

解 説

対称 3 線回路 (第 2 部 実践編)

—「ノイズとシグナル」と「コモン-, ノーマル-, 及び, アンテナ-モード」との間の
複雑な関係を単純化出来る電気回路—

佐藤 健次*

Symmetric Three-Line (S3L) Circuit that Simplifies a Complicated Relation between
the “Noise and Signal”, and “Common-, Normal-, and Antenna-Modes” (Part 2 Practice)

Kenji SATO *

Abstract

We discuss a new circuit theory of multi-conductor transmission lines. According to the theorem, a symmetrical three-line (S3L) circuit gives an excellent noise reduction compared with a nominal two-line circuit. The practice of this S3L circuit was proposed by the author for power supplies of the twin synchrotrons of HIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba) 20 years ago, and the theory has recently been established by Prof. Hiroshi Toki, who has found a new principle of circuit theory based on the retarded potential and coefficients of potential. This theory provides a clear mathematical definition of common-, normal-, and antenna-modes for electromagnetic phenomena with a set of coupled integro-differential equations among three modes. A signal contamination by noise is understood as coupling among these three modes. A relation between the “noise and signal”, and the three modes is generally complicated, however, such a relation is simplified very much in the case of the S3L circuit. The normal mode is decoupled from the common- and antenna-modes, so that a pure signal is obtained without any contamination of noise with a common-mode filter. This article describes the essence of both the practice and theory of the method in three parts; “Part 1 Outline”, “Part 2 Practice”, and “Part 3 Theory”.

全体は、「第 1 部 概要編」, 「第 2 部 実践編」, 及び, 「第 3 部 理論編」の 3 部からなるが, 本稿はその第 2 部である。なお, 参考文献には通し番号を付けており, 重複を避けるため, 既出の 1) から 9) までは「第 1 部 概要編」の参考文献として示しているのので, 本稿のリストには再掲しないことにする。

3. 実践編

3.1 実践編・はじめに

「第 1 部 概要編」¹⁰⁾ で, 2 本の主配線の他に, 別途設けた 3 番目の配線からなる, 一般的な「3 線回路」では, コモンモードとノーマルモード及びアンテナモードの 3 つのモードが数式として厳密に定義され, 3 番目の配線に流れる電流は, コ

モンモードとアンテナモードとが結合する CA 結合モードであることを述べた。また, 「2 線回路」では, 2 本の配線に加えて, 何の断りもなく, 勝手に, 大地が 3 番目の配線になって「3 線回路」になり, 大地には CA 結合モード電流が流れることを述べた。しかし, 電気回路から放射される電磁波を直接観測することは簡単ではない。アンテナを用いて電気回路の近くで電磁場を測定出来たとして, その電磁場が電気回路に舞い戻る伝搬モード (ノーマルモードやコモンモード) である可能性もあり, 遠方まで飛び去る放射モード (アンテナモード) であるかどうかを断定するのは, 簡単ではなさそうである。そこで, 本章では, 電磁波の放射はないものとして, 3 番目の配線に流れる電流は, 簡単のため, コモンモードノイズと

* 放射線医学総合研究所 National Institute of Radiological Sciences
(E-mail: sato@rcnp.osaka-u.ac.jp)

呼ぶことにする。しかし、時々思い出したかのように、CA 結合モードと呼んだりするので、ご容赦願いたい。

本章では、コモンモードノイズが大地を流れる電流としてどのようにして気付かれ、それを削減出来る「対称3線回路」がどのようにして思い付かれたか、について、TARN2, 12 GeV・PS, HIMAC, 及び、J-PARC・MR での実践に基づいて、紹介する。

これまでの経緯については、杉本記念シンポでの筆者による講演の、邦文の報告書⁸⁾に詳しい。しかし、「第3部 理論編」を除けば、本章の「第2部 実践編」の骨組みは、既に、日本加速器学会誌『加速器』の解説¹¹⁾にて紹介済みであり、多相整流の交直変換器の直流出力側においては、「対称3線回路」がノイズ削減のために優れたものであることを紹介した。

これら以外にも、英文や邦文の、既刊の論文や解説が複数あるが、本稿は、それらと異なった切口で、新たな観点で解説していることを断っておきたい。

なお、交流系統のコモンモードノイズを、PF-AR での測定データから、筆者が見付けたことを契機に、日本加速器学会誌『加速器』の解説⁷⁾にて、コモンモードノイズを削減出来る交流系統のフィルターとして機能結合型フィルターと機能分離型フィルターを提案している。交流系統のコモンモードノイズ削減の実践例は、これまで世界的にもないようなので、その実現をお勧めしたいが、本稿では、その解説を割愛する。

3.2 TARN2 での測定データでのコモンモードノイズの発見

まず、最初に、**図 3.4** をご覧頂きたい。この図は HIMAC の「対称3線回路」であるが、上下コイルを切り離して、ノーマルモード電磁石としたときの、コイルのそれぞれに抵抗を架橋しているのが特徴の1つである。その昔、筆者は、放医研にて、架橋抵抗はノイズを削減するのに有効であると言う計算に凝っていた。何故、こうした計算をすることになったのかの経緯については、文献^{8, 11)}に述べている通りで、筆者が全てを思い付いた訳ではない。そのとき、文献¹¹⁾の11頁では、「対称3線回路」にした結果得られる、(3) や (4) の2行2列の変換行列の積である繰り返

し回路(梯子型回路)の計算をしていた。

ただし、その当時、筆者が考えていたことは、繰り返し回路では、変換行列の各成分は集中定数回路要素で与えられるとしており、それが極限的には、伝送線路になるということであった。即ち、従来の電気回路理論として、教えられ教えて来た通りであった。この場合、配線の本数が2本の同軸ケーブルやレッヘル線では、単位長さ当たりのコンデンサーと単位長さあたりの自己インダクタンスとなる訳であるが、土岐・佐藤の多導体伝送線路の「新しい回路理論」^{1, 2)}は、それとは別物であることを、断っておきたい。コンデンサーは不適切な物理量であり、電位係数が適切な物理量であることが判明したからである。

