める必要があるが、それが簡単ではない。

もちろん、2本の配線をツイストすると「対称性の破れ」がない場合と考えられる。ただし、広く普及しているツイストペア線に対しては、3番目の配線として大地（地球）の存在が無視された議論が行われるので、その議論には限界があると考えたほうが良い。

以上のように、配線の数2本の電気回路が存在するような気がしていたが、実際の電気回路では大地（地球）が電気回路に影響を与えており、例えば、コモンモードノイズが発生していることは広く知られているので、大地（地球）が3番目の配線として存在していると考えなければならない。このように、配線の数3本になる場合には、「対称性の破れ」がない状態を実現して、電磁ノイズを制御してゼロにしなければならない。その一方で、「対称性の破れ」がある場合には、コモンモードノイズやアンテナモードノイズが発生するが、これらのノイズは、ノーマルモードノイズと結合し、そして、お互いに変換しあって、電磁ノイズとなっている。繰り返しになってくどいようであるが、「対称性の破れ」がある場合には、電磁ノイズが発生するだけにとどまらず、異なるモードのノイズが結合して、変換しあうのである。

配線の数2本の電気回路に3番目の配線として大地（地球）が存在すると言う場合には、大地（地球）が導体であるとしても、空間的に広がりがあり、また、広がりのある導体ツイストすることは不可能なので、数理的にこれを正しく解くことは簡単ではない。そこで、配線の数3本の電気回路を数理的に解いて、その電気回路を大地（地球）に接地する方法を考えることにする。この場合、大地（地球）は4番目の配線になりそうであるが、配線の数3本の電気回路と電源が閉じた世界を形成していて「対称性の破れ」がない場合には、大地（地球）とは電氣的にも磁氣的にも相互作用しないので、中線を大地（地球）に接地しても、電氣的にも磁氣的にも電磁現象が変化しないのである。

ところで、電気回路や電源の「対称性と対称性の破れ」を数理的に取り扱うための電気回路理論は、その昔、土岐博（大阪大学名誉教授、原子核物理学理論研究者）と筆者との共同研究（後程、簡単に紹介する）の論文「土岐・佐藤：アンテナ過程」で完成したと思っていたところ、最近になって、それでは不十分であることに気付いた。「何が起きているのか？」とよくよく検討してみたところ、その不十分な点を補おうとすると、マクスウェル方程式の異なる2つのレベルの近似やモデルを組み合わせなければならないと言う、物理学者の端くれである筆者としても、気乗りのしない、受け入れ難いことになってしまうことに気付いた。明快に説明しておこう。2端子集中定数回路素子の回路網では電氣的影響をコンデンサーで表現し、配線の数3本の電気回路では電氣的影響を電位係数で表現する。一つの数理的な理論の中に、2種類の表現を採用しなければならない。いずれか一方を選ぶことができないのであるから、数理的な解決は可能であるとは思えな

い。しかし、逃げの一手があったのである。物理学で代表される自然現象は、数理的に、首尾一貫した論理で解明されてきた。しかし、電気回路は自然現象ではなく、人工物の1つであると考えれば良く、さらに、人工物であっても、数理的に、首尾一貫した論理で解明できることを信じれば良いのである。

そうは言っても、やはり、組み合わせによって成立させなければならない電気回路理論であるから、「ハイブリッド電気回路理論」と呼ぶことにする。その枠組みはでき上がりつつあるものの、また、間違いのないように丁寧に計算すれば良いだけの段階にあるにも拘わらず、具体的な計算式を示すことができず、従って、未完成にとどまっている。現在既に「老頭児（ロートル）」である筆者には、そのアイデアを完成させる計算は無理なのかもしれないので、読者に挑戦してもらえると有り難い。そして、「対称3線方式」の電気回路と電源では電磁ノイズを制御してゼロにできると信じて、「対称3線方式」の電気回路と電源を実際に製作し、電磁ノイズのない世界の実現を目指してもらいたい。

そうは言っても、数理的に、何が起きているのかについて、簡単に紹介しておこう。広く普及している配線の数が2本の電気回路理論では、実際でも理論でも、電気的影響をコンデンサーで表している。しかし、コンデンサーは近似でありモデルである。マクスウェルが1873年に著した「電気磁気論考」にも示されているように、導体が数多くあるときに定義される自己電位係数と相互電位係数から成る電位係数の一般式において、導体の数を2つに限ったときに、電荷量は正負異なるものの、絶対値は等しいと言う条件を課して、コンデンサーを定義する。

なお、本稿ではマクスウェルの著作を「電気磁気論考」と訳出しているが、後程紹介するように、「太田浩一」の訳出に倣ったものである。また、マクスウェルの著作は和訳されており、筆者と同様に、邦文に助けられる人もいるかと思い、「近畿大学学術情報リポジトリ」の「木口・近藤：電気と磁気第1巻・第2巻」を紹介しておきたい。ただし、マクスウェルの原著も訳書も今となっては古めかしく、理解するには手間取るかもしれない。

J.C. MAXWELL, "A TREATISE ON ELECTRICITY & MAGNETISM (THIRD EDITIONS), VOL. 1", DOVER PUBLICATIONS, INC. NEW YORK,

J.C. MAXWELL, "A TREATISE ON ELECTRICITY & MAGNETISM (THIRD EDITIONS), VOL. 2", DOVER PUBLICATIONS, INC. NEW YORK,

近畿大学学術情報リポジトリ James Clerk Maxwell, A TREATISE ON ELECTRICITY & MAGNETISM VOL. 1, 木口勝義・近藤康訳、電気と磁気 第1巻 [AN10074306-20140228-0000a.pdf](#)

近畿大学学術情報リポジトリ James Clerk Maxwell, A TREATISE ON ELECTRICITY & MAGNETISM VOL. 1, 木口勝義・近藤康訳、電気と磁気 第2巻 [AN10074306-20140228-0000b.pdf](#)

「MAXWELL:Elect.&Magnet.Vol.1」の「CHAPTER III ON ELECTRICAL WORKS AND ENERGY IN A SYSTEM OF CONDUCTORS」の107頁の「ART.87 Theory of a

system of conductors. Coefficients of potential. Capacity. Coefficients of induction」は「木口・近藤：電気と磁気 I」の 112 頁の副節「87]導体系の理論」では導体の任意の個数 n で議論が始まったが、いつの間にか、115 頁にあるように、差 V_1-V_2 は A から B への駆電力を表わしているが、和 V_1+V_2 は物理的意味をもたないとされている。これに対して本稿では、和 V_1+V_2 は無限遠方から 2 導体系を見たときの電位であり、電磁波を放射するときには、この和は時間的に変動すると考えねばならない。

また、「MAXWELL:Elect.&Magnet.Vol.2」の「CHAPTER IX. GENERAL EQUATIONS OF THE ELECTROMAGNETI FIELD」の 253 頁の「ART.610」は「木口・近藤：電気と磁気 II」の 273 頁の副節 610]に示されているように、「真の電流は伝導電流と同じものではなく、電気変位の時間変化が電気の全体の動きになることを考慮しなければならない」とされる。こうして、変位電流が登場する。

コンデンサーと変位電流の関係

導体の数が 3 つともなると、即ち、配線の数が 3 本ともなると、電氣的影響はコンデンサーでは駄目と思われ、自己電位係数と相互電位係数から成る電位係数を採用しなければならない。しかし、「マクスウェル・電気磁気論考」では、電位係数が登場するが、導体の数が 3 つ以上の場合の議論はなく、そんな電位係数に関する議論は見当たらない。これに対して、磁氣的相互作用に関しては、誘導係数がそのまま採用されており、自己誘導係数と相互誘導係数の 2 種類がある。このとき、電流が流れる導体の数が 2 つに限られることはなく、3 つであっても良い。「電気と磁気とは双対性の関係にある」と言われているものの、広く普及している「集中定数回路素子の回路網」の電気回路理論では、双対性の関係が破れていると思う。インターネットで「電気回路の双対性」または「電気工学の双対性」で検索すると、「インダクタンスとキャパシタンスは双対性の関係にある」と説明されている。しかし、インダクタンスには自己インダクタンスと相互インダクタンス（自己誘導係数と相互誘導係数）の 2 種類があるのに対して、キャパシタンスには、自己とか相互とかの 2 種類の区別はない。この辺りに、広く普及している電気回路理論には何処か見落としが起きているのかも知れない。その点、自己電位係数と相互電位係数から成る電位係数と自己誘導係数と相互誘導係数から成る誘導係数であれば、双対性が成立するであろう。

しかし、そうだからと言って、常に電位係数を採用すべしと、筆者は主張している訳でもない。筆者の言いたいことをうまく表現できていない気がするので、くどいようであるが、繰り返させて頂こう。広く普及している「2 線方式」の 2 端子集中定数回路素子の回路網の電気回路理論では、電氣的相互作用は 2 端子集中定数回路素子のコンデンサー（キャパシタンス）で表される。これは近似でありモデルであるが、キルヒホフの第 1 法則（電流則）やキルヒホフの第 2 法則（電圧則）が成立し、電気回路の計算が、圧倒的に、

簡単になっている。もし、この近似やモデルを捨てて、電氣的相互作用を電位係数で表現すると、電気回路の設計はほとんど不可能であると思える。それにしても、よくぞ、先輩諸氏は、2端子集中定数回路素子と言う、素晴らしい近似やモデルを考案したことには感心させられる。

何しろ「2線方式」の広く普及している2端子集中定数回路素子の回路網は数えきれないほどの複雑にして想像しがたいほどの多様性に溢れた機能を実現しており、しかも、現代の科学技術を根底から支えており、この事実からして、筆者としては、「広く普及している電気回路理論には間違いがある」と断言することには躊躇せざるを得ない。そのため、3本の配線に2端子集中定数回路素子の回路網がつながった電気回路を数理的に解く「ハイブリッド電気回路理論」を構築する作業が急がれる。

「配線の数が2本」の場合とか、「配線の数が3本」の場合とかの話から始めてしまって、本題から離れてしまい、読者の皆さんを混乱させてしまったかもしれない。筆者は、その昔、配線の数を3本にして、2端子集中定数回路素子の回路網を幾何学的に対称な位置に設けた、「対称性の破れ」がない、「対称3線方式」の電気回路と電源を製作したところ、電磁ノイズが制御できてゼロになった。筆者による、この「実践」により、「電気回路と電源の対称性の破れ」が原因で電磁ノイズが発生していることが明らかになった。このことは、広く普及している「配線の数が2本」の、即ち、「2線方式」の2端子集中定数回路素子の回路網では、その周りには大地（地球）あるいは金属製筐体が3番目の導体として存在しているため、「対称性の破れ」があり、電磁ノイズを制御することができず、電磁ノイズをゼロにできないことを意味している。そのため、「配線の数が2本」である、広く普及しているバッテリーやACアダプターでは制御できないため迷走する電磁ノイズが発生し、その結果、発熱、発煙、発火、等々の不具合が発生していることが予想される。

これからして、電磁ノイズの何たるかを知るためには、「対称性と対称性の破れ」は重要な概念であるが、常日頃電気回路に慣れ親しんでいる皆さんや電気回路を教え教えられている皆さんには馴染みが少ない概念であろう。そこで、分かりやすい解説がないかと、皆さんに負けず劣らず、（物理学者と自称しているにもかかわらず）馴染みが少ない筆者は、インターネットであれこれ検索してみたが、「これぞ！」と言う解説に出会えなかった。そんな中、次の、「対称性とは何か」と題した新書を挙げておきたい。

広瀬立成著、「対称性とは何か 自然・宇宙のしくみを対称性の破れによって理解する」、サイエンスアイ新書、ソフトバンククリエイティブ株式会社、2011年8月25日 初版第1刷発行

この本の「はじめに」で、人工物、自然、生物、宇宙、等々には、左右対称、鏡映対称、回転対称等々の幾何学的な対称性が見られることが紹介される。ところで、この本は7章からなるが、その第1章の28頁の「1-10節 相転移を対称性で考える」の節で、早くも、一般化された「対称性の破れ」が紹介される。水蒸気、水、氷の三相は、「対称性の破れ」により、順に、対称性が高い状態から低い状態に変化しているとされる。てんで

ばらばらの方向に動き回っていてもやややしている水蒸気の方が対称性が高く、美しく見える結晶構造を示している氷の方が対称性が低いのである。

「対称性の破れ」については幾何学的な配置の対称性の破れとの関係で議論されていないので、ますます抽象的な概念になっているようである。

[「対称性の破れ」、対称性の破れ - Wikipedia](#)

レオン・レーダーマン/クリストファー・ヒル：著、小林茂樹：訳、「対称性 レーダーマンが語る量子から宇宙まで」、白揚社、2008年4月15日 第1版第1刷発行

物理学における「対称性と対称性の破れ」の概念は抽象化され一般化されて進展してきたのに対して、電気回路における「対称性と対称性の破れ」は、幾何学的な配置の「対称性と対称性の破れ」に見える点で簡明であり、幾何学のようにも思える。電気回路理論では、「電気回路図」と言う洗練された表現方式が重用されており、配線の数を3本の電気回路図を描き始めると、冒頭で説明を始めたように、たちまちのうちに「対称性と対称性の破れ」が気になり始めるであろう。そのとき、3本の配線は自己誘導係数と相互誘導係数から成る電位係数で電氣的に相互作用すると考えることにする。それと同時に、自己誘導係数と相互誘導係数から成る誘導係数で磁氣的に相互作用すると考える。その結果、その配置を幾何学的に対称にすることに加えて、2端子集中定数回路素子の回路網を、これまた、その配置を幾何学的に対称にして、「対称3線方式」の電気回路と電源にすることによって、ノーマルモードノイズとコモンモードノイズとアンテナモードノイズと言う3種類の電磁ノイズが直ちに定義でき、電磁ノイズと言う電磁気現象は、その3本の配線で閉じると言うことになる。しかも、「対称性の破れ」のない電気回路と電源を製作すれば、アンテナモードノイズも発生せず、電磁気現象の世界が閉じることになり、もはや大地（地球）は、我々が制御したい電磁気現象とは無縁の世界になる。くどい話になるが、これに対して「対称性の破れ」がある場合には、アンテナモードノイズ発生すると、電気回路あるいは電源から電磁波が放射され、大地（地球）に届いて、さらに、大地（地球）から電磁波の反射が起こり、電気回路あるいは電源に舞い戻り、大地（地球）は電気回路あるいは電源と相互作用する。電気回路と電源の「対称性の破れ」の有無が大地（地球）との相互作用を支配するのである。この電磁波は電気回路と大地（地球）の間を伝搬するので、電気回路を大地（地球）に導線でつなぐと、つないだ場所に依じて、電気回路と大地（地球）の全体の電磁氣的な状態が変化する。

