

解 説

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—

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 1 Outline)

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”.

「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」と邦訳出来る題名の、土岐博・佐藤健次の共著論文が、日本学士院紀要に掲載された¹⁾。この「新しい回路理論」は、「電源と負荷と配線の対称化+コモンモードフィルターとノーマルモードフィルター」とも呼んでいる「対称 3 線回路」が優れものであることを明らかにした。実践は、20 年強前、放医研 HIMAC の 2 台のシンクロトロン建設に当たり、筆者が考案した。理論は、土岐さんが、遅延ポテンシャルと電位係数に基づく回路理論の新しい原理を発見したことにより、最近、完成した。

理論によれば、一般的な「3 線回路」では、コモンモード、ノーマルモード、及び、アンテナモードが、数式として厳密に定義され、これらの 3 つ

のモードが結合した連立積分微分方程式が得られる。このとき、大雑把に言えば、ノーマルモードはシグナルと考えられ、コモンモードとアンテナモードはノイズと考えられるが、3 つのモードの結合により、シグナルはノイズで汚されることになる。しかし、「対称 3 線回路」では、こうした複雑な関係は単純化され、ノーマルモードはコモンモードとアンテナモードと結合しなくなり、その結果、シグナルに対するノイズの影響は小さくなる。さらに、「対称 3 線回路」は優れもので、コモンモードフィルターを設けることが出来るので、ノイズそのものをほとんどゼロに出来る。

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 1 部である。

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

1. はじめに

土岐博・佐藤健次の多導体伝送線路の「新しい回路理論」^{1,2)}では、スカラーポテンシャルとベクトルポテンシャルと言う電磁ポテンシャルの遅延ポテンシャルを取り扱っている。その理論を、数式を多用せず、可能な限り丁寧に、定性的に解説したいと思い、「概要編」, 「実践編」, 及び、「理論編」の3部を設けて、長々と書き進めて来たが、徐々に、筆者に明らかになって来たことが2つある。本稿の本来の目的とは異なるので、早々と「脱線」になるが、この場を借りて、紹介する。

1つ目は、それなりの仮定やモデルさらには近似を持ち込んで、遅延ポテンシャルの解として、電気回路に関する、以下の3通りの、従来の回路理論を、その昔から、得ていた³⁾と言うことである。

- (1) 従来の回路網理論 (純粋な集中定数回路要素の組み合わせ: L, C, R)
- (2) 従来の伝送線路回路理論 (電磁場の伝搬: 配線の本数が2本の同軸ケーブルやレックヘル線)
- (3) 従来のアンテナ理論 (電磁波の放射: アンテナ)

これらは全て、遅延ポテンシャルから得られる回路理論であると言う訳であるが、そのような筋書で、回路理論を教えられ教えて来た訳ではないので、意外に思われる読者も多いと思う。電気回路では実用が先立って来たためか、(1), (2), 及び、(3)のそれぞれに、基本的な概念があるかのように、誤解して来たのであろう。土岐・佐藤の「新しい回路理論」は、遅延ポテンシャルを取り扱い、これまでにない解法を発見して、(2)と(3)を統一したと言える。さらに、新しい解法に基づいて、以下では、(1)に異議を唱えることを、前もって、断っておきたい。

ところで、一般的には、電気回路理論は、偏微分方程式で表されたマクスウェル方程式に基づく必要があると言われて来たが、それでは、(2)と(3)を統一出来ると言うような電磁気現象が読み取れない可能性があったことになる。ここは、筆者の独断で、マクスウェル方程式ではなく、敢えて、遅延ポテンシャルとしたことをお断りしておきたい。新しい解法については、本稿で後ほど簡

単に説明するが、詳しくは「第3部 理論編」の数式を参考にして頂きたい。なお、遅延形であれば、電場と磁場を取り扱っても良く、それらは、ジェフィメンコ方程式と呼ばれている⁴⁾。

2つ目は、実際の電気回路では、放射ノイズのような電磁波の放射が起こっているのに対して、(3)の従来のアンテナ理論を含めて、これまで、それを説明出来る回路理論がなかったと言うことである。言い換えれば、電磁波の放射を取り扱える回路理論が決定的に重要であるが、それがなかったと言うことである。

ここで、従来の電磁気学と電気回路の、我々の経験や知識をまとめておこう。筆者自身だけでなく多くの皆さんの経験として、さらには、ノイズの参考書では、電気回路から電磁波が放射されていることは周知の事実である。何もアンテナでなくても、一般的な電気回路であっても、観測事実として、電磁波の放射が起こっている。そして、ノイズと電磁波の放射の削減に悩まされ続けて来ている。それどころか、コモンモードとノーマルモードの2種類のノイズや電磁波の放射は、目には定かに見えず直接測定出来ないこともあり、それらが原因となって、電源や負荷の破損、さらには、回路要素の発熱や制御回路の誤動作が起こっており、これにも困っている。