それはそうとして、その頃、文献¹¹⁾にも書いたように、TARN2 の田邊徹美さんから、磁場のノイズ、従って、励磁電流のノイズが大きいので、それを削減する方法がないかとの問い合わせがあった。そこで、当時計算中であった、架橋抵抗を試して見ることを勧めた。架橋抵抗を設けたときの TARN2 の回路図を**図 3.1**に示す。なお、この図の右下に示されているように、電磁石のコイルは上下が分離されることなく、1台ごとに上下コイルがつながれた通常の電磁石で、それが直列につながれている。従って、**図 3.4**の右下に示されているノーマルモード電磁石ではないことにご注意願いたい。違いが一目で分かるように、色違いにしてある。

なお、上下2台の電源のそれぞれはサイリスタ電源で、**図 3.1**の左下に示すように、3相全波6パルス整流で、上下では位相をずらして多相整流とするので、合計、12パルス整流であった。また、結果として判明したことであるが、目には定かに見えないにも拘らず、大地は3番目の配線となっており、左端では、大地は、上下2台の電源の midpoint とは、コンデンサーを通して結合していると考えて良さそうである。ところで、「第1部 概要編」では、電源の完全な絶縁は不可能であり、また、このコンデンサーのどこかに自己インダクタンスがあるはずであると書いたが、残念ながら、筆者の現在の実力では、自己インダクタンスを描き込むことが出来ない。

元々は架橋抵抗が付いてなかった訳であるが、架橋抵抗の大きさを 200Ω , 50Ω としたときの、

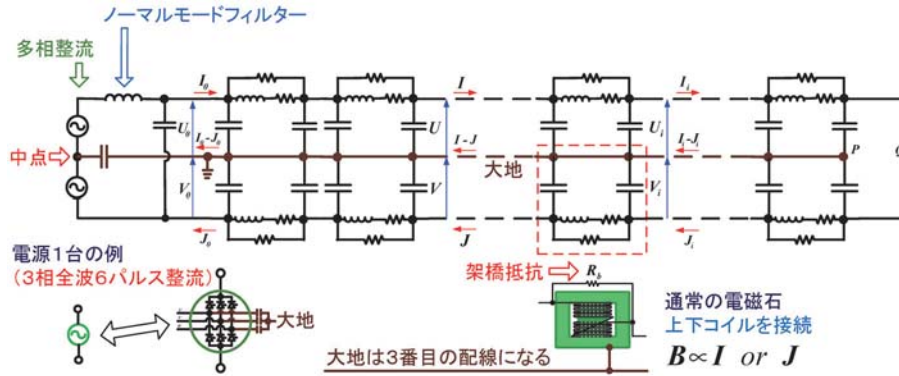


図 3.1 TARN2 の架橋抵抗を設けた回路図. なお, 大地は 1 本の配線として, こげ茶色の線で表している.

ノイズの測定データが図 3.2 である. 以前の解説¹¹⁾では, ムニャムニャと言葉で説明したが, 今回は, 著者の許可を得て, 図で示した¹²⁾. 図 3.2 の上から順番に, 架橋抵抗なし, 200 Ω, 及び, 50 Ωで, また, 図 3.2 の左から右の 2 列では, 左列は, 横軸が時間にして 2 ms/div. のオシロスコープによる波形データ, 右列は, 200 μs/div. の波形データである.

左列のデータでは, 「大・小・中・中」のノイズが 3 回繰り返されて 12 パルス整流になっているが, これは, 図 3.1 の左下に示した, 2 段のサイリスタのバンクからなる電源が, 上下 2 台つながっていて, 3 相交流に対して合計 4 段のサイリスタバンクにより, 発生している現象であると考えている.

右列のデータを見ると, 架橋抵抗がないときの最上段のデータでは, 驚いたことに, 文献¹¹⁾の 15 頁の「2.4.3 反射波と進行波」と題した項で述べたように, ノイズとしては, 入射波に続いて反射波が見える. しかし, 架橋抵抗を設けると, 下の 2 つのデータのように, 反射波が消えて, 入射波 1 つになる. それと同時に, その入射波は小さくなる. 結局, TARN2 では, 入射波が小さくなる 50 Ωを選んで, ノイズの大きさを 1/4 程度に小さく出来た. その費用は数千円であったとのことであり, 「原理は勝つ!!!」とでも言えば良いかのようなものである. 伝送線路回路の感覚で言えば, 損失付きのケーブルになったと, 筆者は理解した.

架橋抵抗がないとき, 入射波と反射波の 2 つが見えている. 伝送線路回路の感覚で言えば, インピーダンス整合が取られていないときに起こる,

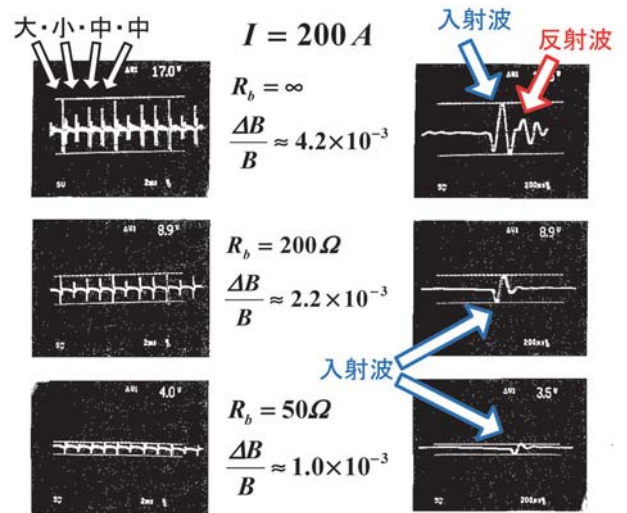


図 3.2 TARN2 での測定データ: 架橋抵抗の効果

当然の現象である. 電磁石が直列につながった繰り返し回路になっていて, 先にも述べたように, まるで, 伝送線路回路のように振る舞うことを知っていたのが幸いした.