こうした考えをもとにして、3本ある配線のうち、中線の電磁気学的振る舞いをまとめておこう。電気回路と電源に「対称性の破れ」がない場合には、コモンモードノイズもアンテナモードノイズも発生しないので、中線を伝搬する電流はゼロである。そのため、中線の左端から右端までは同電位になっている。このような電磁気学的状態にある中線は、その電気回路や電源の基準となっている。繰り返しになってくどいが、中線は「対称性の破れ」がない場合のみ、電気回路や電源の基準となりうるのである。

話の流れで、配線の数が3本の電気回路と電源を議論する中で大地（地球）が登場してきたが、考えてみれば、我々は大地（地球）の表面に立っており、配線の数が3本の電気回路に触れようとする、電位の違いによって感電によるトラブルを避けることができない。これを避けるために、「対称3線方式」の電気回路や電源とは言え、何処かの1点で大地（地球）と接続するのが良い。これをグラウンドまたはアースあるいは接地と呼ぶ。ただし、「対称性の破れ」がない場合のみ、グラウンドまたはアースあるいは接地が可能であることに注意しておきたい。その理由を考えることができるのも、「ハイブリッド電気回路理論」の自慢である。これと違って、「対称性の破れ」がある場合には、中線の左端から右端に向けて電流が伝搬し電位も伝搬しており、同電位にはなっていないので、中線を1点で大地（地球）に導線をつないだとしても、中線の何処であっても同電位にはなっていない。その結果、中線を大地（地球）に導線をつないだとしても、理想的なグラウンドまたはアースあるいは接地は実現されないことになる。

とんでもない話になってきたが、ここでの、グラウンドまたはアースあるいは接地の定義は、広く普及している「配線の数が2本」の2端子集中定数回路素子の回路網での定義とは異なるものようである。何故こんな違いが生じてしまったのかと考えてみれば、広く普及している「2線方式」の2端子集中定数回路素子の回路網では、大地（地球）の存在を前もって数論学的に取り扱わず、付け足しの3番目の配線と考えたからであろう。しかし、その一方で、真正面から大地（地球）を取り扱おうとすると、広く普及している「2線方式」の2端子集中定数回路素子の回路網の電気回路理論を新たに構築することが困難であるだけに、場合に応じて異なる方法が良さそうだと考えられるようになったのではないだろうか。

ここでは、丁寧に分類が行われている資料『『グラウンド(GND)』と『接地（アース）』の意味と違いについて』に基づいて、これまでのグラウンドまたはアースあるいは接地について考察しておこう。なお、本稿では、「グラウンド」と呼称を採用しているが、「グラウンド」と呼ばれることも多く、内容は同一であることを確認しておきたい。

Electrical Information、『『グラウンド(GND)』と『接地（アース）』の意味と違いについて!』、[Electrical Information \(detail-infomation.com\)](http://Electrical Information (detail-infomation.com))

ここでは、グラウンド(GND)は『回路動作の基準となる電位』のことで、接地（アース）は『大地に接続する』こととされているが、場合に応じて、それも恐らく経験に基づいて、最善の方法が示されている気がする。いずれの場合でも、電気回路や電源を、導線を用いて、基準となる電位や大地につなぎ込むとグラウンドや接地が実現されるかのようである。また、導線よりももっと幅が広い平面の方がより良いグラウンドや接地が実現されると考えて、プリント回路基板(PCB)ではグラウンドプレーンが広く普及しているようである。それにしても、誰が電気回路や電源の電位を定めなければならないと考えたのであろうか。やっぱりマクスウェルだったのだろうか。

筆者が提案している「対称3線方式」の電気回路や電源では、「対称性の破れ」がないときだけ、中線は同電位になっており、従って、電気回路と電源の基準となることができ、その中線の1点を大地（地球）に導線でつなぐと接地できるという仕掛けになっている。「対称性の破れ」がない場合だけグラウンドや接地あるいはアースできることになっており、先の資料「『グラウンド(GND)』と『接地（アース）』の意味の違いについて」のように複数のグラウンドやアースはない。そうは言っても、何が起きているかを頭の中に思い描くことが簡単ではないので、その説明に挑戦しておこう。「対称性の破れ」がある場合、その電気回路と電源を無限遠方から眺めると、その電気回路と電源の電位が時間的に振動しているに見えるのである。電気回路と電源の電位が時間的に振動して見えるということこそ、この電気回路と電源がアンテナモードノイズとして電磁波を放射しているということである。

それにしても、その昔から広く普及している「2線方式」の電気回路と電源の考えとは大幅に異なる考えであるが、首尾一貫している点では、見通しが良さそうである。以下では、筆者の「実践」を紹介しよう。

筆者は、その昔、1988年から1994年までの6年半、放医研（当時：科学技術庁・放射線医学総合研究所、現在：文部科学省・量子科学技術研究開発機構・放射線医学総合研究所 QST 病院）にて、重粒子線がん治療装置 HIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba) の主加速器でパルス装置である2台のシンクロトロン加速器の建設に取り組んだ。筆者は、放医研の前は、東大核研（東京大学原子核研究所）にて、直流装置であるサイクロトロン加速器の建設に取り組み、放医研の後には、阪大核物セ（大阪大学核物理研究センター）にて、サイクロトロン加速器の性能向上に取り組んだ。こうした経歴から分かるように、シンクロトロンに関わったのは放医研が最初にして最後になった。その一方、それまでの国内のシンクロトロンの加速対象は陽子や電子であり、重イオン加速のためには、多数の機器装置で、従来の技術を拡張して高性能化し、また、新たに開発する必要があった。しかし、こうした開発の多くは、東大核研の研究者を始めとして、受注した企業の技術者や下請けさらには孫請けの企業の技術者により意欲的に取り組まれ、筆者を含む発注者の力不足を補って余りあるものであった。それらの詳細については、質的にも量的にも膨大になるため、その説明は簡単ではないこともあり、ここでは説明を割愛する。

ところで、治療装置として HIMAC シンクロトロンは、1994年に重粒子線がん治療を開始して以来、今に至るまで、安定した再現性のある重粒子ビームを供給できている。筆者の考えでは、この成功は、多数の高性能機器装置の開発にも増して、電磁ノイズが極端に少ないシンクロトロンの電磁石と電源のシステムが、それ以前にはなかった、筆者による新しい考えに基づいて実現できたことに負うところが大きい。ただし、これは筆者自身が思っているだけで、筆者以外の第3者の誰一人としてこうした発言を行ったことはないので、単に筆者の思い過ごしとさえ言えば、それだけのことかもしれない。新しい考えについて

は、現在でも、数理的な電気回路理論が未完であるため、ほとんど知られることもなく、褒められた事情にはないが、電磁ノイズを制御してゼロにできただけに、先ずは、自画自賛させていただきたい。

「電磁ノイズを徹底的に少なくすべし」と言う指摘は、KEK（当時：高エネルギー物理学研究所、現在：高エネルギー加速器研究機構）の12GeV陽子シンクロトロン12GeVPS（共同利用実験期間：1977-2005年）の電磁石電源に取り組んでいた松本啓（放医研の客員研究員として大活躍していただいた）によって、筆者は気づかされた。とにかく松本啓の電磁ノイズの少ない電源の開発にける意気込みは凄まじかった。しかし、筆者もまた、思うところがあって、その意気込みに負けず劣らず、電磁ノイズを制御してゼロにする電気回路を考案することに傾注した。思い返せば、松本啓からは、例えば、スイッチング素子のサイリスタの転流に際して発生する転流ノイズを減らすために、ゼロクロススイッチングの技術が提案されたりしていたが、今にして思えば、この提案により、筆者は、「信号を発生させると、それと同時に、電磁ノイズが発生する」ことを、初めて、知った気がする。それまでの筆者の感覚では、電磁ノイズは、電気回路の外部からやってくる、もやもやした正体不明の電磁波や電気信号が、電気回路に入り込んできている気がしていた。

その一方で、筆者は、電磁ノイズにはノーマルモードノイズとコモンモードノイズの2種類があり、これらの2種類のノイズが結合（相互作用）して、お互いに変換しあうと考えており、それに加えて、「信号を発生させると、それと同時に、電磁ノイズが発生する」と言うことであれば、電磁ノイズを制御してゼロにするためには、ゼロクロススイッチングよりも、「『配線の本数を3本』にして、2端子集中定数回路素子の回路網を幾何学的に『対称な配置』で設ける」と言う、筆者が思い付いた考えに囚われていた。何故そう思ったのかの理由の説明をここでは割愛するが、「配線の本数が3本」の場合には、ノーマルモードノイズとコモンモードノイズの、少なくとも、2種類が発生し、「対称な配置」でない場合には結合（相互作用）して変換しあう気がしたからである。そうは言っても、筆者の当時の実力では、「配線の本数が3本」の電気回路を数理的に解明することが容易ではなかったので、松本啓にも出席をお願いしたメーカーとの打ち合わせにおいて、結論に達していない中間的な計算を示しながら、「配線の本数が3本」の電気回路を製作したいとわめいていた。その未完の計算によれば、広く普及している「配線の本数が2本」の2端子集中定数回路素子の回路網では、大地が3番目の配線になり、その結果、電気回路の配置は対称にはならず、「対称性の破れ」があり、複数台直列につながっている電磁石の磁場は、ノーマルモードノイズとコモンモードノイズとが結合して複雑に変換しあう電磁ノイズが、波動として電磁石から電磁石へと次々と伝搬して、その入射波と反射波が重なり合って定在波を発生していることを示していた。ただし、「対称性の破れ」と言う言葉は、本稿で使い始めたもので、その当時、そんな説明をしていたわけではない。

こうした現象はKEK・12GeVPSで観測されるはずだと考え、KEKの佐藤皓と末野毅にはHIMACの客員研究員になっていただき、12GeVPSでの実測や測定データの提供、さ

らなる調査他、心強い助言や応援を得た。また、HIMAC シンクロトロンの電磁石と電源の製作は日立製作所が受注したが、同社の小関庄一郎、久保宏、垣内俊二の皆さんを、スイッチング電源の設計・製作の経験がない筆者であるにも拘わらず、強引にも「配線の数が3本」の電気回路の製作に引きずり込んでしまった。こうして、広く普及している「配線の数が2本」の2端子集中定数回路素子の回路網の電気回路に慣れ親しんできた皆さんには納得してもらえたかどうかは判然としないまま、「対称3線方式」の電気回路と電源がHIMAC シンクロトロンの製作される運びになった。誰一人として何が起こるのが判然としていないようではあったが、幸いなことに、電磁ノイズを制御してほとんどゼロにすることに、「実践」として、成功した。筆者にわめかれながら、それに耐えて、素晴らしい装置を製作された皆さんと皆さんの高い実力に感謝すると同時に、皆さんの誇りにしていただきたい。こうして、HIMAC シンクロトロンは、所定の日程通り、1994年6月に、重粒子線がん治療を開始した。その後、20年ほどして、スイッチング素子はサイリスタからIGBTに置き換えられ、スイッチング周波数が高くなったが、それにもかかわらず、筆者の聞くところでは、電磁ノイズの性能に特段の変化はなく、電磁ノイズを制御してゼロにできる「対称3線方式」の電気回路と電源は原理的に優れものであることが確認された。

なお、「日本の粒子線治療施設の紹介」に列挙されているように、2021年3月の時点では、国内には、シンクロトロンを主加速器とする重粒子線および陽子線のがん治療装置の施設は17か所あるが、いずれも国産で、また、筆者が思うに、「対称3線方式」の電気回路と電源が採用されており、しかも、複数のメーカーが設計製作している。筆者の言葉で言えば、誰が作ってもがん治療に使えるシンクロトロンが実現できるようになったのである。

財団法人医用原子力技術研究振興財団、[日本の粒子線治療施設の紹介 - 粒子線治療 \(antm.or.jp\)](http://antm.or.jp)

こうして、国内では、シンクロトロンの電磁石と電源では「対称3線方式」の電気回路と電源は電磁ノイズを制御してゼロにする技術は確立されたものの、その他の一般的な電気機器装置（ACアダプターやバッテリーを含む）では、「配線の数が3本」の電気回路や電源が普及することはなかった。言い換えれば、広く普及している「配線の数が2本」の電気回路理論では電磁ノイズの起源が判然としておらず、「配線の数が3本」の電気回路では電磁ノイズが制御できることが想像できないのである。筆者には普及しない理由が明快で、それは、数理的な電気回路理論が完成していないからである。筆者が「配線の数が3本」の電気回路を思い付いたとき、電磁ノイズにはノーマルモードノイズとコモンモードノイズの2種類があるとした。しかし、一般的には、これらに加えて、その電気回路にはアンテナのように電磁波を放射するモード（アンテナモードノイズと呼ぶ）が存在していて、合計3種類のノイズが発生すると考え始めたのである。

こうなると話がこんがらがってきて、筆者自身、動きが取れなくなっていたところ、最近になって、電磁気学の範疇には収まり切らないにも拘わらず、数理的な説明が可能で

あることに気付いた。筆者に覚醒をもたらしたのは「サイモン・システムの科学」であった。

ハーバート・A・サイモン著、稲葉元吉・吉原英樹訳、「システムの科学 (THE SCIENCES OF THE ARTIFICIALS) 第3版」、パーソナルメディア株式会社、2019年7月20日 第3版7刷発行

この本の原題は THE SCIENCES OF THE ARTIFICIAL (人工物の科学、人工性の科学) であり、帯紙には「自然物とは異なる「人工物」の科学はいかにして可能であるか」と書かれている。この本の内容を正しくは理解できないものの、この帯紙にある文章はなるほどと納得できる。自然物で起こる自然現象は首尾一貫した数理的な自然法則で説明できるが、人工物でも自然法則とは異なる科学的で数理的な法則を適用できると考えれば良いのである。しかも、階層構造を持つと考えると良いのである。

そこで、配線の本数が3本のとき、その3本の配線は電気回路や電源の「容れ物」と考え、1番目の主配線と中線の間および2番目の主配線と中線の間には、それぞれ、「中身」である2端子集中定数回路素子の回路網を設ける。このとき「容れ物」に対しては、自己誘導係数と相互誘導係数から成る電位係数と自己誘導係数と相互誘導係数から成る誘導係数を用いて、電磁気現象を解く。また、「中身」に対しては、コンデンサーと自己インダクタンスおよび抵抗の他トランス (相互インダクタンス) を用いて、キルヒホフの第1法則 (電流則) とキルヒホフの第2法則 (電圧則) およびオームの法則を用いて、電磁気現象を解く。この新しい電気回路理論を「ハイブリッド電気回路理論」と呼ぶことにする。

ここでいきなり拙速かもしれないが、HIMAC シンクロトロン の電磁石の「対称3線方式」の電気回路と電源の回路図を図1に示す。図法に熟知していない筆者自らが描いたものであるから、理解しがたい点があるかと思うが、その一方で、「『配線の本数を3本』にして、2端子集中定数回路素子の回路網を幾何学的に『対称な配置』で設ける電気回路と電源」になっている雰囲気は出せていると思う。