その削減方法には決定版がなく対症療法になっているが、それと言うのも、配線の本数が多数あるときの電気回路で、ノイズとシグナルの他に、電磁波の放射が起こる過程が、回路理論として不明であったからである。配線の本数が多数あるとき、それらを流れる電流の総和がゼロでないとき、まるで、1本の配線に電流が流れているかのようなアンテナになって、電磁波の放射が起こると考えれば良い。ところが、これまでの回路理論では、電磁波の放射は起きないのである。(2)のような電磁場の伝搬に関しては、配線の本数が2本の同軸ケーブルやレックヘル線のような伝送線路の場合、配線と配線の間にはコンデンサーがあるとされ、そこに変位電流が流れると考えるので、その変位電流を含めてキルヒホフの第1法則(電流則)が成立し、複数の配線を流れる電流の総和がゼロになってしまい、電磁波の放射は起こらない。また、集中定数回路としては、純粋なコンデンサーの他に、純粋なインダクタンスと純粋な抵抗があると

し、それらを組み合わせて、配線の数が多いある電気回路にした場合の(1)のような回路網理論でも、事情は同じで、電流の総和はゼロになり、電磁波の放射は起こらない。我々が実際に経験する電磁波の放射を説明出来る回路理論が、これまでなかったと言える。

こうした事情をざっくりと一言で言えば、コンデンサーは駄目であり、変位電流は駄目であり、キルヒホフの第1法則(電流則)も駄目と言うことで、驚かれた読者も多いかと思う。どうすれば良いのかと考えると、配線で生じる電気現象は、我々が既に知っている、配線で生じる磁気現象から類推すれば良い。1本の配線は自己誘導係数(自己インダクタンス)を持ち、2本の配線の間には相互誘導係数(相互インダクタンス)がある。これに対応して、土岐さんは電位係数の重要性に気付いた。土岐・佐藤の「新しい回路理論」は、電位係数と誘導係数に基づく、多導体伝送線路回路の新しい解法である。そのとき、誘導係数と同じく、1本の配線は自己電位係数を持ち、2本の配線の間には相互電位係数があると考えれば良い。

また、1本の配線は自己電位係数と自己誘導係数を持つので、その結果、1本の配線であっても、電気現象と磁気現象が同時に発生する。マクスウェル方程式では電気と磁気の双対性が成立しているが、1本の配線でも同じく成立していることになり、この新しい知見からしても、「新しい回路理論」が正しいことは、直ちに、読み取ることが出来る。

驚きは、さらに、続く。配線の数が多い1本でも、言い換えれば、導体の数が多い1つでも、電気現象と磁気現象とが同時に発生するので、純粋な電気現象と純粋な磁気現象は発生出来ないことになる。その結果、集中定数回路要素として、電気現象のみの純粋なコンデンサーや、磁気現象のみの純粋なインダクタンスが存在出来ないことになる。(1)に異議を唱えていることになるが、こんなことを突然言われても、またまた、戸惑われる読者も多いかと思う。筆者が、その昔、周波数広帯域の高周波加速空洞や高周波大電力増幅器や高周波自励発振器の開発研究に取り組んだときの経験では、どの集中定数回路要素であっても、周波数を変えると、必ず、共振が起こって、純粋な動作が損なわれ、使用可能な周波数範囲が大幅に制限された。

何が原因なのかと考え込み、大いに悩んだが、30年近く前、こうした共振の原因は、電気現象と磁気現象が同時に発生することに求められることに気付いた。ざっくりと一言で言えば、コンデンサーであれば何処かに自己インダクタンスがあり、コイルのような自己インダクタンスであれば何処かにコンデンサーがあり、共振すると言う話である。こうした同時発生が自動的に組み込まれている点でも、「新しい回路理論」は優れたものであることが理解されよう。

ところで、遅延ポテンシャルからは電磁波の放射を知ることが出来るはずである。これに関して、土岐さんは「遅延ポテンシャルの交流複素数表示」に気付いた。遅延ポテンシャルを交流に対して複素数で表示すると、その実数部は電磁場の伝搬を表し、その虚数部は電磁波の放射を表すことを明らかにした。このような電磁気現象が起こることは、マクスウェル方程式を眺めているだけでは思い付かれることはなく、遅延ポテンシャルにして、初めて気付かれたと言える。筆者が遅延ポテンシャルと騒ぎ立てる理由は、ここにある。

このとき、スカラーポテンシャルの実数部の伝搬は電位係数で表され、ベクトルポテンシャルの実数部の伝搬は誘導係数で表される。また、電磁場は、実数部の伝搬の電磁場と虚数部の放射の電磁場の和になっているので、伝搬と放射とは同時に発生する。極端な例で言えば、導体の表面で、伝搬の電磁場と放射の電磁場とがお互いに相殺して、両者の和がゼロになる場合があっても良い。伝搬の電磁場は、導体の表面を離れても、その後、導体の表面に再び舞い戻るのに対して、放射の電磁場は、導体の表面を離れると、その後、遠方まで飛び去ることになる。このとき、導体表面での両者の混ざり具合は、表皮効果を考慮に入れた導体の抵抗で定まり、従って、導体の表面での、内部と外部の電磁場の間の境界条件が、両者の混ざり具合を決めることになる。このように、境界条件が、導体の内部と外部の電磁場の間の関係を定めるので、導体の内部では、連続の方程式(電荷の保存則)が成立しているとすれば良く、キルヒホフの第1法則(電流則)は不要になる。