ところで, 筆者は 2 つのパルスの位相が反転していることに気付いた. この測定データは磁場であるから電流の測定と同等である. 電流の反射波の位相が入射波の位相とは反転するのだから, 末端は開放の現象が起こっていると考えた. 図 3.1 の回路図を見ると, 末端が開放になるのは右端の P と Q との間であり, 直列につながれている電磁石の中間に位置する電磁石の配線と, 目には定かに見えない線としてこげ茶色の線で表している大地との間である. このことから, 大地を流れるコモンモードの電流が, 磁場に見えていると判断した. ノーマルモードノイズが見えないのは, 図

3.1の左端に示されているように、電源の直後にノーマルモードフィルタが設けられているからであるとも考えた。このようにして、目には定かには見えず測定も出来ないと思われている、大地を流れるコモンモードノイズが、驚いたことに、入射波と反射波という現象から、見付かった。

以下では、既刊の論文や解説では議論して来なかったことを、引き続いて、紹介したい。それは「第1部 概要編」¹⁰⁾で、ざっくりと一言で説明したことであるが、「ノイズが測定されても、また、一見したところ、電気回路が判明しているにも拘らず、そのノイズには2種類あるため、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、直ちには判定出来ない」と言うことである。図3.2の架橋抵抗を設けたときの下の2つの測定データのように、ノイズの振る舞いに変化して、反射波が消えてなくなり、ノイズとしては、入射波1つになる現象のことである。コモンモードノイズであることが、図3.2の一番上の測定データから、既に判明しているにも拘わらず、この測定データのみからは、入射波1つがコモンモードノイズと判定出来ないと思われる。その回路図も図3.1のように知られてはいるものの、大地の回路特性は判然としないこともあり、回路計算もままならず、どう考えても、この測定データの限りでは、出来ない相談と思える。

こうなると、ノイズに気付いたら、それはコモンモードノイズであると思え、と言いたくなる。

これからして分かったことをざっくりと一言で言えば、通常の方法でノイズを測定したとしても、入射波1つだけのノイズの振る舞いからは、それ

がコモンモードノイズであることが明らかに出来ないと言うことである。新しい測定方法や測定装置を開発しない限り、ノイズの何たるかの真の姿を、直ちには、明らかに出来ないと言うことでもある。TARN2での測定データは、架橋抵抗の「あり」と「なし」が測定されたことにより、両者の違いとして、それを示唆している優れたもので、今なお世界で一例しかないものようである。

3.3 KEKの12 GeV・PSでのコモンモードノイズに対するインピーダンス整合

前節で、「架橋抵抗がないとき、入射波と反射波の2つが見えている。伝送線路回路の感覚で言えば、インピーダンス整合が取られていないときに起こる、当然の現象である」と書いたが、そうだとすると、右端をインピーダンス整合したくなる。図3.2のTARN2の架橋抵抗では、損失付きの分布定数回路にしたので反射波が消えたと言えば良いであろうが、それに代わって、インピーダンス整合をとろうと言う考えである。もちろん、3番目の配線となっている大地に流れるコモンモード電流に対するインピーダンス整合である。

末端をインピーダンス整合したシンクロトロンが世界にないかと、散々、文献調査したところ、な、な、何と、文献¹¹⁾の16頁の「2.4.4 インピーダンス整合」の項で紹介したように、また、本稿の図3.3に示すように、KEKの12 GeV・PSでは、点Pと点Qとの間で、コンデンサーを通して、抵抗Rが接地されていた。当時電源の責任者であった松本啓先生に、これらの回路定数をどのようにして定めたのかについて尋ねたところ、この抵抗でノイズの波形が改善されることに気が付き、

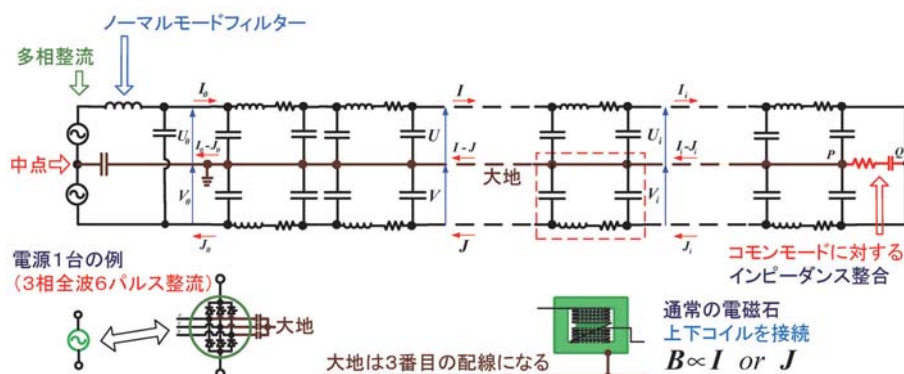


図3.3 12 GeV・PSでのコモンモードノイズに対するインピーダンス整合. なお、大地は1本の配線として、こげ茶色の線で表している。

ノイズの波形が最善になるように、最適な値を実測で定めたとのことである。ただし、残念なことに、筆者は、そのときの波形の測定データを入手していない。

そこで、筆者は、東大核研の藤田宗孝さんと連れ立って、測定器を携えて、電磁石コイルの自己インダクタンス L と、コイルと鉄芯との間のコンデンサー C (延いてはコイルと大地との間のコンデンサー) の測定に出掛けた。HIMAC の電源メーカーの人も一緒だったが、松本先生は、そんな測定は世界でも初めてではないか、と目を輝かされていた気がする。その測定の結果、特性インピーダンス $Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$ は右端の抵抗 R にほぼ一致した。

大地を流れているため、目には定かには見えず直接測定も出来ない共通モードノイズに対して、12 GeV・PS ではインピーダンス整合が取られていたのである。

経験的に見付けたとは言え、驚くべき技術が開発されていた。日本の加速器技術は素晴らしいと思うが、それが、広く一般的に継承されていないことが残念である。

繰り返しになってくどいようであるが、TARN2 での入射波と反射波の測定データと言い、12 GeV・PS での共通モードノイズに対するインピーダンス整合と言い、一見したところ「2線回路」であるにも拘わらず、大地を3番目の配線として、大地を流れる共通モード電流が存在していることが判明した。電磁石とその電源が特別ノイズに見舞われているとは考え難く、電気回路であればノイズは当然の現象であり、従って、コ

モンモードノイズは必ず存在すると思えなければならぬ。こうしたノイズが、加速器で使用する各種電気回路の不具合の原因になることに、想像を逞しくして、思いを馳せて欲しいと思う。

このように、大地を流れる共通モード電流が、電源や負荷で発生する不具合の原因となっていると考えられる。その昔、筆者は、「2線回路」の電源を作っては、電源筐体の裏蓋を開けて、扇風機で風を送ったりして、冷却してやった経験がある。当時は、そうした発熱の原因が不明であったが、今となって思い返せば、共通モードノイズが原因であったのではないかと思ひ、自分の考えの至らなさを反省している。冷や汗ものであるが、何しろ、共通モードノイズは目には定かには見え直接測定出来ないのであるから、やむを得ない面もある。読者の皆さんには、冷や汗をかくことがないように、「2線回路」をやめにして、「対称3線回路」をお勧めしておきたい。