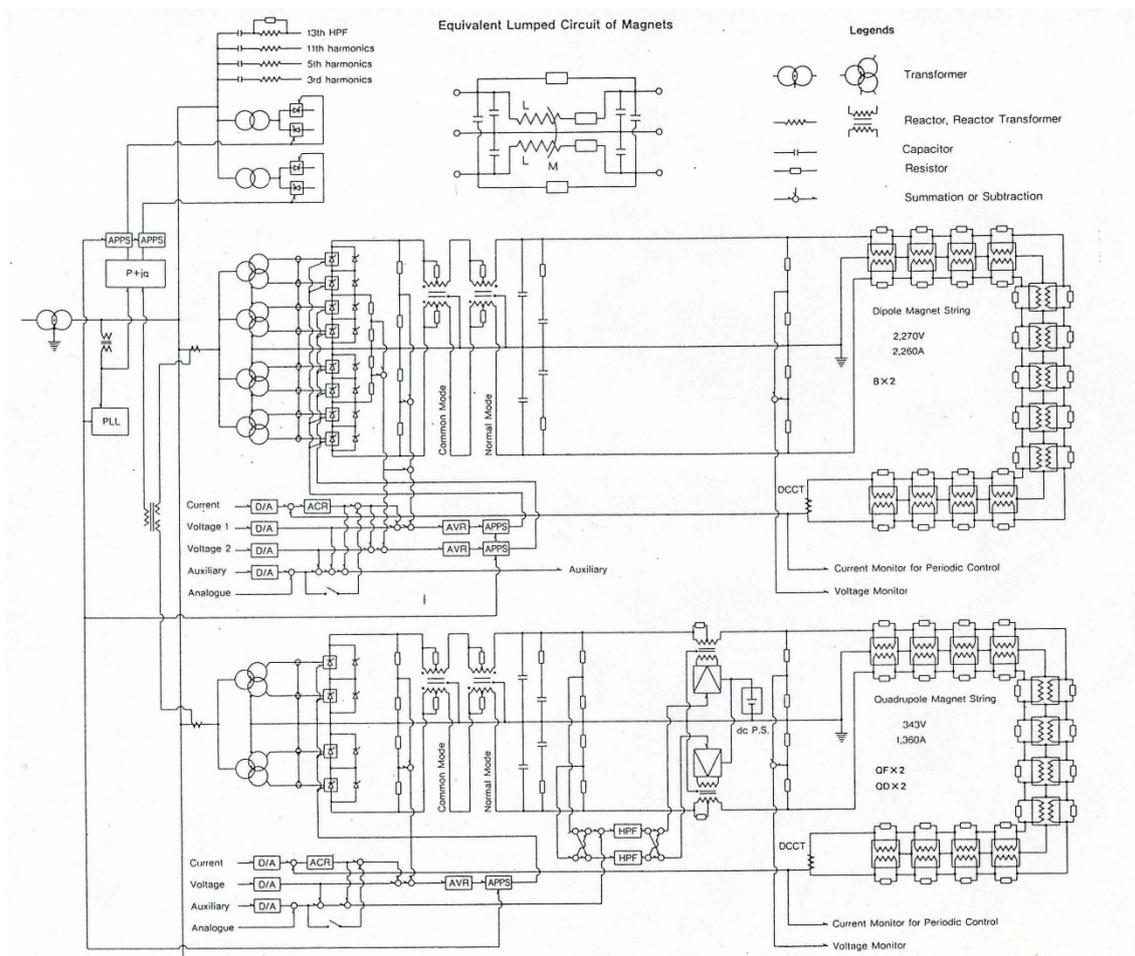


図1 HIMAC シンクロトロンの電磁石と電源の「対称3線方式」の電気回路と電源：1式（合計2式ある）の13台の偏向電磁石の電源は48相整流で、1式（合計4式ある）の12台の四極電磁石の電源は24相整流。ただし、四極電磁石に対しては、ノーマルモードとコモンモードの両方を負帰還制御できるリアクトルトランス方式の回路を設けた。また、受変電トランスと並列に、サイリスタ制御方式の無効電力補償装置を設けて、フリッカーを抑制すると同時に、受電電圧を一定化している。

なお、図1は、以下の論文で、既に報告済みであり、また、この論文にはノーマルモードノイズとコモンモードノイズの2種類のノイズの定義式が示されているので、参考にさせていただきたい。

佐藤健次、「重イオン・シンクロトロンの加速器技術と物理・その1- 電源と電気回路としての電磁石負荷：コモン・モード・ノイズとの格闘 - 」、「加速器」、Vol. 3, No.1, 2006(10-23)、[kasokuki.cgi \(pasj.jp\)](http://kasokuki.cgi(pasj.jp))

図1には、1式の13台の直列につながった偏向電磁石と48相のサイリスタ電源（2台のシンクロロンに対しては合計2式ある）、および、1式の12台の直列につながった四極電磁石と24相のサイリスタ電源（2台のシンクロロンに対しては合計4式ある）とが示されている。ここでは、偏向電磁石について説明する。12台はシンクロトロンの周上に

並べられリング状の円形加速器を構成し、1台は周上を離れた場所に設けられていて磁場監視を行う。電磁石の通常の使用方法では、偏向電磁石の上下コイルはつないだ状態で使用されるが、HIMACの「対称3線方式」の電気回路では、いずれの電磁石も上半分の励磁コイルと下半分の励磁コイルは分離され、上コイルは上コイルで直列につながれ、下コイルは下コイルで直列につないである。また、電磁石の鉄芯は電磁石から電磁石へと直列につないである。上コイル、下コイル、そして、鉄芯のそれぞれを直列につなぐため、配線の本数は3本であり、上コイルと下コイルでは幾何学的に対称な配置で設けられていることになる。上コイルが主配線1であり、下コイルが主配線2であり、鉄芯をつないだ配線が中線である。上コイルと下コイルとは相互インダクタンスで相互作用しているが、それも含めて、上下が幾何学的に対称な配置になっている。

電源の3端子出力の上コイルと下コイルの配線には、コモンモードリアクトルトランスとノーマルモードリアクトルトランスが設けられ、それぞれ、コモンモードフィルターとノーマルモードフィルターのリアクトルになっており、その直後には、コンデンサーおよび抵抗が直列につながったコンデンサーが上下対称な配置で中線につながっている。ノーマルモードリアクトルトランスは、鉄芯中の磁束は加算されて高く、大型のトランスになるが、コモンモードリアクトルトランスは、鉄芯中の磁束は相殺され小さく、小型のトランスでよい。このように、ノーマルモードフィルターとコモンモードフィルターの2つのフィルターを素直に設けることが思い浮かべることができるのである。「対称3線方式」の電気回路にして、こんな形でコモンモードフィルターを設けることができるのが、何と言っても、自慢である。

広く普及している配線の本数が2本の2端子集中定数回路素子の回路網で、電磁ノイズを除去するには「フィルターとシールド」を設けると言われているものの、コモンモードフィルターを組み込むことは容易ではない。よく見かけるのは、例えば、ACアダプターのケーブルに設けられているフェライトコアであるが、ノイズフィルターと呼ばれているものの、コンデンサーが組み込まれていないので、フィルターと呼ばない方がよいであろう。その点、配線の本数が3本の回路網では、2種類のリアクトルトランスをフィルターとして利用できるので、紛れがない。このことからして、電磁ノイズの除去には、「対称3線方式」の電気回路と電源が圧倒的に有利である。

「対称3線方式」の電気回路と電源と言う観点からの説明は以上であるが、シンクロトロンはパルス装置である点で、幾つかの特徴的な電気回路にする必要がある。図中に2,500V・2,500Aと記載されているのは、パルス運転したときの最大電圧と最大電流であり、直流出力ではない。ところで、負荷は電磁石のコイルであるから主としてインダクタンスであり、交流においては、電圧に対する電流の位相は遅れ、無効電力が発生する。電圧に対して電流の位相が遅れた無効電力に対しては、発電所から受変電所までの送電線は、交流に対して主としてインダクタンスであるから、受変電所での受電電圧が降下する。この電圧変動はフリッカーと呼ばれており、同じ送電線系統につながっている他の受

変電所でもフリッカーが発生する。これを避けるため、無効電力補償装置を設けてある。その無効電力もパルス変化するため、サイリスタ制御リアクトル方式を採用し、実時間で制御している。さらに、無効電力の大きさに応じて受変電所での電圧が変化するため、これを利用して、受変電電圧を一定にする制御が可能であり、実際、その制御を行っている。このサイリスタ制御リアクトル方式の無効電力補償装置は KEK の 12GeVPS に倣ったものである。

ここで、HIMAC の電磁石電源の性能をざっくりと一言でまとめておこう。この「対称 3 線方式」の電気回路と電源は、運転試験開始直後の初期故障もなく、それに続く 20 年間の昼夜運転（日中は重粒子線がん治療、夜間は物理学や生物学の実験の全国共同利用研究）でも、これと言った故障もなく、配線の数が 2 本の通常の電気回路で実現される電磁ノイズの大きさの 1/1000 程度にまで小さくなった。例えば、出力電流の大きさが 1,000A のとき、電磁ノイズの振幅は 1mA 以下になった。マイクロワールドの世界

$(1 \times 10^{-3} / 1,000 = 1 \times 10^{-6})$ ではあるが、時には、0.5mA 程度になることもあったので、電磁ノイズも、辛うじてではあるが、ナノワールドの世界 $(0.5 \times 10^{-3} / 1,000 = 0.5 \times 10^{-6} = 500 \times 10^{-9})$ になったと、筆者は騒いだこともあった。なお、広く普及している配線の数が 2 本の通常の電気回路と電源では、出力電流が 1,000A のとき、電磁ノイズの大きさは良くても 1A 程度で、ミリワールドの世界 $(1 / 1,000 = 1 \times 10^{-3})$ が限界であるのが常である。これに対して、電磁ノイズの一種である電磁波の放射が起きているかどうかについては観測しなかったが、ほとんどゼロであったと信じている。

さて、筆者は、もう 1 台、「対称 3 線方式」の電気回路と電源を製作する機会を得た。幸運な巡り合わせの連鎖とも呼べるもので、読者の皆さんには耳障りかもしれないが、紹介させて頂く。筆者は、HIMAC で重粒子線がん治療が 6 月に始まった 1994 年の 11 月に、放医研から阪大核物セ（大阪大学核物理研究センター）に転任した。既設で稼働中のリングサイクロトロンは世界屈指の規模を誇る大型装置である。しかし、安定性や再現性が少し不足しており、結果的には、その性能向上に取り組んだ。ただし、最高性能は長時間継続しないものの、世界で最高の性能であった。ところが、転任直後の 1995 年の 1 月に、阪神淡路大震災が起こった。このサイクロトロンは 6 つのセクターからなり、1 セクターは 200 トンであるから、合計 1,200 トンの大型装置であり、この大地震のため動いてしまい、位置がずれてしまった。その位置修正の作業が行われたが、設計製作に取り組んだことがなかったので、筆者は手を出さず、皆さんの作業を見守るしかなかった。

さて、リングサイクロトロンの運転も再開され、筆者は、デスクワークではあるが、安定性や再現性の調査研究に邁進していた。その頃、突然、三菱電機より、シンクロトロン加速器用の「対称 3 線方式」の電気回路と電源についての「民間等との共同研究（当時、民間からの研究費に、国からはその 50%が積み増しされた）」の申し入れがあった。何が起こっていたのであろうか。当時、兵庫県の播磨科学公園都市では、大型放射光施設

SPring-8 の建設が震災前の 1991 年に始まっていた（最初の放射光は震災後の 1997 年確認）。その入射加速器である 8GeV 電子シンクロトロン（ESR）の電磁石と電源に関する話である。その電源は競争入札され、複数のメーカーが応札したが、落札したのは、HIMAC シンクロトロン（SR）の電磁石と電源を製作した日立製作所であった。その理由は、性能が一番良くて、価格は一番安いということであった。そう言えば、HIMAC では、工場で社内試験を終えた後、放医研の現場に持ち込んで、運転を開始したが、これと言う初期故障がなかったし、その結果、それまでの工程の遅れを取り戻し、一気に、治療が、所定通り、順調に開始された。その他、筆者が失念してしまった事情があるのかも知れないが、とにかく価格も安くできたのであろう。「対称 3 線方式」の電気回路と電源により電磁ノイズが少なくなると、電源も、良からう、安からうの時代を迎えたのである。

ところで、播磨科学公園都市の SPring-8 に近接した場所に、兵庫県立粒子線医療センターが設置されることが震災前の 1994 年に決定しており、三菱電機は、それを受注したいと考えていたようである。そこで、シンクロトロン加速器の電磁石と電源を自社で製作したいと思ったに違いない。それで、阪大核物セと民間等との共同研究を申し入れたと思われる。なお、兵庫県には、1994 年に、放医研で同僚であった板野明文が転任しており、もちろん、電磁石の上コイルと下コイルとは分離して配線する方式を採用した。なお、四極電磁石のコイルの分離に当たっては、N 極と N 極および S 極と S 極とにたすき掛けしたのは彼である。

そうは言っても、阪大核物セにはシンクロトロンはないので、民間等との共同研究の課題はパルス装置ではなく、直流電源とした。ところが、直流負荷さえないことにやっと気付いた。筆者は、配線の数を 3 本にすると言うようなこだわりを持つ一方、何となく間が抜けているようであるが、ここでまた、幸運に巡り会った。KEK（当時の高エネルギー物理学研究所、現在の高エネルギー加速器研究機構）では、1994 年から KEKB の建設が始まっており、そのため、当時運転中であったトリスタンの共同利用を 1995 年に終了し、トリスタン加速器の解体が始まった。その長尺偏向電磁石を負荷として 4 台譲り受けた。

こうして設計製作した「対称 3 線方式」の電気回路と電源の回路図を図 2 に示す。図 1 との大きな違いは、図 2 の上下対称な位置にある自己インダクタンスは長尺偏向電磁石の単体で、単なる自己インダクタンスで、相互インダクタンスで相互作用していないことである。また、受変電トランスは特注品で、その静電遮蔽は、一次巻き線と二次巻き線の双方に施した。HIMAC の図 1 では、二次巻き線に静電遮蔽を施し、二次側即ち電源の出力側のアースとつないでやっていた。また、共同研究の図 2 の電源では、配線の数を 3 本にする有効性をチェックするため、中線を切り離すためのスイッチやコモンモードリアクトルトランスを生殺するためのスイッチを設けておいた。

この電源は直流出力ではあるものの、210V、3,000A を仕様としたので、それなりに大型の装置となった。特高受変電所からの配線引き回し、分電盤新設、等々の作業が必要であったが、研究協力員の高橋豊に大いに助けられた。また、三菱電機からは、松井重明、

内木功の協力を得た。筆者は、放医研 HIMAC では、「配線の数 が 3 本」の電気回路と電源の設計製作に当たっては大きいなる説明に奮闘したが、阪大核物セでの民間等との共同研究では力んで説明する必要もなかった。背後には、腹の座った優れた技術者がいるような気がした。