また、従来の電気回路理論では、境界条件を満たすためには、完全導体が存在出来るかと仮定して来たが、伝搬と放射が同時に発生するので、それ

も不要になる。

以上のように、境界条件が登場する(筆者注:「第3部 理論編」参照)のが、従来の電気回路理論では見られなかった、土岐・佐藤の多導体伝送線路の「新しい回路理論」の大きな特徴である。その昔から、従来のアンテナ理論はあり、遅延ポテンシャルを取り扱うことにより、電磁波の放射は既に回路理論として解かれていたと考えたくなる。しかし、それはどうも誤解のようである。原理をざっくりと一言で言えば、その理論では、遅延ポテンシャルを使用するものの、導体の表面での、内部と外部の電磁場の間の境界条件は一切考慮されていない。そのため、1本の導体の真電荷や伝導電流の分布が既知として人為的に与えられ、導体の外部の、それも特に、遠方の空間での電磁場の挙動を計算するものであり、配線に沿っての電磁場の伝搬を取り扱うことが出来ない。実際、(3)のような従来のアンテナ理論では、遠方でのポインティングベクトルは導体を流れる電流の絶対値の平方に比例することが示されているので、電流による磁気現象のみが解かれており、電気現象は無視されて来たと言える。その結果、配線に沿っての電磁場の伝搬については不問に付されて来た。言い換えれば、1本の導体ではコンデンサーが定義出来ないので、電気現象が無視されて来たことになる。ここでも、また、我々が実際に経験する電磁波の放射を説明出来る回路理論がこれまでなかったと言える。

「遅延ポテンシャルの交流複素数表示」と境界条件に基づく、土岐・佐藤の多導体伝送線路の「新しい回路理論」が、この問題を解決したと言える。電気現象と磁気現象が同時に発生する上に、電磁場の伝搬と電磁波の放射が同時に発生するので、電位や電圧に加えて、各配線に流れる電流を計算出来る。従って、(2)と(3)を統一したと言える。

しかし、(1)の集中定数回路要素に関しては、筆者の現在の實力では、「新しい回路理論」で解を得ることが難しく、今後の研究課題である。正直に言えば、その回路理論を作り上げることは非常に困難に思え、絶望的とさえ思うばかりである。遅延ポテンシャルの立場からすると、その昔、純粹な集中定数回路要素が存在すると言う(1)にたどり着くには、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

されていたことになる。それが間違いの元であったようである。ただ、言えることは、集中定数回路要素のどれ1つをとっても、「新しい回路理論」が明らかにしたキーワードで言えば、電位係数と誘導係数、電気現象と磁気現象の同時発生、電気と磁気の双対性、電磁場の伝搬と電磁波の放射の同時発生、境界条件、連続の方程式、等々を適用して、それらの動作を見直すべきであるということである。その結果、集中定数回路要素のどれ1つをとっても、共振に加えて、伝搬と放射の同時発生が起こり、集中定数回路要素を組み合わせた電気回路網では、伝搬のみならず、放射も起こることが説明出来ることになる。

ところが、これで全てが明らかになると言う訳ではなく、未解決の原理的な問題が残されている。それは、金属抵抗性導体の内部で発生している電磁気現象が判然としていないということである。金属抵抗性導体は、金属原子、及び、金属イオンと自由電子で構成されているが、従来の考えでは、導体内部は電氣的に中性であるとされて来た。しかし、それでは場の理論に反することに、筆者は気付いた。現時点では、直流が金属抵抗性導体の内部を流れる場合⁵⁾に限って、場の理論を満たす解⁶⁾を得ているものの、交流電流が流れる場合の解、即ち、従来の表皮効果の見直しと言うことになるが、その解は得られていない。

とにかく驚きの連続であるが、上に列挙したキーワードのどれ1つを考えても、従来の古典電磁気学の見直しが必要であると思え、筆者は、「新しい古典電磁気学の到来の予感」と呼んでいる。その見直しは、最新の物理学の成果である「場の量子論」を古典電磁気学に適用出来るように概念としてまとめ上げ、そのまとめである「場の理論」に基づけば良いようである。もちろん、先ほど示したキーワードを成立させると同時に、コンデンサーは駄目であり、変位電流は駄目であり、キルヒホフの第1法則(電流則)も駄目と言うことが、素直に、説明出来なければならない。