シンクロトロン電磁石と電源の場合には、次節で説明する HIMAC 他で「対称3線回路」が高性能であるから、それを実現することに尽きるであろう。実際、HIMAC では、治療を開始した1994年から20年経った、2014年の今年、サイリスタから IGBT へと主電磁石電源が更新されるが、この間、サイリスタ電源が故障したとの話を、筆者は聞いていない。ここでも、また、「原理は勝つ!!!」と言いたい。

3.4 HIMAC の「対称3線回路」

図 3.4 に HIMAC の「対称3線回路」¹¹⁾ を示したが、筆者は、「電源と負荷と配線の対称化+共通モードフィルターとノーマルモードフィル

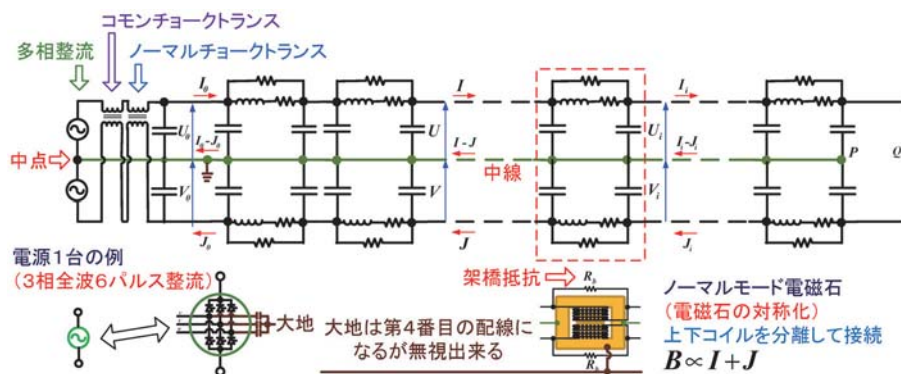


図 3.4 HIMAC の「対称3線回路」。なお、右下に示すように、大地は1本の配線として、こげ茶色の線で表しているが、「対称3線回路」では無視出来る。

ター」とも呼んでいる。図3.2のTARN2での測定データから判明したことは、コモンモードノイズは見付かったものの、ノーマルモードノイズは見付からなかったと言うことである。左端に、元々、組み込まれているノーマルモードフィルターで削減出来ていると考えた。従って、コモンモードフィルターを設けて、コモンモードノイズを削減すれば良い。そこで、筆者は、大地に代えて、左端の上下2台直列につながった電源の midpoint に、中線と称する配線を別途直接つなぎ込んで、「3線回路」にしてやって、ノーマルモードフィルターに加えて、コモンモードフィルターを設けることを思い付いた。この中線に対して、負荷を対称に設けてやれば良いことにも気付いた。負荷の対称化により、コモンモードとノーマルモードとが結合しないようにする訳である。負荷を対称に配置するため、各電磁石のコイルを上下に切り離し、上コイルは上コイルで直列に配線をつなぎ、下コイルは下コイルで直列に配線をつなぎ、最後の電磁石で上下コイルをつないだ。また、鉄芯を中線をつないだ。このとき、各電磁石の磁場はノーマルモード電流で定まり、コモンモード電流は影響しないことになる。これをノーマルモード電磁石と呼ぶことにするが、磁場はコモンモード電流の影響を受けない優れたものである。このとき、大地は4番目の配線になるが、無視して良いことになる。

「対称3線回路」では、コモンモードとノーマルモードとは結合しないので、純粋なコモンモード(筆者注:実際にはコモンモードとアンテナモードとが結合するCA結合モードである)と純粋なノーマルモードとなり、電源の直後に設けたコモンモードフィルターとノーマルモードフィルターが、それぞれのノイズを削減出来ると考えて良い。

ここでは、フィルターの構成の特徴を説明する。図3.4の左端にあるように、コモンチョークトランスとノーマルチョークトランスを直列につなぎ、その後をコンデンサーで中線につないでいる。この配置の結果、コモンモードフィルターとノーマルモードフィルターとはそれぞれのトランスで実現されるので、機能分離型フィルターと、筆者は呼んでいる。これに対して、「第1部 概要編」¹⁰⁾の図2.1(b)に示した、上下に対称に配置したLCフィルターは機能結合型フィルターと言

うことになる。

なお、細かい話ではあるが、電磁石のコイルに抵抗を架橋することが有効であることからして、これらのトランスにも、リアクトルの中間タップから抵抗を架橋してやっている。純粋なリアクトルは存在出来ず、どこかにコンデンサーがあつて、必ず、共振すると、筆者は、その昔から、考えており、それを緩和したいと考えたからである。

この回路の結果、HIMACのサイリスタ電源では、図中にあるスタティックフィルターの直後の電流のノイズは $\frac{\Delta I}{I_{dc}}$ にして2 ppmであった。また、図中には示していないが、リアクトルトランス方式のアクティブフィルターを上下に2台対称に設けており、その直後では0.3 ppmになった。筆者は、ノイズもナノワールドになったと言っている。

以下では、既刊の解説や論文では議論して来なかったことを、引き続いて、紹介したい。ノイズとシグナルとの関係を議論したいが、図3.4において、左端に設けた電源が上下2台設けられていることと、深く関係する。そのそれぞれは、サイリスタ電源で、さらに、簡単のため、例えば、3相全波整流の6パルス整流の電源であるとし、上下2台の電源の相をひねって、12相整流の電源とする。実際には、HIMACの偏向電磁石では48パルスの、また、四極電磁石では24パルスの多相整流であるが、ここでは、話を簡単にするため、12相整流即12パルス整流としておく。このとき、上下2台の電源は同期していないことになる。

この電源を用いて、電磁石を台形励磁するとき、それが、所望して実現したいシグナルである。ノーマルモード電磁石であるから、励磁電流は上コイルを流れる電流 I と下コイルを流れる電流 J (筆者注: I と J とは逆向きに定義している) の和 $I + J$ で定まると考えて良い。図3.4の左端にある上下2台の電源の電圧の和 $U + V$ により電流の和が定まるので、台形励磁のシグナルが定まると考えて良い。そうは言っても、そのシグナルも台形励磁として時間変化するので、シグナルの時間微分や減衰振動のノーマルモードノイズが発生する。ノーマルモードノイズに対しては、図3.4の回路の右端は末端短絡であるから、電流としては、同相の反射波が発生する。左端の電源の直後には