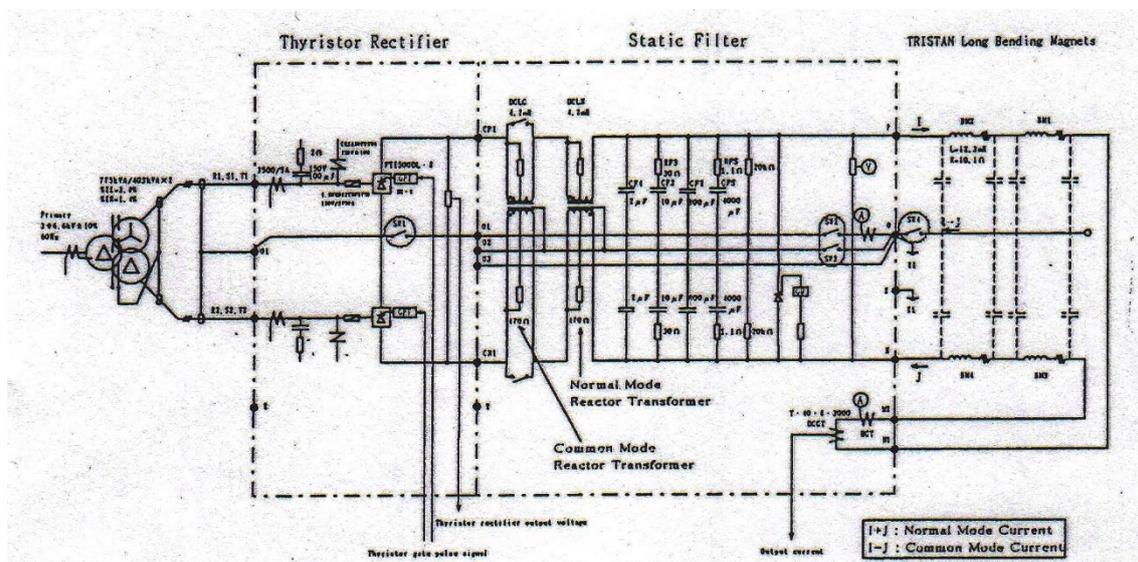


図2 整流トランスとサイリスタ電源のダイアグラム

また、図 3.1 と図 3.2 には、ノーマルモードフィルターとコモンモードフィルターのそれぞれの特性の測定結果を示す。両者の特性はほとんど同じ振る舞いを示しており、実際、いずれのノイズも制御されており、電磁ノイズの大きさは 2ppm 程度であった。なお、図 2 の電源には、図 1 の電源に取り付けたリアクトルトランス方式のアクティブフィルターを設けておらず、従って、2ppm というノイズは静的フィルターのみで実現されたものである。

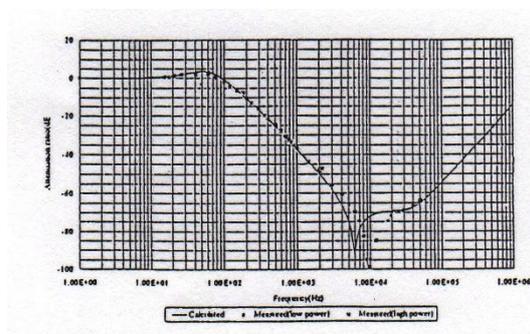


図 3.1 ノーマルモードスタティックフィルターの周波数特性

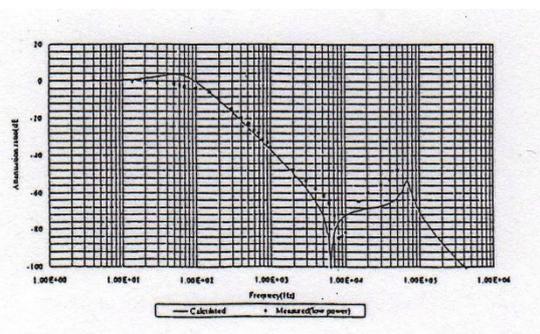


図 3.2 コモンモードスタティックフィルターの周波数特性

ここで、図 3.2 のコモンモードノイズフィルターの明瞭な高性能に目を奪われた読者も多いかと思う。この高性能は、「対称 3 線方式」の電気回路と電源において、コモンモードチョークのリアクトルトランスの後段にコンデンサーを設けたフィルターの果たした役割が大きい。「配線の本数が 2 本」の電気回路や電源では、実現できなかったコモンモードフィルターが、鮮やかに実現されるのである。言い換えれば、「配線の本数が 2 本」の場合の単なるコモンチョークコイルではコモンモードフィルターは実現されることはなく、「配線の本数が 3 本」の場合のリアクトル+コンデンサーの低域通過フィルターこそが、電磁ノイズの削減には必要であることを示している。

話の繰り返しになるが、「図 3.2 コモンモードスタティックフィルターの周波数特性」は、配線の本数が 3 本であるために、2 本の主配線に設けたコモンモードチョークコイルのそれぞれの出力を、中線とコンデンサーでつなぐことで実現されている。フェライトコアのようなコモンモードチョークコイル単体のみをコモンモードノイズフィルターと呼ぶ解説が見かけられるが、コンデンサーが利用されていないので、減衰特性は図 3.2 より 40dB ほど悪いようである。言い換えれば、「対称 3 線方式」の電気回路と電源にして、初めて、実現されたコモンモードスタティックフィルターである。

ところで、スイッチの生殺による電源の性能の変化の測定は、大学院修士課程の大学院生 (H.T.) の研究課題とした。スイッチ生殺の研究を始めた途端、その優秀な学生が血相を変えて、指導教官である筆者の居室に飛び込んできた。電源の何処かで何か焦げる臭いがし始めたので、運転を停止したとのことであった。発火する恐れがあり、「大学院生に危険が及ぶ課題を研究させてはならない」と強い口調で抗議された。筆者としては、電磁ノイズが変化するだけと考えていたが、そうではなく、発熱、発煙、発火の危険な道をたどる可能性があったようである。筆者は、オロオロしていただけでなく、自分の至らなさに思いを馳せ、反省することしきりであった。メーカーに連絡を取り、焦げ跡の有無の他、電源の動作に異常がないかを調査してもらったが、異常箇所も見当たらず、事なきを得た。これにて、この研究課題は終了とした。

しかし、筆者の直感ではあるが、今にして思えば、「対称 3 線方式」の電気回路と電源を、スイッチにより「配線の本数が 2 本」の広く普及している電気回路と電源に変化させると、トラブルが発生すると言うことが心に刻まれた。中線を切り離すためのスイッチとコモンモードリアクトルトランスを生殺するためのスイッチでは、異なる事象が起こると思うが、コモンモードノイズが抑制されないと言う点では、同一であろう。従って、コモンモードノイズは発熱、発煙、発火の危険な道をたどる原因となりうると筆者には思える。言い換えれば、「配線の本数が 3 本ではない」、バッテリーは、AC アダプターと同様に、広く普及している「配線の本数が 2 本」の電気回路の代表であり、発熱、発煙、発火の危険な道をたどる可能性があると思う。バッテリーは、そのものの直流電圧で使用されることはなく、直流→交流と変換されたり、直流→交流→直流と変換されて利用されている。こうした直交変換や交直変換に際してスイッチングが行われ、このとき発生するコモ

ンモードノイズが様々なトラブルの原因となりうる。しかし、「配線の本数は2本」と思い込んでいるから、コモンモードノイズの経路は不詳である。

バッテリーは「配線の本数が2本」の電気回路の1つであるが、コモンモードノイズの発生源は数理的に解明できないため、コモンモードフィルターを設けることができず、コモンモードノイズが発熱、発煙、発火の原因とすると、こうしたトラブルには対症療法で解決しているものと思われる。一言で言えば、発熱、発煙、発火の痕跡を認めれば、そこを強化するのである。しかし、少なくとも発熱は続いているので、電力の無駄遣いは続くことになる。

ここからは、余談である。先に紹介したように、2021年現在、国内では、重粒子線あるいは陽子線のがん治療施設として、17台の国産のシンクロトロン加速器が稼働中であり、複数の企業が建設に関わってきている。既に、日立製作所と三菱電機との関わり合いを紹介したが、ここでは、東芝について紹介したい。

シンクロトロンで重粒子線を加速するには、周波数が広帯域で連続的に掃引できる高周波加速空洞が必須の装置であるが、それに加えて、高周波電力を供給する真空管電力増幅器が容易ではない。筆者は、放医研に転任する前、東大核研のクーラーシンクロトロンリング TARN II で、高周波加速空洞と最終段増幅器の開発を行っていた。そのとき、東芝の香月健治、小平政宣、山岸俊雄、山崎長治の皆さんの協力を得た。連続可変の周波数範囲は1MHzから7MHzとし、寄生共振は1MHz以下と7MHzの3倍の21MHz以上と設定した。寄生共振の話に限れば、1MHzから21MHzの20倍以上の範囲に現れないように、制御しなければならず、そのため、現場では、皆さんにこまごました仕事をお願いした。参考のために一言補足しておけば、寄生共振に寄与するインダクタンスについては、共振周波数を高くしたいときは厚さが薄く幅の広い銅板を採用（インダクタンスを減らす）し、共振周波数を低くしたいときは細い銅線（インダクタンスを増やす）を採用すれば良い。このとき、難しいのは、共振周波数を低くしたい場合で、配線を細くすると、オームの法則による発熱量が多くなって、高温になる。ギリギリいっぱい、温度上昇の問題を避けることができたのは幸運であった。

ところで、この研究に先立って、筆者は、1982年、約10か月間、ドイツ（当時は西ドイツ）のダルムシュタットにある重イオン科学研究機構 GSI にて、当時、建設予定の重イオン・シンクロトロン SIS の高周波加速空洞の開発研究に携わった。そこでは、連続的に周波数を掃引して行くとき、寄生共振が発生しており、その周波数を制御するには、加速空洞を正面から見て、電気的な配置を左右対称にすれば良いことを見つけ出した。そこで、「対称8の字型フェライトバイアス巻き線方式」の周波数広帯域高周波加速空洞と呼ぶことにした。寄生共振の周波数は、電気回路の幾何学的な配置の対称性の良し悪しで制御できることに気付いたのである。

東大核研では、SISの加速空洞を下敷きにして、さらに、丁寧に電気回路の調整を行ったところ、寄生共振は、1MHzより低い0.7MHzに制御でき、7MHzの3倍の周波数よりさらに高い28MHzに制御できた。これにより、電気回路の対称な配置の素晴らしさが心に焼き付いた。

そうこうしているうちに、意外な展開が起こった。図1をご覧ください。電源の負荷は、電磁石の上下コイルを切り離して直列につないだ回路であるが、よくよく見ると、それぞれの電磁石コイルには抵抗が架橋してある。この抵抗がなければ、インダクタンスとコンデンサーの繰り返し回路であり、共振が発生する。N台の電磁石をつないだとき、1台の電磁石の共振周波数の1/Nの周波数で共振が起こる。この共振を抑制するために抵抗を架橋し、その抵抗の値を小さくして、減衰振動にしたり臨界減衰にするのだが、その計算を東芝の皆さんに話したところ、皆さんが驚いたのである。彼らの何人かは電気事業部の人たちだったのであるが、その当時、東芝がKEKに納入した電磁石電源で既設のシンクロトン加速器の運転を始めたところ、加速器の真空ダクトが一斉に音を出し始めたのである。スイッチング素子にはスナバー回路で急激な変化を和らげるが、その結果、純粋な振動が減衰振動に変化するが、それでも電氣的な振動が発生する。この振動が電源の出力となるが、これにより、直列につないだ電磁石の共振を励起する。さらに、磁極の間隙に設けられている真空ダクトには渦電流が発生し、それが振動するため、真空ダクトの固有の機械的な振動を励起したようである。そこで、こうした一連の振動を抑制するために、電磁石のコイルの出入り口にコンデンサーと直列抵抗を架橋したとのことである。このコンデンサーにより、電磁石の共振周波数が制御されたのである。

筆者は、直列につないだ電磁石の共振についての計算を行っていたことになる。しかし、筆者は、東大核研で電磁石と電源を研究していたわけではないので、単に、計算を楽しんでいただけのことである。高周波加速空洞の開発に協力してくれていた東芝の皆さんこそ、電源のプロであった。しかし、「対称3線方式」の電気回路と電源が電磁ノイズを制御してゼロにできると言う知識は持ち合わせてはいなかった。

そうこうしているうちに、東芝と三菱電機の電気産業分野を事業統合して、東芝三菱電機産業システム株式会社 TMEIC が発足したことを知った。日本加速器学会の年会で、国内のとある重粒子線がん治療装置のシンクロトン加速器の電磁石の電源の TMEIC による報告を見かけたが、山崎長治が論文筆頭者で、内木功が共著者の一人になっていた。この話とは別に、日立は国内外で粒子線がん治療装置を展開していることは既に知られている。

いずれの企業の皆さんは「対称3線方式」の電気回路と電源を採用していると思い、皆さんのさらなる発展を祈念しているが、筆者の思いはそれだけに留まらない。電磁ノイズを制御してゼロにできるのは、シンクロトン加速器の電磁石と電源に対してだけではない。恐らく、皆さんはパワーエレクトロニクスの分野で大活躍されていることと思い、電

磁ノイズを減らすべく、様々な分野で「対称3線方式」の電気回路と電源を挑戦していただきたい。

以上は、図1と図2は、「対称3線方式」の電気回路と電源を、回路図に重きをおいて説明してきたが、以下では、実現された性能を、図3.1と図3.2のフィルターの特性に倣って、数値的に説明しておきたい。

電磁ノイズを制御してゼロにするために、配線の本数を3本にして、そのうちの1本を中線と呼び、残りの2本の配線を主配線と呼び、2本の主配線のそれぞれと中線との間に、2端子集中定数回路素子からなる同じ回路網を幾何学的に対称な位置に組み込んだ「対称3線方式」の電気回路を思い付き、交流-直流変換器（AC-DCコンバータ：ADコンバータ）である、サイリスタをスイッチング素子とする48相整流方式のスイッチング電源とともに、エイッとばかりに思い切って、実際に製作した。ただし、48相整流は位相が異なる24相整流を2段直列に積み重ねたもので、この電源の中心は、負荷である電気回路の中線につながり、また、この中心は大地に接地してあり、従って、電気回路の中線は1点接地されている。この実践で、期待通り、スイッチングに付随する電磁ノイズは制御され、ほとんどゼロになった。

本稿では、この配線の本数が3本の電気回路と電源の実践に当たって、筆者が、その昔、考えたこと（今にして思えば、正しかったこともあり、間違いだったこともある!!!）も振り返りながら、「対称3線方式」の電気回路で、何故、電磁ノイズが制御できてゼロになったのかについて、近似やモデルを動員して、「ハイブリッド電気回路理論」を数理的に構築することによって、その理由の解明に取り組んでいることを紹介する。