本稿の本来の目的とは異なる「脱線」で、多くの頁を費やしてしまったが、ここで、閑話休題とする。

本稿は、筆者が長々と書き進めて来た、「概要編」、「実践編」、及び、「理論編」の3部のダイジェスト版であり、説明不足のため論理の飛躍がある

かも知れない。読者の皆さんには、よろしく、本稿にお付き合い願いたい。

2. 概要編

2.1 概要編・はじめに

筆者は、これまで、「ノイズ削減、ノイズ削減」と、はしゃいで騒ぎ過ぎて来たためか、皆さんは、ノイズという言葉に囚われ、電気回路で発生している電磁気現象の真の姿を、誤解されて来たようである。最初に注意しておきたいことは、ノイズと呼んではいるものの、シグナルの一種に過ぎないということである。いわゆる信号対雑音比(S/N: Signal to Noise Ratio)で言うシグナルと同じく、ノイズもまた、その起源を回路理論で知ることが出来る電磁気現象であるということである。このことは、読者によっては、ノイズに対する物の見方を変えなければならない、ということになるのかも知れない。もちろん、ノイズと言え、熱雑音やショット雑音などの統計的に取り扱うべきものがあるが、本稿では、その種のノイズは対象外として、除外している。

こうしたシグナルとノイズの電磁気現象を回路理論で語るためには、一般的には、多導体伝送線路の回路理論が必要であり、土岐博さんと筆者との共同研究により、その「新しい回路理論」の構築に成功している^{1,2)}。しかし、本稿では、その特別な場合で、実用的でもある、配線の本数が3本の「3線回路」に重点を置いて議論を進め、「対称3線回路」が優れものであることを示したい。ただし、ここで言う「3線回路」は、シグナルを伝送するために2本の主配線があり、それとは別途、3番目の配線を設け、しかも、電源を2台、及び、負荷を2式、設ける回路配置を持つものである。

なお、ここで注意しておきたいことは、2本の主配線以外に、別途3番目の配線を設けない、広く普及している「2線回路」の場合には、本稿の『2.5 「2線回路」の不幸、及び、「対称3線回路」の薦め』の節で詳しく述べるように、「2線回路」では、何の断りもなく、勝手に、大地が3番目の配線となる「3線回路」になって、ノイズが発生しているということである。こうした「2線回路」の不幸とも呼べる事実からして、制御不可能な大地の勝手な振る舞いを避けるためにも、「2線回

路」では、制御可能な3番目の配線を、別途、設け、それに際して、「対称3線回路」にするのが良いことになる。

なお、電源と言う言葉を使用しているが、土岐・佐藤の「新しい回路理論」は一般的なものであるので、信号源と言い換えても良い。アナログ信号源であろうと、デジタル信号源であろうと、本稿では、電源と呼ぶことにする。

ところで、「新しい回路理論」は難解であるが、本稿で、縷々、説明するように、ノイズと言う電磁気現象がそもそも難解であるため、それを説明出来る回路理論が難解であるということに過ぎない。特に、これまで、放射ノイズのような電磁波の放射を取り扱う回路理論が不備であったため、従来教えられ教えて来た知識が役に立たず、かえって邪魔をして、「新しい回路理論」の理解を難しくしていると言える。

2.2 電気回路のトポロジー、及び、「3線回路」と「対称3線回路」

電気回路のトポロジーと言う考えがある。筆者はその詳細を知らないが、「トポロジー」と言う言葉に飛び付いた。「対称3線回路」はその考えの最新版ではないかと思ったからである。

最初に、図2.1(a)のような、配線の本数が2本の交直変換器の電気回路を考えよう。この回路は、パソコンにつなが込むACアダプターと思って良い。その場合、この図2.1(a)では省略しているが、ケーブルの先端の負荷直前には、2本の配線を一まとめにして、フェライトコアなり、コモン

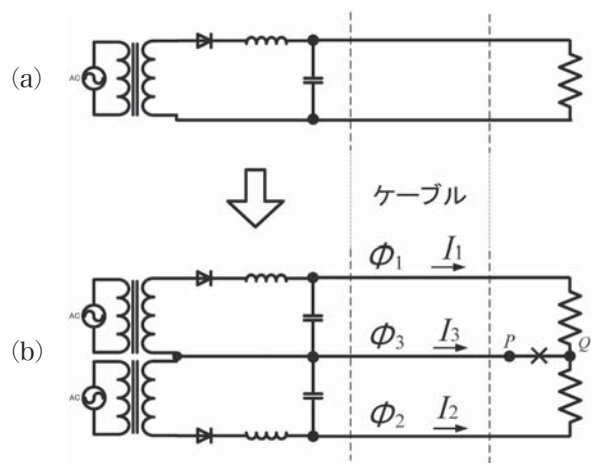


図2.1 電気回路のトポロジー
(a) 「2線回路」の交直変換器
(b) 2台の交直変換器を配線の本数を3本にしないだときの「3線回路」と「対称3線回路」

モードチョークに通してあるのが通例である。先にも述べたが、大地が3番目の配線になる、「2線回路」の不幸が発生し、その結果、ノイズが発生し、それを何とか削減したいと言うことで、考え出された対症療法であろう。