ノーマルモードフィルターが設けてあるので、もちろん、その効果でノーマルモードノイズは削減される。また、電磁石の各コイルには抵抗が架橋されているので、損失付きの伝送線路と見做すことが出来るので、反射波も小さいと考えて良さそうである。

ただし、断っておきたいことは、ここでは「対称3線回路」の場合を議論しており、ノーマルモードはコモンモードと結合していないときであり、問題にしたいのはコモンモードノイズである。ざっくりと一言で言えば、このノイズは台形励磁と言うシグナルとは直接関係しないノイズと考えて良い。2台の電源のそれぞれの6相の電圧 U と V とは同期しておらず、位相をずらして12相整流としている。こうした回路動作をさせるため、中線を通る電流が不可避免的に発生する。その電流 $I-J$ はコモンモード電流であり、それがコモンモードノイズの原因となっている。このコモンモードノイズは6相の電源を2台組み合わせると12相整流の電源としたことにより発生しており、ノイズと言うものの、回路理論で取り扱うことが出来る電磁気現象であることには間違いがない。ノイズの起源が不明と言うようなことにはならないのである。しかし、図3.4の限りでは、左端に機能分離型フィルターとして、コモンモードフィルターを設けているので、コモンモードノイズが削減出来ている。

3.5 J-PARC・MRの負荷と配線の対称化の前と後のコモンモードノイズ

何時頃開催されたJ-PARC加速器担当者打ち合わせであったかを記憶していないが、J-PARC・MRの励磁電流のノイズに関する報告で、図3.2に示したTARN2での測定データで、右列の1番上の、架橋抵抗がないときと同じく、入射波と反射波が発生していることに、筆者は気付いた。打ち合わせで、それを指摘した積りであるが、定かではない。そのときのJ-PARC・MRの測定データを、筆者は手に入れ損ねたので、残念ながら、皆さんにお示しすることが出来ない。

こうした測定データは波形に関するものである。最近では周波数スペクトルの測定が多いようで、波形の測定から電磁気現象を読み取る機会が減っている。しかし、何度か述べて来たように、コモンモードノイズは入射波とその反射波の組み合わ

せで同定出来るようなので、波形を、軽視することなく、しっかり測定することをお勧めしておきたい。それにオシロスコープではプローブが2つ付いていて、2つの信号の和を取ったり差を取ったりすることが出来る上、入力インピーダンスも50Ωにしたり、高抵抗にも出来る。最新のスペクトラムアナライザーもそうなっているのかも知れないが、ロートル(老頭児)の筆者は知らない。交流系統のコモンモードもまた、相間電圧と電流の時間測定で、筆者は知った⁷⁾。波形の測定をお勧めしておきたい。

J-PARC・MRでは、TARN2と同じ現象が起こるのであるから、図3.4のHIMACの「対称3線回路」がおすすめである。2008年の年末、MRでは、負荷と配線の対称化、及び、架橋抵抗設置の作業が行われた。ただし、電源には中点がないので、電源を対称化することが出来ず、コモンモードフィルターを設けることは出来なかった。そのためであろう、実現された性能は悪くはないものの、限定的であった。その結果、HIMACよりも1桁近く、ノイズが大きい。そうは言っても劇的に良くなった。2008年末、この対称化の作業の終了後3日にして、30 GeV加速と速いビーム取り出しに成功した。

図3.5にMRの四極電磁石の対称化の前と後の、回路図と測定データ¹³⁾を示す。ただし、この図では、鉄芯を別途の配線につないでいることが省略されており、また、各コイルの架橋抵抗も省略されていることを注意しておきたい。ところで、対称化の「前」と「後」の測定データは世界にも一例しかないと思われ、TARN2での架橋抵抗の「あり」と「なし」の測定データと同じく、コモンモードノイズの存在を明らかにした。

ところで、四極電磁石の面白いところは、負荷の対称化は、N極はN極でつなぎ、S極はS極でつなぐと、磁場はノーマルモード電流で定まる点である。それも、厳密に言えば、四極電磁石の断面形状は、円とか正方形でなければならないようである。それはそれとして、ざっくりと一言で言えば、コモンモードノイズがあっても磁場には影響しないと考えられるので、お勧めの配線方法である。確かに測定データもそう見えないこともない。しかし、そうは問屋が卸してはくれず、HIMACよりもノイズは1桁以上多いようである。

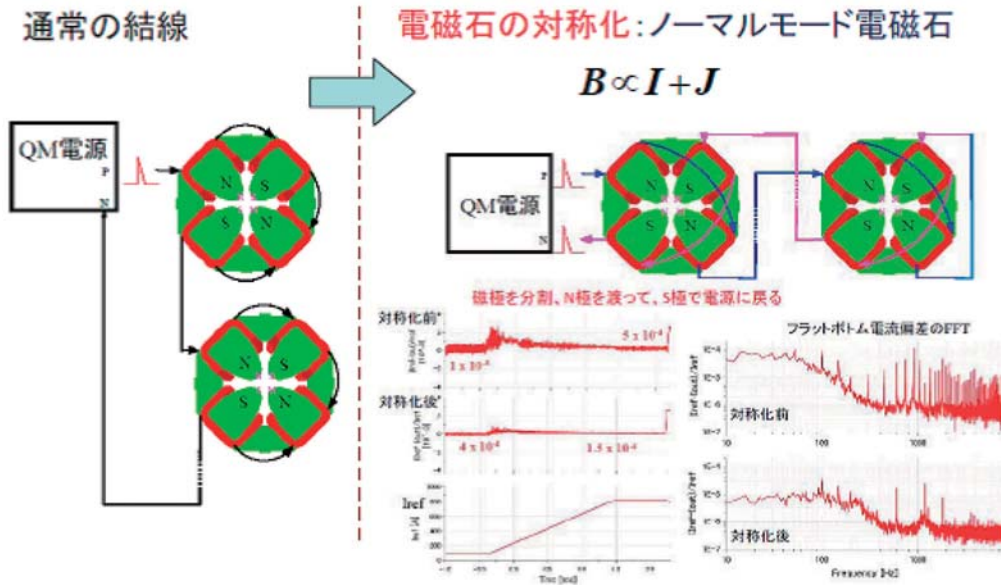


図 3.5 MR の四極電磁石の負荷と配線の対称化. なお, 対称化の後には, 各コイルには架橋抵抗が設けられており, また, 鉄芯は 3 番目の配線につながれているが, いずれも省略されている.