その昔の実践から25年近くも経って、最近、やっと、数理的に、しかし、ほとんど馴染みがない理論が可能であることに気付いたのである。なお、「ハイブリッド」と称するのは、電氣的影響に関して、近似やモデルが異なる2通りの考えであるコンデンサーと電位係数（自己電位係数と相互電位係数の2種類がある）を、この電気回路理論では同時に取り扱い、それらを統合すると言う、全くと言っても良いほど、これまでに馴染みがない考えに挑戦しているからである。即ち、電気回路理論は物理学の法則である電磁気学に従わない部分があるとして良いと考えるのである。今までは、「電気回路は電磁気学に従う」として、「電磁気学は自然現象を説明する」ので、電気回路はまるで自然現象を具現化するものとして設計していると考えてきたが、それは考え違いであると考えてのである。また、こうした考え違いが原因で、何処となく謎めいた電磁ノイズが発生していると考えてのである。言い換えれば、「電気回路は人工物」であると考えてるが、そのため、自然現象を数理的に説明する電磁気学のみでは、電気回路における電磁ノイズの説明ができないのである。敢えて例えて言えば、日ごろ慣れ親しんでいる配線の本数が2本で2端子集中定数回路素子の回路網が繋がった通常の電気回路理論を猛烈に勉強したとしても、電磁ノイズを制御してゼロにするための数理的な根拠が得られず、筆者が思い付いたような、配線の本数を3本にすると言う飛躍は容易ではないと言えるのかもしれない。なお、

本稿では、電磁ノイズはノーマルモードとコモンモードとアンテナモードの3種類に分類できることを示すが、この3種類のモードこそが、配線の本数が3本であることに相当しているのである。しかも、この3種類のモードは一般的には結合していて、お互いに変換しあうのである。このとき、電気回路で処理して生成したい信号はノーマルモードであるが、信号を生成するとき、結合と変換により、コモンモードノイズとアンテナモードノイズが電磁ノイズとして発生する。こういう事情であるから、電磁ノイズを制御してゼロにするには、3種類のモードが結合しあうことがなく変換しあうことがない特殊な配置の電気回路を設計し、さらに、「フィルターやシールド」を設ける必要がある。

そのため、筆者により、「対称3線方式」の電気回路と電源が考案され、実践によりコモンモードノイズとアンテナモードノイズは制御されたが、ノーマルモードノイズについては、特段の制御を不問に付している。必要に応じて、ノーマルモードノイズも制御して低減することを検討しなければならない。

ところで、何故、筆者が「対称3線方式」の電気回路を思い付いたのかを大まかに纏めておこう。複数の電氣的な装置（高周波加速装置、静電型ビームモニター、電磁石と電源）で、電磁ノイズを減らすために、エイッとばかり簡単に言えば、同じ装置を2つ製作して、それらを幾何学的に特殊な配置で設けて、両者の信号の和（差の場合もある）を測定することによって、当初に述べたように、電磁ノイズを減らすことに成功した経験があるからである。「対称3線方式」の電気回路はその一例と言える。こうした技法については、それなりの説明を要し、長々とした話になるので、本稿の本文中で解説することになるので、それを参考にしていただきたい。

ここでは、「対称3線方式」の電気回路と電源に関して、電磁ノイズの測定方法で気づいたことを簡明に紹介しておきたい。電磁ノイズを測定する測定器として、その昔は、信号の時間的な変化を測定する「オシロスコープ（略称：オシロ）」が主流であったが、比較的最近のことであるが、信号の周波数成分を分析する「スペクトラムアナライザ（略称：スペアナ）」が使用されるようになった。いずれも、電気回路技術の大いなる進歩に負っている。

[「オシロスコープ」、オシロスコープ - Wikipedia](#)

[「スペクトラムアナライザ」、スペクトラムアナライザ - Wikipedia](#)

オシロは、信号の周期的な時間変化である波形を測定し、横軸を時間にし、縦軸を信号の振幅にして表現する装置である。スペアナはオシロに比べて比較的新しい測定装置であるが、信号の周期的な時間変化の周波数分析を行い、横軸を周波数にし、縦軸を信号の周波数分析したときの振幅あるいは電力の強度を表現する装置である。いずれの測定器も多用されているが、スペアナの測定データには定量性があるので、愛用されることが多い。しかし、スペアナでは、電磁ノイズの性質がつまびらかではない場合、どの周波数成分がノーマルモードノイズなのか、コモンモードノイズなのか、さらには、アンテナモードノイズなのかが目では見抜けない複雑なものになっている。もちろん、オシロの測定デー

タでも、単純な波形として電磁ノイズが観測されるわけではなく、減衰振動状の波形であることが多い上、その振動が何処から来ているのかが不明であるため、電磁ノイズの原因は多くの場合判然としない。

その点、筆者にとって幸運だったことであるが、自分自身で測定しなかったのにも関わらず、オシロの測定データとスペアナのデータの両者に、それも素晴らしいデータに出会えた。しかし、それらのデータの詳細な説明をここでは省略するので、「佐藤・シンクロトロンでは電源良ければ全てよし：HIMAC から J-PARC・MR へ」を参考文献として示しておきたい。

佐藤健次、「シンクロトロンでは電源良ければ全てよし：HIMAC から J-PARC・MR へ」、杉本健三先生記念論文集、原子核研究 Vol.57, Supplement 5, June, 2013 [SatoK-F \(wordpress.com\)](http://SatoK-F.wordpress.com)

この報告の 12 頁の「図 4」は、田邊徹美・渡辺伸一が東大核研（東京大学原子核研究所）のクーラーリング TARN II で測定した、電磁石励磁電流のオシロのデータである。電磁ノイズは、入射波に遅れて、位相が異なる（位相が逆転した）反射波からなることに、筆者は気づいた。入射波はノーマルモードで、反射波はコモンモードであることが、電磁ノイズの波形を目で見ることができて、何が起きているかを理解できたのである。オシロの凄さに感銘を受けた。また、16 頁の「図 8」は、中村衆が J-PARC・MR で、通常の「2 線方式」の電気回路を、「対称 3 線方式」の電気回路に更新したとき測定した、更新前後の電磁石励磁電流のスペアナのデータである。これまた、スペアナの凄さに感銘を受けた。

「図 4」では入射波と反射波は電磁石のコイルに架橋した抵抗（筆者が架橋抵抗を提案した）で電磁ノイズは低減され、特に、コモンモードである反射波は架橋抵抗を小さくすると急速に減衰した。なお、この架橋抵抗は、本稿の 12 頁辺りで紹介した、東芝が KEK に納めた電磁石電源で生じた不具合を解決するため、コンデンサーと抵抗を直列につないで電磁石のコイルに架橋したものに相当し、筆者はその効果を計算していたが、電磁ノイズを減衰するためにも効果的であったと言う話である。しかし、減衰したとは言え、ノーマルモードの電磁ノイズの大きさは、図中にあるように、信号に対して、振幅で 1/1,000 程度である。また、「図 8」では配線の対称化（ただし、多数の電磁石を 6 つのセクションに分け、独立した 6 台の電源を同期させながら励磁運転した：電磁ノイズが低減したため、精確な同期運転が実現された!!!）により、コモンモードと思われる電磁ノイズの線スペクトルの多数が低減された。それに加えて、連続スペクトルも低減され、特に、連続スペクトルの低周波成分も低減されている。このように、「2 線方式」の電気回路を「対称 3 線方式」の電気回路に変更した例は世界には J-PARC・MR の 1 台しかなく、その電磁ノイズの変化の測定は世界で唯一である。しかし、J-PARC・MR では、既設の装置の配線変更作業を行ったため、完全な「対称 3 線方式」の電気回路は実現されておらず、特に、電源については、出力端子は 2 端子のまま「対称性の破れ」が残されたままであった。

これらを克服して、元々「対称3線方式」の電気回路を設計・製作した場合には、より良い性能が実現される可能性は高いことが期待されている。実際、配線変更作業の2年後の、小林仁による「小林・J-PARC 加速器の現状とMRの課題・展望」と題する報告では、先に紹介した「図8」と同じ図を用いて、その成果と今後の展望が議論されている。

小林仁、「J-PARC 加速器の現状とMRの課題・展望」、高エネルギーニュース Vol.29 No.4 2011/01.02.03

[Microsoft Word - 113kobayashi-03.doc \(jahep.org\)](#)

その報告の「4. MRの重要パラメータの決定」の章では、50GeV加速を設計値としながらも、配線更新の結果、30GeV加速を選んだ事情が説明され、「4.2 MRの電磁石電源問題と配線」の節では、電磁ノイズを低減するために、当初の「2線方式」の電気回路を配線変更して「対称3線方式」の電気回路にすると、「MRを壮大な実験の場とした」ことが語られている。「J-PARC オンライン施設公開2020」にもあるように、MRの周長は1,500m強であり、3,000A強の電流を流す配線の変更であるから、簡単な作業ではなかったようである。

その配線変更の痕跡は施設公開の動画に見ることができる。J-PARCのMRの加速器の内周にはケーブルラックが設けられているが、各偏向電磁石や各四極電磁石の端部には、「2線方式」の電気回路から「対称3線方式」に変更した盤が見受けられる。

[J-PARC オンライン施設公開2020](#), [J-PARC | MR \(j-parc.jp\)](#)

しかし、その結果として、「電源と配線の両方に対称化が必要であり、この場合に限って、コモンモードとノーマルモードとは結合しなくなる」ことが語られ、そのとき、「コモンモードが存在していても、ノーマルモードだけを利用できる」ことが語られている。実際、「図8」の下のスペアナの測定図は、「対称化後に、プラス電極とマイナス電極に設置した同形電流モニタの差である」ことが語られている。このことは、既設の電源がコモンモードを発生していることを意味している。この測定により、ノーマルモードのみが観測されているが、それを抑制するには、ノーマルモードノイズを測定し、高速のDSP (Digital Signal Processor)で処理して、何らかの方法で負帰還制御あるいはノイズキャンセリングの方法で相殺できると考えられている。こうした方法が実現された暁には、マイクロワールドである 10^{-6} の世界を超えることができそうである。

J-PARC・MRでの配線変更の結果は、「対称3線方式」の電気回路は電磁ノイズを制御してゼロにできるというHIMACでの成果を強く支持するものである。以上から、電磁ノイズを制御してゼロにする電気回路は、配線の数を3本にして電気回路と電源を対称に設ける「対称3線方式」の電気回路であると言える。言い換えれば、3本の配線の配置が対称でないときには「対称性の破れ」があり、2つある2端子集中定数回路の回路網が異なっているときには「対称性の破れ」があり、また、電源の配置に「対称性の破れ」があるときには、ノーマルモードとコモンモードとアンテナモードの3種類の電磁ノイズが発生すると同時に、3種類のモードが結合して変換しあっており、従って、それぞれのモードを独立に制御できないため、電磁ノイズを制御できず、低減できないことになっている。

ただし、ここで言う「対称性の破れ」が、場の理論で言う「対称性の破れ」と同じ意味であるかどうかは判然とせず、筆者には判断できない。「対称性の破れ - Wikipedia」によれば、「対称性の破れとは、場の量子論において、ある高い対称性をもちうる理論が、より低い対称性を持つ状態になっていることを意味する」と説明されており、その気になれば、電磁ノイズの原因も「対称性の破れ」として説明できるのかも知れない。

[対称性の破れ](#) [対称性の破れ - Wikipedia](#)

ここでは、敢えて、このシナリオに沿って、検討してみよう。「ある高い対称性をもちうる理論」として、平行に置かれた直線状の配線の本数が3本で、中線と呼ぶことにした3番目の配線に対して、主配線と呼ぶことにした1番目と2番目の配線が、全て同じ太さの円形で、例えば、正三角形の頂点に置かれているとし、中線と主配線との間に、2端子集中定数回路素子の同一の回路網が、それぞれ設けられているとする。筆者は、この配置を「対称3線方式」の電気回路と呼んだ訳であるが、この配置であれば、3本の配線の間で発生するノーマルモードとコモンモードおよびアンテナモードの3種類の電磁ノイズのうち、コモンモードノイズとアンテナモードノイズはゼロになりそうである。

さらに、凄いことを予測できそうである。2端子集中定数回路素子と言う近似やモデルでは無視された残留相互作用とも呼べる相互作用についても、コモンモードノイズとアンテナモードノイズは相殺してゼロになりそうである。配線3（中線）と配線1（主配線1）との間に設けられた回路網と、配線3（中線）と配線2（主配線2）との間に設けられた回路網を構成する2端子集中定数回路素子は近似やモデルであるが、厳密に言えば、全ての回路素子は、電気的には電位係数を通して、磁気的には誘導係数を通して影響を及ぼしている。そのため、2つの回路網の間では、電気的に、また、磁気的に影響を及ぼしており、2端子集中定数回路素子では計算し切れない残留相互作用が存在すると思える。しかし、電気回路の配置が対称であるため、コモンモードとアンテナモードとは相殺すると考えられる。この点では有利に働くが、ノーマルモードについては加算される可能性もあるので、何から何までうまくは行かないようである。

残留相互作用と言う、電気回路では聞いたこともない言葉を使用しているが、案外と分かりやすく、多くの人を知っていることかもしれない。例として、コイル（自己インダクタンス）を2つ直列につなぐことを想定しよう。電気回路図では、直線上に2つのコイルをつなげて示すが、実際にそんな配置を採用すると、一方のコイルの磁場が他方のコイルを通過するので、相互インダクタンスで、2つのコイルが相互作用する。これを避けるためには、2つのコイルは軸を直交させて配置するのが良い。「対称3線方式」の電気回路や電源では、2端子集中定数回路素子の回路網を対称な位置に2つ設けるが、そのときの回路素子の向きについては云々していない。回路素子を、配線に平行に設けるのが良いのか、直角に設けるのが良いのか、それとも、斜め45度に設けるのが良いのか、考えればキリのない話である。

ここではさらに脱線して、電位係数と誘導係数の関係を説明しておくのは有用であろう。いずれも複数のそれも多数の配線であっても、電位係数と誘導係数は配線の幾何学的な形状と配置で定まり、しかも、電位係数を誘導係数で割り算した商の平方根は一定で光の速さになるという特徴がある。配線の距離を近づけて電位係数を大きくすると誘導係数も大きくなり、その逆に、配線の距離を遠ざけて電位係数を小さくすると誘導係数も小さくなる。誘導係数が大きくなると磁気的エネルギーが大きくなることは容易に想像できるであろうが、電位係数と電気的エネルギーの関係は、電位係数に慣れ親しんでいないので分かりにくいかもしれない。電位係数はコンデンサーの逆数と覚えておけば、電位係数が大きくなると電気的エネルギーは小さくなると覚えておけばよいことになる。こうした考えは直流に対する性質で、交流に対しては、すっきりしないかもしれない。交流に対しては、特性インピーダンスで考えるのが良さそうである。特性インピーダンスはインダクタンスをコンデンサーで割り算したものの平方根であることからして、コンデンサーを大きくするのが、交流に対するインピーダンスが低くなる。このことは、電磁気的なエネルギーはコンデンサーの近辺に存在するので、コンデンサーから遠く離れた空間にまで電磁場が達することが少ないようである。こうした性質から、電気的ノイズと磁気的ノイズから成る電磁ノイズの大きさを好き勝手に制御できないことになる。電磁ノイズを制御してゼロにするためには、配線や2端子集中定数回路素子の回路網の幾何学的な特殊な配置を利用するという考えに至る。さらに言えば、「フィルターやシールド」あるいは接地やグラウンドでは電磁ノイズを小さくすることはできないのである。ただし、「対称3線方式」の電気回路と電源では、「フィルターやシールド」あるいは接地やグラウンドとは異なる概念である「対称性の破れ」が少ない配置で多用していることを断っておきたい。