このように、目には定かに見えない大地が勝手に3番目の配線になることを避けるために、「トポロジー」が登場する。図2.1(a)の「2線回路」を2式用意して、一方を他方に対して、上下反転し、配線の一方を共通にして、図2.1(b)のような、電源を2台持つ「3線回路」としてやる。このとき、1番上と1番下の配線が主配線である。ただし、右端の上下2つの抵抗には直流を流したいと考えるから、右端の点Pと点Qとの間には×印を示しているが、開放とするか、何らかのインピーダンスでつないでやるものとする。こうした配置にすると、大地は4番目の配線になる。

上下2式の電気回路が異なっている一般的な場合には、「3線回路」と呼ぶことにする。上下2式の電気回路が同一であれば、HIMACの「対称3線回路」(図3.4:「第2部 実践編」参照)と同じような配置になる。筆者は、「対称3線回路」を、「電源と負荷と配線の対称化+コモンモードフィルターとノーマルモードフィルター」とも呼んでいるが、図2.1(b)は確かにそう見える。このときには、4番目の配線となっている大地は、もはや、「対称3線回路」の動作には影響しなくなると考えて良い。ただし、図2.1(b)とHIMACの「対称3線回路」との違いはフィルターの構成が異なることである。図2.1(b)では上下対称にLCフィルターを設けているが、それは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機能結合型フィルターである。これに対して、HIMACの「対称3線回路」では機能分離型フィルターである。計算によれば、どちらでも良い。なお、機能分離型フィルターと機能結合型フィルターに関しては、交流系統の新方式のフィルターの提案⁷⁾に際して、説明しているので、参考にして頂きたい。

こうした電気回路の対称化により、コモンモードフィルターを設けることが出来、コモンモードノイズとアンテナモードノイズを削減出来る優れたものになっている。それにしても、図2.1(b)では、機能結合型フィルターが自動的に備わっているので、電気回路のトポロジーは優れた考えである気が

がする。

2.3 「3線回路」と「対称3線回路」、及び、ノイズとシグナル

「3線回路」では、電磁場の伝搬モードとしてコモンモードとノーマルモードの2つのモードが、また、電磁波の放射モードとしてアンテナモードと呼んでいる3番目のモードが発生し、本節で示す数式により、厳密に、定義出来る。ノイズとして観測されている現象で言えば、前者は伝導ノイズ(コモンモードノイズとノーマルモードノイズ)として、後者は放射ノイズ(アンテナモードノイズ)として、知られているものである。知られているとは言ったが、どっこい、そうは行かない。単に呼び名が知られているだけで、中身は別物である。コモンモードとノーマルモードという言葉自体は、従来から使用されて来たものと同じ(筆者注:土岐・佐藤がそう呼ぶと決めただけのことである)であるが、「新しい回路理論」ではアンテナモードを含め3つあるモードのうちの2つであることからして、従来の定義や意味とは異なるものである。この点で、皆さんがノイズに対して思い描いておられる描像を捨てて頂く必要があり、今回初めて、3つのモードを知ることになったと考えて頂きたい。とにかく、これまでとは異なるので、早合点して、誤解することのないようにして頂きたい。

まずは、図2.1(b)に示す記号を用いて、3つのモードの定義を数式で示そう。3本の配線の電位と電流を、 (ϕ_1, I_1) , (ϕ_2, I_2) , 及び、 (ϕ_3, I_3) と定義する。ただし、いずれも、配線の長さ方向の位置 x と時間 t の関数であり、 $\phi_1 = \phi_1(x, t)$, $I_1 = I_1(x, t)$, ...と表されるが、以下では、多くの場合、簡単のため、変数 (x, t) を省略する。ところで、このとき注意すべきは、「電位」は無限遠方でゼロになる物理量として定義されており、従来のように、何の断りもなく、勝手に、大地を、「電位」の基準と考えたりしてはならない。大地は配線の1本に過ぎない。なお、電流の向きは全て同じ方向で定義している。

このとき、ノーマルモード、コモンモード、及び、アンテナモードの、電流、及び、電位あるいは電圧は、以下の通りに定義される。

ノーマルモード：電圧と電流

$$\begin{aligned} V_n &= \phi_1 - \phi_2 \\ I_n &= \frac{1}{2}(I_1 - I_2) \end{aligned} \quad (2.3.1)$$

コモンモード：電圧と電流

$$\begin{aligned} V_c &= \frac{1}{2}(\phi_1 + \phi_2) - \phi_3 \\ I_c &= \frac{1}{2}(I_1 + I_2 - I_3) \end{aligned} \quad (2.3.2)$$

アンテナモード：「電位」と電流

$$\begin{aligned} \phi_a &= \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{2}(\phi_1 + \phi_2) + \phi_3 \right\} \\ I_a &= I_1 + I_2 + I_3 \end{aligned} \quad (2.3.3)$$