ノーマルモード電磁石は優れものではあるが, それだけでは, 完全ではないようである. コモンモードフィルターがないので, コモンモードノイズが削減出来ておらず, その一方で, コモンモードとノーマルモードとは結合し, その結果, ノーマルモードノイズが削減出来ていないようである.

ここで脱線. 筆者にとっては悔しいことであるが, HIMAC の四極電磁石では, 負荷の完全な対称化が実現出来なかった. 上の N 極と S 極を配線をつなぎ, 下の S 極と N 極をつなぐ設計で発注をしてしまったからである. それに気付いて訂正を申し入れたが, 時すでに遅く, 製作に取り掛かっていたため, 変更出来なかった. そのため, 水平方向の磁場はノーマルモード電流のみで定まるものの, 垂直方向の磁場はコモンモードとノーマルモードの 2 つの電流が影響しており, 実測でも磁場に違いが見えている. 閑話休題.

さて, J-PARC の MR の偏向電磁石では, 素晴らしいことが実現された¹³⁾. 偏向電磁石では 6 台の電源を使用するが, 「対称 3 線回路」にするには, 当初の設計のように, 6 台の電源を直列につなぐことは出来ない. そこで, リングの偏向電磁石を 6 グループに分けて, そのグループ一式を 1 台の電源で励磁する必要がある. 即ち, 6 台の電源を独立に運転して, 同期をとる必要があるが, それに成功している. この成功により, 今後リン

グが大型になることがあっても, 独立した電源と負荷にすれば良いことが, 実践で示されたことになる. 本当に素晴らしい技術が完成した. 現在は大型の線形加速器の時代のようなのであるが, そのうち, 大型の円形加速器の時代が来るかも知れない. そのとき, きっと役に立つ技術である.

なお, 図 3.5 は, 世界初とも言える凄い測定データであることを指摘しておきたい. それは, 対称化の前と後とで, 100 Hz 以下の周波数の連続スペクトルが, 約 1 桁, 振幅が小さくなっていることである. 電力にして約 2 桁小さくなっている. そもそも, 何故連続スペクトルになるのかの理由が判然としていない. 100 Hz の波長は 3,000 km であり, 北海道から沖縄までの距離である. 筆者は, 大地にはこのような周波数成分のコモンモード電流が流れており, 対称化の前と後との違いは, 電気回路がそのコモンモード電流を取り込むかどうかの違いであると想像している. 「対称 3 線回路」は, 電源外部にコモンモード電流を吐き出さないと同時に, 外部からコモンモード電流が入り込まない動作を持つと想像する. これに対して, 対称化前の「2 線回路」ではコモンモード電流を取り込んでいたのではないかと思う. こうした 100 Hz 以下の連続スペクトルの原因は, 発電所や変電所さらには周波数変換所 (関西 60 Hz ⇔ 関東 50 Hz) では, 大地をコモンモード電流の捨

て場にしているからではないかと思う。こうした強電回路でも、大地をコモンモード電流のゴミ捨て場としないように、「対称3線回路」にしたいものである。

3.6 実践に取り組む青年は荒野を目指せ!!!

3.6.1 実践に導かれた理論

日本学士院紀要に掲載された、土岐博・佐藤健次の共著論文¹⁾の題名は、「ノイズ削減の新しい実践から得られた多導体伝送線路の新しい回路理論」と邦訳出来る。「ノイズ削減の実践」が「新しい回路理論」への道を拓いたと言える。筆者は、新しい実践と新しい理論の両方に、幸運にも、巡り合わせた。「第1部 概要編」¹⁰⁾で述べたように、「新しい回路理論」は、土岐さんが「電位係数」と「遅延ポテンシャルの交流複素数表示」と言う回路理論の新しい原理を発見したことにより、完成した。また、この「新しい回路理論」から、日本学士院紀要の共著論文¹⁾では、Anticipation of new paradigm of basic electromagnetism と題する節を設けたり、「第1部 概要編」¹⁰⁾では、「新しい古典電磁気学の到来の予感」と言ったりしている。筆者は浅学にして、パラダイムの何たるかについては詳しくないので、そう呼ぶのは大げさな気もするが、「第3部 理論編」でも触れるように、電磁気学も見直す必要がありそうである。

最近、電磁気学の参考書や教科書の多くは、「電磁気学の応用」ということを前提にしているかのように書かれており、電磁気学は、マクスウェル方程式、それも、特に、遅延ポテンシャルと言う、美しい体系を持つ理論としてではなく、電気機器作りの単なる道具であるかのように、教えられ教えて来ている。しかも、「応用」の多くは、過去の経験を継承し発展させることであるかのように誤解され、筆者には、その道のプロが闊歩している世界に見える。

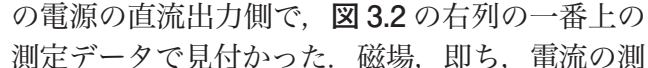
「第1部 概要編」では、従来の回路理論は3通りに分類され、それぞれに、「もっともらしい仮定や大胆なモデル化さらには思い切った近似が暗黙のうちになされていた」と書いた。このとき、そのそれぞれは、ある条件の下では、実際に発生する電磁気現象の一部を、それなりにうまく説明出来るのも確かである。しかし、筆者が問題にしているのは、それでは説明出来ない電磁気現象としてノイズが発生しているということであり、そ

れを説明するためには、これら3通りの回路理論を包括出来る回路理論が必要であり、それが、土岐・佐藤の「新しい回路理論」であることを主張している。

今般、実践から理論が導き出され、電磁気学の見直しが始まろうとしている。言い換えれば、美しい理論体系として電磁気学の再構築を目指す訳であるが、それには、何としても、これまでの実用に重点を置いた経験では不合理が発生していることを示す、数多くの新しい実践例が必要とされている。