ところで、配線の本数が3本の電気回路では、対称性は隠されることはなく明示的に見え、「対称性の破れ」もはっきりと見える。しかし、これに対して、現在広く普及している「配線の本数が2本」の2端子集中定数回路素子からなる電気回路では、対称性が隠されており、それに加えて、「対称性の破れ」があると言ってよいであろう。こうした「2線方式」の電気回路では、大地が3番目の配線となっており、2端子集中定数回路素子の回路網は主配線に相当する2本の配線の間には設けられているので、その大地が隠された対称性の一翼を担っていると考えておくほうが良い。「配線の本数が2本」の電気回路図を描いた途端、大地（地球）が描かれていないことは明白で、このことこそ、大地（地球）が隠されていることを意味している。そこで、コモンモードノイズの解説を探してみよう。

Electrical Information, 「『ノーマルモードノイズ』と『コモンモードノイズ』の違いや原因について」、detail-infomation.com

このwebサイトにはコモンモードノイズの回路図が示されており、コモンモードノイズの電流は大地を通してノイズ源になると説明されている。ただし、そのためには条件があって、電気回路と大地の間にノイズ源である電源が存在し、また、電気回路と大地の間には浮遊容量が存在するとされる。

筆者も、最近までは、大地と「2線方式」の電気回路の間の相互作用を浮遊容量で書き表していたが、それは電気的影響であり、磁気的影響を書き表すことができないことに頭を痛めていた。浮遊容量のみで表現するのは、実際に発生する電磁気現象を再現できないものと思われる。

多くの web サイトの説明は似たり寄ったりなので、こうした説明の是非をここでは問わないことにする。ただ、一言二言、申し添えておきたい。コモンモードノイズは信号と同時に発生することが多く、特段のノイズ源を持っていないことに注意しておきたい。この回路図では、電気回路は大地と浮遊容量（コンデンサー）で電氣的に影響を及ぼすかのようなようであるが、電磁気学の教えるところでは、電気と磁気との間には双対性の関係があるので、磁氣的に影響を及ぼすはずなのに、磁氣的に影響を及ぼすことが示されていない。この図の限りでは、浮遊容量を小さくすると、コモンモードノイズが減るかのようであるが、実際には、減ってくれない。電気的影響であるコンデンサーを減らすと、磁気的影響が大きくなるので、コモンモードノイズは減らないようである。

配線の数が2本の電気回路は、電気信号が伝搬するにつれて、3番目の配線である大地（地球）と電氣的に、またそれと同時に、磁氣的に影響を及ぼして、信号そのものが電磁ノイズに変換されて、コモンモードノイズやアンテナモードノイズが発生する。2本の配線が大地（地球）と平行に走っているとしよう。このとき、配線の1本は大地に近く、もう1本は大地から遠い。大地に近い配線は大地との間の電気的影響が大きくコンデンサーが大きい、磁気的影響は小さい。大地から離れている配線は大地との間の電気的影響が小さくコンデンサーが小さいが、磁気的影響は大きい。2本の配線のこうした違いが、2本の配線を伝搬する信号により、コモンモードノイズやアンテナモードノイズに変換される。こうした変換が電磁ノイズの原因であるため、その原因を想像したり特定するのは難しい話である。

さて、2本の配線の電磁気的な現象の違いを克服するために、先人は、2本の配線をツイストする方法を開発した。ツイストすると2本の配線がよじれて交差するが、そのとき作るループが交互に反転するため、それが平均され、その平均値はゼロになると考えられた。この考えでは大地（地球）の存在は無視されているが、ツイストによって、2本の配線の大地（地球）からの平均距離は等しくなり、「対称性の破れ」がない場合に変化して、信号が2本の配線を伝搬するとき、配線が大地（地球）との相互作用が等しくなり、その結果、信号がコモンモードノイズやアンテナモードノイズに変換されることがなくなっている可能性が高い。繰り返しになるが、「ツイスト」は「対称性の破れ」を解消しているのである。

配線の本数が2本の電気回路では、大地の存在が「対称性の破れ」を引き起こしている原因の1つは、2本の配線が大地との距離が等距離ではないことに起因している。言い換えれば、大地を含めて配線の本数が3本になるとき、元の2本の配線が大地に対して等距離にはならず、「対称性の破れ」を作っているのである。繰り返しになってくどい話になるが、電磁ノイズは、信号を発生させる操作で、発生するのである。このとき、いささかでも「対称性を回復」するには、配線をツイストするのが良い。2本の配線と大地との距離が平均として等距離になるからである。この説明で重要な点は、電気回路で信号を発生させるとき、その電気回路自身が電磁ノイズを発生させると言うことで、電磁ノイズは必ずしも外部に起源があるわけではないと言うことである。

今一度、現在広く普及している「2線方式」の電気回路では対称性が隠されていることについて、この場を借りて、手短かに考察しておこう。現在広く普及している電気回路理論は、2本の配線に、2端子集中定数回路素子の回路網をつなぎ込んだものであるが、この「2線方式」の電気回路理論は、元々、近似やモデルであることが広く知られているところである。ところが、その一方で、この電気回路理論は、百数十年前に始まり、多岐にわたる数多くの実践で成果を挙げ、現代の科学技術を根底から支えていることもあって、近似やモデルであることが忘れられてしまいがちである。

ただ一つの例外とも言えるのが、電磁ノイズの起源が不明であるのと同時に、電磁ノイズを制御してゼロにする方法が判然としないことである。しかし、筆者による「対称3線方式」の電気回路と電源では、電磁ノイズを制御してゼロにすることができた。その点では、電磁ノイズを制御してゼロにする「対称3線方式」の電気回路と電源を発明したと言えるが、しかし、これまでに繰り返し述べているように、この方法の数理的な根拠が不明である。

そこで、どんな近似やモデルであるのかについて、この場で、簡単に、復習しておこう。2端子集中定数回路素子は、コンデンサー、インダクタンス（ただし、自己インダクタンスと相互インダクタンスからなる）、および、抵抗からなる。このうち、最大の近似やモデルは、電気的な相互作用を、2導体に基づくコンデンサーとして表していることである。それと同時に、交流では、このコンデンサーには変位電流が流れ、コンデンサーの2端子ではインピーダンスやその逆数のアドミタンスが定まり、キルヒホフの電流則とキルヒホフの電圧則が成立するとされる。これに対して、磁気的な相互作用は、自己インダクタンスと相互インダクタンスの2種類で表されており、電気的な相互作用を表わすコンデンサーに比較すると、自由度は高く、柔軟である。こうした自己インダクタンスと相互インダクタンスに対しても、それらの2端子ではインピーダンスとその逆数のアドミタンスが定まり、キルヒホフの電流則とキルヒホフの電圧則が成立するとされる。このように、電気的相互作用は1種類の素子で表され、磁気的相互作用は2種類の素子で表されると言う、近似やモデルが採用されている。

2端子集中定数回路素子のそれぞれにインピーダンスやその逆数のアドミッタンスを定義し、キルヒホフの電流則とキルヒホフの電圧則を適用するようになったのは、それ以前に発見されていたオームの法則を、キルヒホフが一般化したからのようである。「太田・マクスウェルの渦 アインシュタインの時計 現代物理学の源流」によれば、「第3章 ミラボー橋の下をセーヌ河が流れ」の章の「3.6 キルヒホフの電位と電流」の節にある「オームの法則」と題した副節では、オームの法則は1826年に発見され、キルヒホフは1845年にそれを拡張したようである。

太田浩一、「マクスウェルの渦 アインシュタインの時計 現代物理学の源流」、東京大学出版会、2005年9月20日初版

しかし、オームの法則は、現代の電磁気学では、物理の基本法則ではなく、現象論的な法則であるとされている。このような、言いがかりにも近い筆者の説明からすると、インピーダンスにしる、キルヒホフの電流則やキルヒホフの電圧則も、物理の基本法則ではない可能性もある。筆者にしても、ここまで話を広げてしまうと、やり過ぎなのかもしれない!!!と考えるはいるものの、その一方で、配線の本数が2本の電気回路理論を信じ込みすぎる場面に遭遇するとも限らないとも思う。

さて、コンデンサーと言う近似やモデルは、配線の本数が2本のときの分布定数回路の伝送線路理論でも採用されており、例えば、「伝送線路ウィキペディア」の「電信方程式」の節の「回路素子で表記した伝送線路の回路図モデル」では、配線の1本は抵抗とインダクタの直列回路で表され、2本の配線の間はキャパシタンス（本稿では、同じものを、コンデンサーと呼ぶ）とコンダクタンスの並列回路として表されている。このとき、分布定数回路であってもキルヒホフの電流則とキルヒホフの電圧則とが成立していると考えられる。

[「伝送線路」、伝送線路 - Wikipedia](#)

その「歴史」の節を見れば、トムソン（後のケルビン卿）が大西洋海底横断ケーブルの敷設に際して研究したのは、同軸ケーブルで、芯線は、インダクタではなく、抵抗の場合であった。その考えをひっくり返したのは、「電信方程式」を提唱したヘヴィサイドで、同軸ケーブルを考案したとき、芯線は、抵抗ではなく、インダクタの場合であった。多くの参考書や教科書では、「電信方程式」において、抵抗とコンダクタンスを無視したとき、「電信方程式」に登場する特性インピーダンス Z_0 を、インダクタをコンデンサーで割り算した値の平方根 $Z_0 = \sqrt{L/C}$ と定義できることが説明されている。電氣的相互作用は、2端子集中定数回路素子の回路網だけに限らず、分布定数回路の場合でさえも、コンデンサーで良いことが示された。さらに、ヘヴィサイドは装荷コイルを考案して、長距離通信を実現する道を拓いた。しかし、二人とも、2本の配線の間に対しては、コンダクタンスを無視してコンデンサーを採用した。なお、装荷コイルを不要とする、無装荷ケーブルを考案したのは、東海大学の創始者の松前重義であった。

[松前重義と建学の精神 | 建学の精神 | 東海大学 \(u-tokai.ac.jp\)](#)

さて、伝送線路と同じ形状で身近に見かけるものは、ACアダプターと呼ばれる、パソコンなどに直流電力を供給するケーブルであろう。ACアダプターの本体は、交流を直流に変換する交直変換器であり、そのケーブルをパソコンにつなぎ込むが、その直前には、フェライトコアが設けられていることが多い。交流を直流に変換するに際して、スイッチング技術を利用するため、完全な直流を得ることはできず、時間的に変動する成分が不可避免的に発生する。フェライトコアは2本の配線ケーブル全体を貫通するように設けられ、このことより、2本の配線ケーブルには異なる電流が流れていることを示唆している。このとき、大地を3番目の配線と考えれば、2本のケーブルにはコモンモードノイズが発生しており、大地を無視すると2本のケーブルが1本のアンテナと化して、電磁波を放射していることを意味している。従って、「対称性の破れ」が発生しており、かつ、隠されていると言えよう。なお、ACアダプターではパソコンなどに直流電力を供給するのが目的であるが、交直変換に際して、時間的に変動する交流現象が発生し、それにより、コモンモードノイズとアンテナモードノイズが発生する。

さて、問題は、配線の本数が3本になったとき、配線間の電氣的相互作用をコンデンサーとすると、変位電流が存在できるとしてキルヒホフの電流則を適用すれば、電磁ノイズに関して、「対称3線方式」の電気回路であろうとなかろうと、放射ノイズ（本稿ではアンテナモードノイズと呼んでいる）が発生しないと言う、下記に述べるような計算になり、筆者による「対称3線方式」の電気回路の実践とは異なると言う、数理的な問題が生じる。

コンデンサーとして変位電流が流れるとすると、キルヒホフの電流則により、3本の配線を通る伝導電流の総和が、理論的に、ゼロになる。電流の総和は、3本の配線を1本の配線とみなしたとき、その1本の配線に流れる電流と考えられるので、その電流の総和がゼロになると、3本の配線から電磁波の放射が起こらないことになる。いわゆる、放射ノイズと呼ばれる電磁ノイズが発生しないことになる。即ち、アンテナモードノイズは発生できないことになる。コンデンサーと言う近似やモデルの限界である。

なお、余談であるが、配線の本数が2本の場合で、大地が3番目の配線の場合には、3本の配線の電氣的な相互作用がコンデンサーであるとしても、2本の配線にはゼロでない電流が流れるので、このノンゼロの電流はコモンモードの電磁ノイズとして観測されることになる。こういう説明が可能であるが、この場合でも、アンテナモードノイズは発生できないので、電磁波の放射は起こらないことになってしまう。

筆者の実力では、数理的な説明はここまでであるが、コンデンサーに代わる、電氣的相互作用として、自己電位係数と相互電位係数から成る電位係数に気付いたのは、土岐博である。

土岐博・佐藤健次、「アンテナ過程を含む交流回路理論と電磁ノイズの削減」、日本物理学会誌 Vol.68, No.1 (2013)11-18. [ja\(jst.go.jp\)](http://jst.go.jp)

筆者は、例えば、「佐藤・シンクロトロンでは電源良ければ全て良し：HIMAC から J-PARC・MR へ」の報告では、「電位係数は凄い!!!」と呼んでいる。さらに、電位係数や誘導係数の定義を示唆する電磁ポテンシャルに対して、土岐博は「遅延ポテンシャルの交流複素数表示は凄い!!!」ことを示したことを紹介した。大発見!!!である。

教科書的には、電氣的影響は自己電位係数と相互電位係数からなり、磁氣的影響は自己誘導係数と相互誘導係数からなることが、その昔から示されているものの、計算式は直流に対するものであって、これらの係数の交流に対する振る舞いは示されていなかった。例えば、「砂川・理論電磁気学（第3版）」の「第4章 静電場」の「§5 導体系の静電場」の102頁では、数多くの導体が存在する場合の電位に対して、「電位係数は、周囲の媒質の性質には関係するけれども、導体の電荷や電位には関係せず、導体の幾何学的形状と配置だけ関係している量である」と説明されている。これは正しいが、そうは言っても、その説明に続いて、「静電容量係数と静電誘導係数」に重きを置いた説明があり、2導体の場合には、103頁の「〔例題2〕コンデンサーの静電容量」が説明される。この話の流れのように、今では、電位係数の考えよりもコンデンサーの考えが優先されているのである。