なお、繰り返しになってくどいようであるが、 V_n と V_c は電圧を表すのに対して、 ϕ_a は「電位」を表しており、記法としても区別してある。

後々のことを考えると、逆に、 (ϕ_1, I_1) 、 (ϕ_2, I_2) 、及び、 (ϕ_3, I_3) を与えておくのが良いであろう。

$$\phi_1 = \frac{1}{2}V_n + \frac{1}{2}V_c + \phi_a \quad (2.3.4)$$

$$I_1 = I_n + \frac{1}{2}I_c + \frac{1}{4}I_a$$

$$\phi_2 = -\frac{1}{2}V_n + \frac{1}{2}V_c + \phi_a \quad (2.3.5)$$

$$I_2 = -I_n + \frac{1}{2}I_c + \frac{1}{4}I_a$$

$$\phi_3 = -\frac{1}{2}V_c + \phi_a \quad (2.3.6)$$

$$I_3 = -I_c + \frac{1}{2}I_a$$

(2.3.6) から分かるように、3番目の配線に流れる電流 I_3 は、コモンモードとアンテナモードからなっている。これらのモードのそれぞれの電流の大きさが直ちに分かる訳ではないので、CA

結合モード（筆者注：本稿で初めて定義した）と呼ぶことにする。従来の「2線回路」では、何の断りもなく、勝手に、大地が3番目の配線になるので、大地を流れるのはCA結合モード電流である。

なお、アンテナモードは世界で初めて定義されたものであるが、無限遠方まで放射される電磁波に対して、導体の「電位」と電流が計算出来る仕掛けになっている。回路理論で「電位」が有意の物理量であることが判明したが、これまで誰も思いも及ばなかったことで、世界でも初めてのことである。電圧（電位差）だけが回路理論の物理量ではないと言うことである。

このように、「電位」が有意の物理量であることが判明した結果、先にも紹介したので繰り返しになりくどいようであるが、大地は、配線の1つに過ぎない。大地を、電圧の基準としたり、グラウンドプレーンと呼んだり、アース線のつなぎ先とした、従来の考えが間違いと言うことになる。

世界初と、はしゃいだついでに言えば、配線の数か1本のときの、いわゆるアンテナに対して、アンテナモードにより「電位」と電流が波動として計算出来るということである。従って、アンテナモードは「電位」と電流の波動の伝搬と呼んでも良さそうである。従来の「アンテナ理論」では電流分布を既知として人為的に与えていたが、それも間違いであったことになる。

3つのモードの定義からして、一刻も早く、何が起るのかを言葉で説明したいが、3つのモードが結合することもあり、残念無念なことであるが、それがかなわない。いわく言い難い複雑怪奇な電磁気現象が起るからである。

「新しい回路理論」では、これらの3つのモードが結合した電気回路の連立積分微分方程式が定まるので、その解として、原理的には、3つのモードの、電流なり、電位あるいは電圧の挙動を知ることが出来る。これらのモードが結合する連立積分微分方程式については、「第3部 理論編」で示す。筆者は、物理学者の端くれとして、「物理学の言語は数学である」ことを信じているが、「3線回路」にして初めて、実際に起こっている3つのモードが数式として厳密に定義出来、どんな電磁気現象が起るのかを計算出来ることになったのである。これに対して、本稿の2.5節で述べるように、「2線回路」では1つのモードしか定義出来ず、

これも、また、「2線回路」の不幸と呼べる。

さて、数式で厳密に定義出来るのは3つのモードであることからして、シグナルとノイズと言う電磁気現象は、数式では厳密に定義出来ないことになる。回路理論の立場からは、シグナルとノイズと言う分類は便宜的なものであり、実用的な立場からは、シグナルは所望して実現したい電磁気現象であり、ノイズはシグナルに乱れを与える電磁気現象と考えれば良いようである。これからして、我々が目指すのは、ノイズを伴わない、純粋なシグナルを実現することであると言えよう。

これでは、何が何だか訳が分からないので、一先ず、シグナルはノーマルモードとし、ノイズはコモンモードとアンテナモードからなるCA結合モードとしておこう。3つのモードが結合する結果、シグナルとノイズも結合し、いわゆる言い難い電磁気現象が発生する。結合は複雑な物理現象で、悔しいことに、筆者の現在の實力では、言葉で簡単には説明が出来ない。そのため、「第3部 理論編」で、「コマルモード (comal mode) の発生機構」と題した譬え話を用いて、その説明に挑戦する。円形加速器でのベータatron振動における、水平方向の振動と垂直方向の振動の結合現象に譬える訳であるが、それに際して、電磁気現象との類似と差異を紹介するので、加速器を学ぶ者にとっては、比較的、理解し易いものと思われる。

そうは言っても、ここで、何とかして、結合現象の恐ろしさを説明して見よう。(2.3.1), (2.3.2), 及び、(2.3.3) で定義した3つのモードが結合すると、とんでもないことが起こるのである。例えば、電気回路の何処かの点Aで3つのモードが測定出来たとしよう。そして、また、別の点Bで3つのモードが測定出来たとしよう。このとき、例えば、点AでのCA結合モード(例えば $I_3(x_A, t)$)と点BでのCA結合モード(例えば $I_3(x_B, t)$)とは、ざっくりと一言で言えば、結合現象のため、何の関係もないと言っても良いほどである。点BでのCA結合モードには、結合現象のため、点AでのCA結合モードの他にノーマルモードが入り込んでくることに注意しなければならない。即ち、CA結合モードを独立に決めるための積分微分方程式はないのである。例えば、電源で台形パルスを発生させたとすると、結合現象のため、CA結合モードにも台形パルスとノーマルモードノイズ