このように、「実践に導かれた理論」の流れが今後とも必要で、現場で実務に取り組む研究者にして、初めて、電磁気学の見直しが実現出来ると言っても、過言ではない。それも、目には定かに見えず直接測定も出来ないコモンモードノイズが存在することを明らかにする必要があるだけに、まるで、荒野をさまようようなことになる気がする。筆者としても、荒野を目指したいところであるが、ロートル（老頭児）にして、それが叶わない。「実践に取り組んでいる青年は荒野を目指せ!!!」と言っておきたい。

3.6.2 筆者が経験したコモンモードノイズの見付け方

筆者は、コモンモードノイズを、2回に亘り、見付け出す機会に遭遇した。1つ目は、TARN2の電源の直流出力側で、 3.2の右列の一番上の測定データで見付かった。磁場、即ち、電流の測定データにおいて、入射波と反射波の2つのパルスが発生しており、2つのパルスの位相関係から、コモンモードノイズが見付かった。2つ目は、PF-ARの電磁石電源を、サイリスタからIGBTに置き換えたとき測定された、交流系統の1つの相間電圧のノイズと1つの交流電流のノイズの現れ方の違いから、交流系統のコモンモードノイズが見付かった⁷⁾。

ここで断っておきたいことは、筆者自らがコモンモードノイズを見付けた訳ではないということである。筆者はTARN2の測定データに基づいて、放医研HIMACで「対称3線回路」を製作したところ、ノイズがほとんどゼロの電気回路が実現され、コモンモードノイズの何たるかを知ることは出来なかった。

それにしても、上に述べた見付け方は合理的で

あるらしい。伝導ノイズには、コモンモードノイズとノーマルモードノイズの2種類がある。こうした2種類あるノイズから、目には定かに見えず直接測定出来ないコモンモードノイズが同定出来るには、電圧とか電流と言う1つの物理量を測定した場合には、入射波と反射波の2種類のパルスが観測される必要があり、電圧とか電流と言う2つの物理量を測定した場合には、2つの物理量において、ノイズの現れ方の違いが観測される必要がある。

こう書くと、何となく、筋が通っていて、説得力があるようだが、とんでもない嘘っぱちかも知れない。何故なら、数式に基づいて書いている話ではなく、筆者の経験に基づく直感に基づいているからである。何とか数式で語りたいたい、「第1部 概要編」の(2.3.1)から(2.3.6)までの、電位や電圧、及び、電流の式を眺めてはいるが、悲しいかな、ロートル(老頭児)の筆者では、関くことがない。

ただし、入射波と反射波の場合には、架橋抵抗と言うノイズ削減の対症療法は、**図 3.2**の右列の下の2つの測定データで示したように、反射波を消してしまうので、対症療法は、却って、ノイズの起源を曖昧にしている。この場合には、やはり、電圧と電流の2つの物理量を測定する必要があると思う。しかし、これまで、誰一人として、そうした測定、即ち、実践を行った人はいない。

3.6.3 コモンモードノイズを探し出そう

既に、「第1部 概要編」¹⁰⁾で、「ノイズに気付いたら、それはコモンモードノイズであると思え」と書いたが、再度、そう言っておきたい。しかも、何も、電磁石の電源に限った話ではなく、電気回路では、そうした題材は、ごろごろと、ころがっていると考えられる。しかし、なかなか、コモンモードノイズが見つからない。もちろん、コモンモードノイズは大地を流れる電流であるため、目には定かに見えず直接測定も出来ないのも、やむを得ない面もある。新しい測定方法や測定機器の開発を含めて、コモンモードノイズを探し出すことに挑戦されることを提案しておきたい。

もつとも、読者の中には、大地が関与しているノイズに気付かされている人も多いのではないかとと思う。そのノイズはコモンモードノイズと呼ばれ

ている気がするが、そうしたノイズが発生するのは、「2線回路」が大地に近いと説明されることがある。「2線回路」を大地から遠ざけたいとなったり、絶縁したくなったりするが、そうした方法はほとんど成功しない。筆者の考えでは、大地から遠ざけて見たところで、近くにある導体が大地の代わりをするからである。

こうした現象を避けるためには、大地や近くの導体に代えて、「2線回路」に別途3番目の配線を設け、へ理屈抜きで、「対称3線回路」を製作することを提案しておきたい。これまでの「2線回路」で起こっていた、各種の不具合が消えてなくなることを、請け合いである。「対称3線回路」と「2線回路」との比較で、コモンモードノイズが各種の不具合の原因であったことを説明しても良い。

ところで、**図 3.1**や**図 3.3**は、電磁石を直列につないだときの集中定数回路要素からなる回路の繰り返し回路であるが、ざっくりと一言で言えば、極限的には、伝送線路回路になると考えて良い。これからして、「2線回路」の同軸ケーブルで信号を送るとき、大地が、何の断りもなく、勝手に、3番目の配線になり、その結果、コモンモードの反射波が発生することが考えられる。繰り返しになりくどいようであるが、**図 3.2**の右列の1番上の測定データでは、実際に、そうなっている。

そこで、筆者なりに考えて見たところ、加速器技術で言えば、高速キッカー電磁石を、同軸ケーブルを伝送線路として用いて、矩形波形や台形波形で励磁するとき、コモンモードの反射波が発生する可能性があることに気付いた。そう言う目で、測定データを眺めて見ると、速いビーム取り出しの高速キッカーでは、主パルス後に、必ず、反射波が観測されていることを知った。しかも、同軸ケーブルの特性インピーダンスで負荷をインピーダンス整合しても、この反射波は消えてはくれない。ここで言うインピーダンス整合はノーマルモードに対するものであって、**図 3.3**のような、大地を流れるコモンモードに対するインピーダンス整合ではないからであろう。

高速キッカーは1959年に運転が開始された¹⁴⁾ようであるが、その始まりからこれまでの50年強の間、反射波の発生に加えて、励磁波形のひずみの他に、放電、アウトガス、機器破損、等々の

不具合に見舞われている。電磁石として、分布定数型高速キッカーでは不具合が起り易いと考え、集中定数型高速キッカーに取り組んでは見たものの、相変わらず、反射波を消すことが出来ないようである。

こうした不具合、特に、反射波は、コモンモードノイズが原因になっていると考えれば良さそうである。そもそも、図 3.1 に示すような、電磁石と電源の電気回路でさえ、図 3.2 の右列の 1 番上の測定データに示すような、コモンモードの反射波が発生していたのであるから、高速キッカーでコモンモードの反射波が発生しない理由など、ある訳がないと思う。