砂川重信、「理論電磁気学第3版」、紀伊國屋書店、2020年6月11日、第20刷発行

この話の流れからすると、「電位係数は導体の幾何学的形状と配置だけ関係している量であるのに対して、コンデンサーはそうではない」ことになり、コンデンサーは特異な例であり、従って、近似やモデルであり、配線の数が3本の場合に適用するのは、まずまず、合理的ではなさそうである。この点について、土岐博は、「自己インダクタンスを2つ直列につなぐと全体の自己インダクタンスは2つの和になるのに対して、コンデンサーを2つ直列につなぐと静電容量の逆数の和の逆数になり、電気と磁気とでは計算法が異なる」ことを受け入れているのは奇妙だと指摘している。

ここでは、磁気に関する表式を「砂川・理論電磁気学（第3版）」で眺めておこう。2か所に記述がある。最初は、「第7章 準定常電流」の章にある「§2 線状回路」の節の173頁で、ノイマンの公式により、自己誘導係数と相互誘導係数が定義される。ノイマンの公式は、「第5章 定常電流」の章の「§4 定常電流による磁場のエネルギー」の節の142頁で、誘導係数は各回路の幾何学的な形状と、その空間配置、および空間を満たす物質の透磁率によって決定されることが説明されている。ここに登場する自己誘導係数と相互誘導係数はそれぞれ電気回路理論では自己インダクタンスと相互インダクタンスに相当する。このように電気と磁気とを比較してみると、電気で自己電位係数と相互電位係数を一括りにしてコンデンサーとするのは、やり過ぎの感がある。それにしても、コンデンサーを想定して、変位電流とキルヒホフの電流則を発明したのは、2端子集中定数回路素子からなる電気回路の大発展に大きく貢献した。とにかく計算が楽になる。昔の人は偉かった。

なお、電位係数と誘導係数とは、対応するもの同士は同型になっており、従って、電位係数を誘導係数で割り算したときの商の平方根は一定になっていることは、先に紹介した通りである。

その土岐博は、「電位係数は凄い!!!」ことに気付いたことに加えて、交流に対しても拡張した（この「前書き」にて、後程、数式の概略を説明するが、前出の「土岐・佐藤、アンテナ過程を含む交流回路理論と電磁ノイズの削減」にも詳しい）。言葉で、今少し、丁寧に説明しておく必要がある。電磁ポテンシャルには、スカラーポテンシャルとベクトルポテンシャルとがあり、スカラーポテンシャルは真電荷体積密度の空間分布の時間変化の遅延ポテンシャルとして与えられ、ベクトルポテンシャルは伝導電流面積密度の空間分布の時間変化の遅延ポテンシャルとして与えられる。電磁気学が場の理論に従うことを如実に表現している素晴らしい式である。このスカラーポテンシャルとベクトルポテンシャルが電気回路理論に適用できるのである。もちろん、2端子集中定数回路素子からなる電気回路理論には適用できない。この表式に登場する遅延時間に対して、交流の時間変化を $e^{j\omega t}$ とすると、スカラーポテンシャルからは自己電位係数と相互電位係数の交流表示式が得られ、ベクトルポテンシャルからは自己誘導係数と相互誘導係数の交流表示式が得られる。このように、交流に対する電位係数や誘導係数を交流電位係数や交流誘導係数と呼ぶことにする。さらに、驚いたことに、これらの表示式に加えて、それぞれの配線ごとに電磁波を放射する項が得られる。

配線ごとの電磁波の放射項は交流電位係数や交流誘導係数で表した項とは位相が 90° ずれていて、各配線からの電磁波の放射を表わしているのである。こんな解釈は、これまでになかったものである。このとき、3本の配線はアレイアンテナそれもフェーズドアレイアンテナの振る舞いに従う。

安達三郎、「アレイアンテナの応用と諸問題」、[.pdf \(jst.go.jp\)](#)

例えば、「安達・アレイアンテナの応用と諸問題」の「2. フェーズドアレイアンテナの概要」の章で示されるように、3本の配線の幾何学的な配置と各配線に流れる電流の位相によっては、3本の配線を流れる電流の総和がゼロになって、電磁波の放射が起こらない解が存在できる。もちろん、フェーズアレイアンテナの元々の狙いは、複数のアンテナから放出する電磁波の位相を制御することによって指向性を持たせ、全空間を掃引することであるが、配線の数3本ときには電流の総和がゼロになる場合がある。これこそ、電磁ノイズのうち、アンテナモードノイズがゼロになる状態である。しかし、配線の3本に「対称性の破れ」があり、2端子集中定数回路素子の回路網の配置に「対称性の破れ」があり、電源の配置に「対称性の破れ」がある場合には、電磁波の放射が起こり、アンテナモードノイズはゼロでなくなる。こうした振る舞いを与えるので、繰り返しになるが、土岐博が解き明かした「遅延ポテンシャルの交流複素数表示は凄い!!!」と筆者は呼んでいる。

筆者には、この解法は導体が2本のときのダイポールアンテナ（中心入力 of 柱状アンテナとも呼ばれる）にも適用できる気がする。気がするだけで、実際には、大地が存在しているため、適用できないと覚えておくのが良さそうである。その点を無視して、即ち、大地がないとして、話を続ける。ダイポールアンテナでは入力インピーダンスの計算には、歴史的にアンテナパラドックスと呼ばれる問題があった。その計算方法は起電力法と呼ばれていて、計算値は悪くないとのことである。しかし、完全導体の柱状アンテナを想定すると、この計算方法は正しくないと考えられる。筆者には、土岐博による「遅延ポテンシャルの交流複素数表示は凄い!!!」ことにより、このパラドックスは数理的に解決できる気がする。しかし、悲しいかな、今の筆者には実力が足りない。そうは言っても、ダイポールアンテナの交流電位係数と交流誘導係数を求めることは、それも、表皮効果を考慮する場合の幾何平均距離を算定するのは、容易ではなく、話は簡単でないので、筆者としては、何ともし難く、妙に納得している。

稲垣直樹、「アンテナパラドックス：起電力法で計算されたインピーダンスは正しいか」、富士通テン技報 Vol.4 No.2 (1986)1-7. [7\].pdf \(denso-ten.com\)](#)

話が転々として焦点が定まらないが、ここでは、「コンデンサーと変位電流およびキルヒホフの電流則の発明と交流電位係数の再発見」と題する話としてまとめておきたい。広く普及している2端子集中定数回路素子の回路網の電気回路理論では、2端子集中定数回路素子のコンデンサーは必須な要素の1つであるが、それと併せて、変位電流を想定し、恐らくは、近似やモデルであることを知りながら、キルヒホフの電流則とキルヒホフの電圧則をフルに利用しながら、実用に耐える電気回路理論を構築し、素晴らしい電気回路技術の発展の道を拓いたことになる。電磁気学としては間違いであるにもかかわらず、こうした近似やモデルは、現代の科学技術の進歩を切り拓いた。

なお、コンデンサーを意味のある物理量として定義したのはファラデーであり、電磁誘導の法則（本稿ではファラデーの法則と呼ぶ）を1831年に発見し、イギリスの王立研究所の金曜講座でファラデーケージの公開実験を開催し、1837年にはキャパシタンス（本稿では、コンデンサーと呼ぶ）の精密測定を行い、コンデンサーを物理量として確立した。

オーエン・ギンガリッチ編集代表、コリン・A・ラッセル著、須田康子訳、「マイケル・ファラデー 科学をすべての人に」、大月書店、2007年12月14日第1刷発行

マクスウェルは1865年の論文で、交流においてはコンデンサーを構成する2導体の間の間隙を変位電流が流れると考え、この電流は伝導電流と同じく実電流の一種であるとした。これにより、キルヒホフはオームの法則を一般化することと併せて、キルヒホフの電流則を提案した。また、2本の導体を用いた伝送線路の分布定数回路理論でも、単位長さ当たりのコンデンサーが定義され、ヘヴィサイドにより、電信方程式が提案され、成功をおさめた。

このように、コンデンサーと変位電流およびキルヒホフの電流則の3点セットの組み合わせが、何から何まで、自然の摂理を語っているかの如く、正しいと信じられてきた。し

かし、これに対して、本稿では、交流自己電位係数と交流相互電位係数からなる交流電位係数および交流自己誘導係数と交流相互誘導係数からなる交流誘導係数を用いて、遅延ポテンシャルの交流複素数表示が定まり、それによって、多導体伝送線路の交流現象を知ることができることに着目している。即ち、コンデンサーと変位電流およびキルヒホフの電流則の3点セットが、電磁気学としては不要であることが判明したのであるが、電気回路理論としては実用に耐えるものであり、これこそ、「コンデンサーと変位電流およびキルヒホフの電流則の発明」と呼びたい。そうとは言え、繰り返しになってくどいようであるが、物理量で言えば、変位電流を想定しなくても、電磁気学の交流現象を知ることができるので、変位電流は不要な物理量である。

これに対して、土岐博は、3導体伝送線路に対して、交流電位係数の計算式を提示し、「コンデンサーと変位電流およびキルヒホフの電流則の発明」とは異なる道があることを示した。「交流電位係数の再発見」とまとめて良いであろう。電磁ノイズとは、コンデンサーや変位電流およびキルヒホフの電流則では語りきれない電磁気現象であったものの、交流電位係数で語るができる電磁気現象であった。しかし、筆者は、その昔（土岐博との共著論文を書いていた頃）、電氣的相互作用をコンデンサーの他に電位係数の2種類の異なる物理量で表現する必要が生じたことを契機に、コンデンサーは物理学的に近似やモデルではない正しい物理量として良いかどうかということばかりを検討し続けていた。結果から言うと、猛勉強の結果、電磁気学は場の理論に従うということを知ったため、即ち、電場や磁場の源は、言い換えれば、スカラーポテンシャルやベクトルポテンシャルの源は、真電荷体積密度と伝導電流面積密度であるということを知ったため、変位電流は磁場を作らないと言う考えが正しいと思うようになった。

ここで脱線。導体が交流の電磁場がさらされると、伝導電子が振動運動を起こし、真電荷体積密度と伝導電流面積密度の時間的振動が起こる。これらの時間的振動により、導体の外部に電場や磁場の時間的振動、即ち、電磁波が発生することになる。この考えで全てが解決できた!!!と思いきや、そうではなかった。このような考えを古典電磁気学と呼べば、それとは異なる、電磁場も物質も量子と考える、量子力学が登場するのである。

量子力学の話を持ち上げて、古典電磁気学に戻ろう。コンデンサーは場の理論では不適切な物理量になり、その結果、変位電流を電流とみなして、キルヒホフの電流則が成立すると考えるのは正しくないことになる。この考えに至ったことには、さすがに、参った。コンデンサーには変位電流が流れ、それを電流の1種と考えたのはマクスウェルであるから、「電磁気学におけるマクスウェルの負の遺産」とも呼ぶことができそうである。もっとも、交流電位係数や交流誘導係数への道につながる数式をマクスウェルは書き出していたので、彼の負の遺産と決めつける訳にも行かない。要は、導体の数が2つの世界だけを考えたがために起こった間違いであり、導体の数が3つ以上の世界を考えれば、起こらなかった間違いと言える。こういう事情で、「佐藤・シンクロトロンでは電源良ければ全て良し：HIMACからJ-PARC・MRへ」では、筆者は誤って、最終章「10. まとめに代え

て：新しい電磁気学の到来の予感」と題してしまった。電氣的相互作用として、コンデンサーと電位係数の両方を同時に電磁気学で成立させる必要があると見誤ったため、電磁気学を見直す必要があると思ったのである。これに対して、最近のことであるが、正しくは、「新しい電気回路理論の到来の予感」とすべきであったことに気付いた。その新しい電気回路理論をこそ、ハイブリッド電気回路理論と呼ぶことにしたのである。

くどいようであるが、繰り返しておこう。広く普及している2端子集中定数回路素子の回路網の電気回路理論ではキルヒホフの電流則とキルヒホフの電圧則とが決定的な役割を果たし、コンデンサーでも、変位電流を電流とみなすことによって、これらの規則を適用できる。これに対して、交流自己電位係数と交流相互電位係数および交流自己誘導係数と交流相互誘導係数ではキルヒホフの電流則を適用する必要がないので、変位電流が存在しないとしても、原理的に、答えが見つかるのである。そうは言っても、一般的には、ノーマルモードとコモンモードとアンテナモードとが結合した連立偏微分方程式が得られるので、実際に、連立偏微分方程式を解いて答えを求めるのは容易ではない。今となつては解けないことを知ってはいるものの、その昔は、それを知らず、未完の計算を学会誌（日本加速器学会誌「加速器」）に投稿し続けたこともあった。筆者自身の先見のなさに、ただただ、恥じ入るばかりである。ただし、「対称3線方式」の電気回路と電源に限れば、コモンモードノイズもアンテナモードノイズも制御されてゼロになるので、手っ取り早く解が求まってしまう。筆者は、HIMACシンクロトロン加速器の建設に当たり、それを先取りした実践を行ったことで、穴埋めとさせて頂きたい。

なお、「対称3線方式」の電気回路を実践するに当たって、その切っ掛けとなった研究が複数あるが、それらの紹介は、本稿の本文に譲ることにして、ここでは、その電気回路の特徴的な側面を、筆者の直感を交えて、主として定性的に紹介しておきたい。

そのため、引き続き、実践では何をどうしたのかについての話を続けよう。「対称3線方式」の電気回路で、2本の主配線と1本の中線があるが、中線は電源の出力端子の直後の1点で大地に接地することにより、人体や周辺の機器装置を電氣的に保護してやった。これまでに広く普及している電気回路理論の考えでは、この接地により電気回路全体の電位を大地と同じにしてやったと説明することが多いが、実際には、そうは問屋が卸さない事情がある。この中線の接地で、大地を4番目の導体と考えると、配線の本数は合計4本に見えるが、「対称3線方式」の電気回路では、配線の本数が3本の電気回路として、既に、閉じた世界を形成しており、電磁波を放射することがないので、その結果、大地は電気回路の動作に影響を与えず、また、電気回路の動作に付随する電流は大地には流れないと考えられ、この場合に限り、電気回路全体の電位が大地と同じになると考えられる。この考えの肝は、「対称3線方式」の電気回路と電源とは閉じた世界を形成しており、他の導体とは相互作用しないと考えることである。

この説明は、従来から教え教えられてきた接地やグラウンドの考えとは異なり、配線の本数が2本の電気回路の配線の1本を、金属性導体で大地に接続して、接地してやっただけ

では、電気回路の電位が大地に固定されることにはなっていないことを暗示している。

「対称3線方式」の電気回路にして、その中線を大地に接続して、初めて、接地やグラウンドが実現されることになることに注意しておきたい。繰り返しになってくどい話になるが、「対称3線方式」の電気回路と電源では、それ自体で世界が閉じており、例えば、アンテナモードノイズはゼロになり電磁波が放射されることがないので、周辺の世界と電気的および磁氣的に相互作用することがない。そのため、大地に接地しても、電気回路と電源さらには大地も、電気的にも磁氣的にも変化しない。こうして、電気回路と電源は、大地に軟着陸したかのように、接地される。