(筆者注：シグナルである台形パルスの時間微分や減衰振動)が入り込んで来る。「2線回路」では大地に流れるのがCA結合モード電流であり、それは、目には定かに見えず直接測定出来ないので、大地に台形パルスとノーマルモードノイズの電流が流れることなど、従来の普通の感覚では、考えられないことである。電源が供給する台形パルスとノーマルモードノイズの電力は小さくはないので、CA結合モードの電力は小さくはないであろう。このことからして、「2線回路」では、電源や負荷の破損、さらには、回路要素の発熱や制御回路の誤動作が起こると考えられる。これまた、「2線回路」の不幸である。

3つのモードが結合しない世界を実現すれば、そのときの電磁気現象は簡明になるはずである。そのためには、「3線回路」の特殊な回路配置が必要で、それは、本稿の表題にもある「対称3線回路」である。その例として、多相整流の交直変換器である直流電源の場合には、その直流出力側の電気回路を構成する回路要素を明示して、筆者は、「電源と負荷と配線の対称化+コモンモードフィルターとノーマルモードフィルター」とも呼んだりしている。その具体的な回路は、「第2部 実践編」をご覧頂きたいが、図2.1(b)で言えば、上下の回路の全てが同一になっている場合と言える。対称化と言う言葉が意味するところは、配線の数を3本にして、電源にしろ、負荷にしろ、いずれも2式備え、電気回路として、対称に配置するということである。

しかし、「対称3線回路」でも3つのモードの全てが結合しなくなる訳ではない。ノーマルモードは、先に定義したCA結合モードとは結合しなくなつて、純粋なノーマルモードが実現され、2本の主配線を電圧と電流の波動として伝搬する。純粋なノーマルモードとして独立するので、それをシグナルにすれば良いと考えられる。「対称3線回路」にして、やっと、所望して実現したいシグナルへの道が見えて来た。なお、純粋なノーマルモードが実現出来るとは言うものの、シグナルが時間的に変化する場合には、ノーマルモードノイズが発生するので、電源の直後にノーマルモードフィルターを設けて削減する必要があることを断っておきたい。

これに対して、「第3部 理論編」で述べるが、

コモンモードとアンテナモードが結合しないようにするのは簡単ではないことを数式で示すことが出来、「対称3線回路」にしても、CA結合モードは依然として発生する。その結果、コモンモードノイズが発生すると必ず、放射ノイズであるアンテナモードノイズが発生すると言える。我々の経験に一致する。しかし、「対称3線回路」では、機能分離型フィルターであろうと、機能結合型フィルターであろうと、電源の直後にコモンモードフィルターを設けることが出来るので、CA結合モードを削減することが出来る。

「対称3線回路」にして、実用的な立場で言うシグナルと、回路理論で定義出来るノーマルモードとがほぼ一致することが判明した。ところが、これで、めでたし、めでたしとはならず、以上のような理論の観点とは異なる、複雑な事情がノイズにはある。それは、ノイズの測定に関する問題である。この説明が、またまた、難しく、「第2部 実践編」の『3.2 TARN2の測定データでのコモンモードノイズの発見』の節で、未だに世界でも一例しかないと思われる、1989年のTARN2での測定データで詳しく説明する。

ここでは、敢えて、それをぎっくりと一言で説明しておきたい。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。筆者は「物理学では測定出来なければならない」と言いたい、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、明らかに出来ないようである。ただし、くどいようであるが、ここで断っておきたいことは、コモンモードノイズと断定出来ないからと言って、それが存在しないのではなく、それは厳として存在すると言うことである。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、と言っておきたい。

2.4 上下2台の電源の同期

上下2台の電源の同期も問題である。「対称3線回路」では、配線の数を3本にして、負荷を2式設けるが、電源も2台設ける必要がある。ところが、「対称3線回路」と呼んではいないものの、上下2台の電源が同期した出力を持っているとは

限らないことに注意しておきたい。例えば、シンクロトロン電源の製作に当たっては、上下2台の電源の位相をずらしてやって、多相整流にするのが、従来の電源技術の文化である。文化と言うのは言い過ぎで、経験に基づいている真実なのかも知れないが、多相整流にすると、商用周波数のノイズを削減出来ると考えられている。しかし、上下2台の電源の位相をずらすと、転流(サイリスタ)やスイッチング(IGBT, パワーMOS・FET)に付随するCA結合モードノイズは原理的にゼロにはならず、3番目の配線にはCA結合モード電流が流れることになる。このCA結合モード電流を減らすためには、コモンモードフィルターを設けることが大切であるが、「対称3線回路」であれば、機能分離型フィルターにし、機能結合型フィルターにし、実現可能である。