それどころか、同様の不具合は、日本学士院紀要の土岐・佐藤の共著論文¹⁾に書いたように、ジャンボ機 B787 の電池破損やハイブリッドカーの電池のトラブルとして、起きていると思われる。しかし、これらの不具合は、目には定かに見えず直接測定も出来ないコモンモードノイズで発生するので、不具合の原因が不明であるとされる。

これらの電気機器の不具合と高速キッカーの不具合は、筆者には、同根に見える。加速器技術で明らかに出来れば、物理の研究だけに止まらず、人命に直接かかわる電気機器への朗報になるであろう。また、「第 1 部 概要編」では、「CA 結合モードノイズによる電力浪費を避け、環境にやさしい電気回路を開発し普及させよう」と書いた。コモンモードノイズの特定と削減の実践例が増えれば増えるほど、単に、この世の電気技術が変わるだけでなく、さらに、これまでの電磁気学が変わる。

ここまで説明すると、もう、十分であろう。そうかと言って、図 3.3 で示したような、単にコモンモードに対するインピーダンス整合をお勧めしている訳ではない。コモンモードノイズそのものを削減すべく、配線の本数を 3 本にして、電源を 2 台、負荷を 2 台、対称に設ける、「対称 3 線回路」がお勧めで、それに加えて、インピーダンス整合するのである。言い換えれば、「2 線回路」をやめなさいと言うことであるが、何も高速キッカーだけにとどまらず、少なくとも不具合が発生した電気機器類の原因は目には定かに見えず直接測定も出来ないコモンモードを想定して、原因解明に取り組むと言うことである。その昔から、教えられ教えて来たこと、即ち、これまでの経験を、一

先ず横に置いて、「実践に取り組む青年は荒野を目指せ!!!」と言うことになるのかも知れない。

3.6.4 補足：上下 2 台の電源の同期

「第 1 部 概要編」¹⁰⁾ の 2.4 節と同じタイトルであるが、さらに、一言しておきたい。最近ではスイッチング素子に IGBT 等が使用され、PWM (Pulse Width Modulation) が行われる。上下 2 台の電源のそれぞれを PWM とする訳であるが、最近のことであるが、その動作は、サイリスタ電源の動作とは、いささか趣が異なるように思えて来た。サイリスタ電源で 12 相パルス整流とすると、上の電源と下の電源とが供給する電流は、必ず、位相が異なっていて、コモンモードノイズは不可避的に発生する。しかし、IGBT 電源を上下対称に 2 台設けた場合、上の電源の PWM と下の電源の PWM とを同期させると、上の電源と下の電源とが供給する電流は、大きさが異なるものの、位相的にはずれがないと思える。要は、相手があつて、そこそこ、対称に見えると言う話である。上下 2 台の電源の PWM が同期していると、電流の大きさは異なるものの、両者の差の電流は小さくなっており、従って、コモンモード電流の大きさは比較的小さいのかも知れない。そう考えて良いのであれば、「対称 3 線回路」は優れものである。それとは異なって、IGBT 方式の「2 線回路」の電源は 1 台で、相手がないので、やめた方が良いと思われる。コモンモードノイズによる部品の破損や部品の発熱が予想されるからである。もっとも、「対称 3 線回路」の PWM 方式の IGBT 電源であっても、直流側にも交流側にも、コモンモードフィルターを設けることをお勧めしておきたい。

3.6.5 補足：筆者の経験に基づくノイズの基礎知識

筆者は、サイリスタ、IGBT、及び、パワー MOS・FET とする 3 種類のスイッチング素子の電源を体験し、ノイズには、素子には依らない共通な振る舞いがあることを知った。簡単に紹介しておきたい。

サイリスタでは転流が 50 Hz で行われるとすると、減衰振動である転流ノイズの周波数は、その百倍程度の 5 kHz 程度である。IGBT のスイッチングが 10 kHz で行われると、減衰振動であるスイッチングノイズの周波数は、その百倍程度の

1 MHz 程度である。また、パワー MOS・FET のスイッチングが 200 kHz で行われると、減衰振動であるスイッチングノイズの周波数は、その百倍程度の 20 MHz 程度である。20 MHz となると、全て電磁波として放射されるかと言うと、そうでもなく、立派に電磁場として伝搬するようである。

いずれの素子であっても、スイッチング周波数の百倍程度の周波数のノイズが発生する。

謝 辞

図 3.2 は、未だに世界でも一例しかないと思われる、1989年の TARN2での測定データであるが、ファックスで、田邊徹美さんから送られて来たものである。架橋抵抗の「なし」と「あり」との違いが判明し、筆者は、コモンモードノイズが間違いなく発生していることを確信し、当時、計算中であった「対称3線回路」に自信が持てるようになった。田邊さんに心から感謝します。2008年の8月に J-PARC・MR 電源検討会がつくばで開催され、筆者は10分間の持ち時間で「対称3線回路」を説明した。その年末に、MR では負荷と配線の対称化と、架橋抵抗設置の作業が行われた。本文中にも説明したが、MR の偏向電磁石におい

ては、6台の電源が独立に運転されている。小林仁さんの大英断である。図 3.5 の対称化の「前」と「後」の測定データは、未だに世界でも一例しかないと思われるが、「対称3線回路」の有効性はますます明らかになった。小林さんに心から感謝します。

参考文献

通し番号が 1) ~ 9) については「第1部 概要編」の参考文献に列挙してある。

- 10) 佐藤健次, 『対称3線回路 (第1部 概要編) — 「ノイズとシグナル」と「コモン-, ノーマル-, 及び, アンテナモード」との間の複雑な関係を単純化出来る電気回路—』, 日本加速器学会誌『加速器』, Vol. 11, No. 2 (2014) 66-77.
- 11) 佐藤健次, 「重イオン・シンクロトロン of 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—」, 日本加速器学会誌『加速器』, Vol. 3, No. 1 (2006) 10-23.
- 12) 田邊徹美, 渡邊伸一, 私信, 1989年
- 13) H. Kobayashi, Beam Commissioning of the J-PARC Main Ring, Proceedings of PAC09, Vancouver, BC., Canada (2009) 1823-1827.
- 14) E.B. Forsyth and M. Fruitman, Fast Kickers, Particle Accelerators, Vol. 1 (1970) 27-39.