ここまで書き進めてきて、筆者自身がこれまで接地とグラウンドとを切り離して考えていたことを白状しなければならない。例えば、「対称3線方式」の電気回路と電源の中線を接地することと、電源の筐体を接地することとは別のものと考えていた。このとき、一方を接地と呼び、他方をグラウンドと呼ぶことにしていた。即ち、接地とグラウンドの2種類があると考えてきたのである。ところが、「対称3線方式」の電気回路と電源の実践において、こうした考えは不要であることが判明したのである。

こうした2種類の接地が必要であると思うことは、その昔に筆者も経験したものであるが、世間では通説になっている。曰く言い難いので、「アナログ電子回路コミュニティ・FGとSGは、どう処理すべきなのか？」や「Electrical Information・『グラウンド(GND)』と『接地(アース)』の意味と違いについて!」を引用しておこう。どちらの文献でも、大地に接続することをFG(筐体の基準電位)と呼び、回路動作の基準となる電位をSG(シグナルグラウンド)と呼んでいる。

[Electrical Information、『グラウンド\(GND\)』と『接地\(アース\)』の意味と違いについて!」、『グラウンド\(GND\)』と『接地\(アース\)』の意味と違いについて! - Electrical Information \(detail-infomation.com\)](#)

[アナログ電子回路コミュニティ、「FGとSGは、どう処理すべきなのか?」、bbs10_jp.pdf \(analog.com\)](#)

ところが、この考えを覆すともないことが、本稿で紹介しているHIMACの電源で起こった。筆者の基本設計では、電源室に、筐体接地用のアース端子と中線接地用のアース端子の2つを設けることにした。しかし、見落としがあって、電源室にはアース端子は1つ設けられているだけであった。設計図面上は2つのアース端子があるものの1端子しかないので、どう処理すれば良いのかと工事業者に尋ねられた。放射線遮蔽のため、鉄筋コンクリートの厚さが2mもある建屋の外部にアースそのものを打ち込んであるので、増設も簡単ではないこともあり、もちろん筆者の返答は明快であった。1つのアース端子に、電源筐体と中線の2つをアースすべしと言うことであった。その結果、1つのアース端子に筐体と中線の2本のアース線が繋がったわけであるが、当時電源周りの諸測定に取り組んでいた熊田雅之との立ち話によれば、そのそれぞれに流れる電流を測定したところ、2本のアース線には、大きさが同じで、向きが異なる電流が流れているとのことであった。結局、建屋外に設けたアース端子には電流が流れ出していなかったのである。

この測定結果は、電源筐体と中線とを直接つないで、それをアース端子につないで接地してやっても、電流が流れないことを意味している。言い換えれば、筐体と電気回路とは、交流においても、同電位になっていることを示している。即ち、「対称3線方式」の電気回路と電源では、筐体と電気回路との接地を、それぞれに分離する必要がないことが、実践において、示されたことになる。このことは、配線の数が2本の広く普及している2端子集中定数回路素子からなる回路網では、世界が閉じていないので、何処かを大地に配線でつないでやっても、接地やグラウンドができないことになる。ただし、筐体と電気回路本体とを別々に配線でつなぐと、何とかなる場合があったのかも知れない。その点については、この「前書き」で、後程、議論したい。

この話にも似たような出来事が、別途、発生したので、この場を借りて、紹介しておきたい。本稿で紹介している電気回路は、HIMACのシンクロトロン加速器の電磁石で、1周の長さが130mほどの円形状のリングに規則正しく並べた12台（他に磁場強度監視用の電磁石が1台あって合計13台）の電磁石のコイルを直列につないだもので、中線は電磁石の鉄芯を次から次へとつないでいた。加速器本体室で電磁石の据え付けを行っていた工事会社の担当者から、ある日、問い合わせがあった。電磁石をコンクリート床に固定するためにアンカー用の穴を掘ったところ、床の配筋にぶつかったものがあるとのことであった。筆者は前もって回答を用意していなかった問題が発生した。この工事会社は以前に他所で加速器施設の工事を請け負ったことがあるようで、そのときは、アンカーの打設場所の周りの床を掘り込んで、配筋を切り取って、コンクリートで埋め戻し、そこにアンカーを打設したとのことであった。アンカーと配筋との直接的な接触を避けたのであるが、HIMACでも同様の工事を行うのかとの問い合わせであった。筆者は、そうした工事は不要で、アンカーが配筋に接触しても問題ないと回答した。中線は、幅が30mm程度の編組線に絶縁カバーを設けたものを2本使用した。この電磁石の固定方法の工事の結果、「対称3線方式」の電気回路と電源は、中線を通して、コンクリート壁の鉄筋につながるようになった。しかし、「対称3線方式」の電気回路と電源は閉じた世界を形成していると考えて良いので、配筋とは相互作用することがないと考えて良いであろう。しかし、考えてみれば、建屋の配筋は、何とも、電磁ノイズにとっては悩ましい存在であるようだ。

それにしても、電磁ノイズは、何と驚いたことに、「対称3線方式」の電気回路と電源と呼ぶ、かくも簡単な方法で、制御できるのである。以上のような説明になることにはなるのであるが、言葉を変えて、筆者なりに今一度説明すると、電磁ノイズを減らしたと言うよりも、正負の符号が異なる2つの電磁ノイズを足し合わせてキャンセル・相殺したかのような気分であり、してやったりとほくそえんでいる。

ただし、「対称3線方式」の電気回路と電源に加えて、他に電流ノイズを減らすのに寄与が大きかったと思えることがある。それは、強電回路であるスイッチング電源の出力の電圧や電流の安定化や低雑音化のための、アクティブな負帰還制御の弱電回路に誘起される電磁ノイズが少なくなっていると言うことである。たとえば言えば、従来の電気回路で

は曇ったり霞んだりしていた環境が、「対称3線方式」の電気回路では、すっかり晴れ渡り、弱電回路を取り巻く強電回路による電磁環境そのものも改善されている訳である。それだけでなく、そうした弱電回路の電位の基準とするグラウンドは、強電回路である「対称3線方式」の電気回路の中線とすることができ、通常の「2線方式」の電気回路で遭遇するグラウンド方法の紛れがなくなったことも大きい。言い換えれば、曇ったり霞んだりしている場合には、ノーマルモードとコモンモードおよびアンテナモードの3種類の電磁ノイズが発生し、しかも、お互いに変換しあうので、それぞれを独立に負帰還制御することはできないので、電磁ノイズを低減することが困難である。

通常の「2線方式」の電気回路では、負帰還制御のアンプに絶縁アンプやフォトカプラーあるいは場合によっては光ファイバーケーブルを採用することもあるが、そのアンプのグラウンドに行き詰まった経験が筆者にはある。しかし、「対称3線方式」の電気回路では、そうした細工は不要で、負帰還制御のアンプの接地端を「対称3線方式」の電気回路の中線にグラウンドとしてつなぎこめば、電磁ノイズの少ない、高利得の負帰還制御が実現される。「対称3線方式」の電気回路と電源では、ノーマルモードがコモンモードとアンテナモードとは結合していないことに加えて、コモンモードとアンテナモードとはほとんどゼロになっているので、負帰還制御ではノーマルモードノイズを制御してゼロにしてやることになる。話を繰り返してくどいようであるが、先にも述べたように、「対称3線方式」の電気回路の本体の強電回路のグラウンドである中線は、電源の近くの1点で接地（アース）してやって、電源や負荷に触れる可能性のある人体や他の機器の安全を確保してやっている。また、負帰還制御の弱電回路も「対称3線方式」の電気回路として製作し、その中線をグラウンドとするが、そのグラウンドは、強電回路の中線であるグラウンドにつなぎ込んでやっているなので、この結線方法は弱電回路を接地したことに等しい。

さて、「対称3線方式」の電気回路では、こうした強電回路と弱電回路との間の関係を合理的に整合できる点で雰囲気が出せている感じであるが、これから先には問題が発生する。例えば、弱電回路が強電回路の出力電流を測定する回路であり、その出力を外部に設けた市販の計測器で測定すると、つじつまが合わなくなってくる。何故なら、市販の計測器は、配線の本数が2本の通常の電気回路であり、配線の本数が3本の「対称3線方式」の電気回路ではないから、結線が整合しないことになるからである。そういう事情で、打つ手がなくなり、「対称3線方式」の電気回路が、全体として、貫徹できなくなる。世の中の考えが変わって、測定器を含めて、全ての電気回路の配線の本数が3本にならない限り、つじつまの合わない話になってしまい、お手上げである。とどのつまり、むにゃむにゃと言葉を濁す、思わしくない結果に終わってしまう。そうは言っても、ここまでやれば、電磁ノイズの大きさは、出力電流の大きさの1/1,000程度と測定され、悪い値ではなくなるので、それでよしとしておきたい。

話が優しくなったり厳しくなったりして揺れ動いているが、ここまでとは異なる展開があることを紹介しておきたい。筆者はグラウンドと接地と言う言葉を、元々、異なった意

味で使い分けながら書き進めてきているが、「対称3線方式」の電気回路と電源の負帰還制御回路について説明しているうちに、そんな切り分けは不要であることに気付いた。

「対称3線方式」の電気回路と電源では、先にも書いたように、電源の出力端で中線とつながり、大地につないで接地した。その一方で、中線自体は「対称3線方式」の電気回路のグラウンドであるとも書いた。このとき、3本の配線や電気回路の回路網および電源に「対称性の破れ」が全くない場合、中線には電流が流れることなく、文字通り、中線になっている。即ち、中線は長さ方向に同電位である。こうなると、グラウンドと接地の切り分けは不要になると考えて良いが、実践でも、そうになっていたことは、既に、電源室に設けたアース端子は設計時のチェック不足で、2点設けるべきところ1点のみだったことは紹介したとおりである。グラウンドと接地とを別物と考えなくても良い事情は、電磁ノイズが電気回路や電源自体で発生していることを示しており、「対称3線方式」の電気回路と電源では電磁気現象の世界が閉じているため、電磁ノイズを制御してゼロになることを示している。

ここでは、グラウンドと接地について、従来の考え方にはつじつまの合わない点があり、本稿では、従来の考えとはいささか異なっていることを紹介しておきたい。その昔、マクスウェルが電気回路について検討したとき、恐らく、静電気の電気回路と思われるが、その電気回路の電位の基準についての考え方について説明したようである。その事情は「ジャクソン電磁気学Ⅰ」の「序論と概観」の「1.6 電磁気学における理想化についての注意」の節で述べられている。

J.D.ジャクソン著、西田稔訳、「JACKSON 電磁気学（上）原著第3版」、吉岡書店、2004年2月10日第2刷発行

この邦訳版の26頁では、「例えば、静電気学では、普通“接地”と呼ばれるポテンシャル0に対して、物体をある一定のポテンシャルに保つ」と言い、「物体を一定のポテンシャルに保持するためには、少なくともときどき、物体から遠く離れた（“無限遠方の”）電荷の湧き出しまでは電導性の通路（下線は本稿の筆者による）、またはそれと等価なものがあって、ほかの帯電物体や非帯電物体がその近くに置かれると、電荷が物体に流れ込み、あるいは物体から流れ出て、常に物体のポテンシャルを望ましい値に保持することが必要である」とされている。こんな芸当ができる理由は、マクスウェルの言葉を借りて、次のように、説明されている。「ある与えられたポテンシャルをもつ導線の任意の部分上の電気量は、導線の直径が限りなく減少するとき限りなく減少するから、かなりの大きさの物体上の電気分布は、この物体と地球や電気機器や電位計との間の電氣的接続のために用いられる非常に細い金属導線を電場内に挿入しても敏感に影響されないだろう」。

筆者は、こんな芸当は実現できそうにもないと思ってしまっただが、先人たちは、このように、「物体を一定のポテンシャルに保持する」必要があると考えたために、実際の電気回路では、導線を用いてグラウンドあるいは接地しなければならないかのように考えてしまったようである。しかし、実際には、これから先の話になると、困難が発生する事情が「ジャクソン電磁気学Ⅰ」で紹介されている。「ある物体を接地するという考えは、時

間を考えない静電気学では明確な概念であるが、振動する場では有限な伝搬速度がこの概念をぼかしてしまう。言い換えれば、誘導的で容量的な迷走効果が重要となる可能性がある。このときには、“良い接地”を保証するには十分な注意が必要である」とされている。先に述べた「非常に細い金属導線」では、自己インダクタンスが大きいので、交流においては誘導的な迷走効果が大きくなり、物体を接地することは非常に困難になる。

「十分な注意が必要」と言われても、交流では無理筋の要請で、エッ！とばかりに驚かされる話であるが、ジャクソンは「経験を積んだ者にとっては、ほとんどが自明のように思える」とも書いている。この説明もまた、エッ！とばかりに驚かされる話で、「十分な注意が必要とされ、ほとんど自明」と言われても、グラウンドや接地のために金属性導体で電氣的に接続することに悩まされ、常に不首尾な結果に終わってきた筆者には、自明であった試しはなく、また、筆者は経験を十二分に積んだ者ではないが、こんな電位の定義を実際に実現することはできない相談であると思える。ジャクソンの言説は、何か、何処かが、間違っているようである。ジャクソンは、実際の電気回路での現場での経験が少なく、経験を積んだ者ではない、理論物理学者であるからかもしれない。なんて、筆者は自分の無能さを隠蔽するために、その人物を知らないジャクソンに対して、思わず、悪態をついただけのことかもしれない。

本稿では、マクスウェルやジャクソンの話を無視して、電位は電磁ポテンシャルのうちスカラーポテンシャルであると考え。マクスウェルやジャクソンは、電位は静電ポテンシャルとしたが、本稿ではスカラーポテンシャルとするのである。その式の構造から、電位すなわちスカラーポテンシャルの値は無限遠方で必ずゼロになる。ところで、ある電気回路の全体としての電位を定義することができるが、無限遠方から見ると、その値が一定になるとは限らない。時間的に振動する場合があり、そのとき、その電気回路は電磁波を放射する。後程、電磁ノイズを伝導ノイズと放射ノイズとに分類し、伝導ノイズをノーマルモードノイズとコモンモードノイズとに分類するが、スカラーポテンシャルを電位と定義することで、放射ノイズが定義できるのである。結局、「物体を一定のポテンシャルに保持する」と言う考えは、無限遠方でゼロになる電位を用いると、数理的に、自動的に定まるものになっているだけのことである。マクスウェルあるいはジャクソンの言うように、わざわざ、無限遠方に置かれた電荷の湧き出しまで金属製導体で直接つなぎ込むことによって定める必要はないのである。ただし、注意しておきたいのは、大地の上に立っている人間が、その電気回路に触れたとき感電する可能性がある問題である。人間が感電することがないように安全を確保するためには、電気回路を大地に導体でつないでやって、電位を同じにしなければならない。この操作を電気回路の接地と呼べば、接地が電気回路の動作に影響を与えてはならないと思う。