ぎっくりと一言で言えば、商用周波数のノイズとスイッチングノイズの大小関係は、トレードオフの関係にあると、筆者は思う。しかし、電磁石電源では、上下2台の電源の位相を同期させた例は少ないようである。上下2台の電源を完全に同期させると、原理的には、CA結合モード電流が流れることはない、筆者には思える。しかし、その場合でも、コモンモードフィルターを設けることを勧めておきたい。

2.5 「2線回路」の不幸、及び、「対称3線回路」の薦め

ここで、百年以上昔から続いて来た、同軸ケーブルやレックヘル線のような、配線の数が2本の「2線回路」の伝送線路回路理論が招いた不幸について議論しておくのが、ノイズの何たるかを理解する上での助けとなるであろう。

最初に、実際の「2線回路」では、シグナルとノイズの2種類の電磁気現象が観測されていることを、何としても、断っておきたい。これに対して、例えば、図2.1(a)のような「2線回路」では、電磁場の伝搬モードは1つしか定義出来ない。そのとき、発生する電磁気現象はシグナルと考えることになる。しかし、それでは、実測されているノイズに対して、数式による定義や言葉がないため、ノイズを回路理論で取り扱う術がなく、ノイズの起源は不詳であり謎めいているとせざるを得ない。「3線回路」ではモードが3つ定義出来、電源を2台設けることが出来たのに対して、「2

線回路」ではモードが1つしか定義出来ず、その回路理論の懐が狭いと言うことが、そもそもの不幸の始まりである。しかも、シグナルを発生させる電源は1台で良く、その1台の電源が必ずノイズを発生することが忘れられて来た不幸もある。ノイズが出ない理想的な電源は存在しないのである。

ところで、「2線回路」の積りで作った電気回路では、3番目の配線を設けていないにも拘らず、実際には、シグナルとノイズの2つの電磁気現象が発生する。このときには、何の断りもなく、勝手に、大地が3番目の配線となり、「3線回路」になっていると考えなければならない。このこともまた、「2線回路」の不幸である。3番目の配線に流れるのはCA結合モード電流と呼ぶことにしたので、大地にはCA結合モード電流が流れていることになる。

ここで、誤解のないように断っておきたいことがある。(2.3.4)と(2.3.5)によれば、1番目の配線と2番目の配線の電位と電流は、ノーマルモードに関しては正負が反転しているのに対して、コモンモードとアンテナモードに関しては共通である。このことから、1番目の配線と2番目の配線の電位と電流からは常にノーマルモードの電圧と電流が取り出すことが出来、それがシグナルであるように思えるが、そうはならないと言うことである。「対称3線回路」ではない、一般的な「3線回路」では、既に、2.3節で、点Aと点Bにおいて、ノーマルモードはCA結合モードと結合することを述べたように、ノーマルモードとコモンモードとアンテナモードが、そもそも結合しているので、純粋なノーマルモードは存在出来ないからである。3つのモードに呼び名を付けては見たものの、さっぱり訳が分からない点こそ、結合現象の恐ろしい点であり、ノイズは難解な電磁気現象と言うことでもある。

その結果、「2線回路」は「3線回路」になって、2本の主配線にもCA結合モード電流は流れる。このとき、2本の主配線は大地に対して対称な回路配置にはならず、コモンモードフィルターを設けることが出来ない。対症療法である、フェライトコアやコモンモードチョークしか設けられないことも、また、「2線回路」の不幸である。

このように、「2線回路」の積りで作った電気

回路では、CA結合モード電流が原因で、思いも及ばないような不具合が発生する。大地を流れるCA結合モード電流は、目には定かに見えず直接測定出来ないこともあり、何処をどう流れているのかが予測出来ない。そのため、電流や電圧がガタガタして安定性が悪いと言うことだけに止まらず、電源や負荷の破損、回路要素の発熱や制御回路の誤動作、さらには、コモンモードノイズに対してインピーダンス整合が取れずに反射波が発生していたり(筆者注:「第2部 実践編」でTARN2の測定データに基づいて説明する)、等々の現象が起こる。CA結合モードノイズの起源を明らかに出来なかった、従来の「2線回路」の考えからは、こうした不具合の原因は不明であるとされ、それを克服するため、ひたすら、回路部品の強化や保護回路の強化さらには冷却能力の強化に努めて来たことになる。CA結合モードノイズで破損すると言うのだから、強化して破損しないようにしたところで、CA結合モードノイズのために浪費される電力は大きいと考えられる。もうそろそろ、そんな時代を止めにしたらどうかと思う。「隗より始めよ」と言うことで、筆者としては、加速器技術に期待したい。

こうした説明が可能であると言うことになる、「2線回路」の考えに基づいて製作されて来た、従来の電気回路の全てを見直す必要がありそうである。大地を流れ、2本の主配線に流れる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も言える。交直変換器、直交変換器、交直交変換器、直交直変換器、パルス回路、弱電回路、強電回路、伝送線路、ケーブル、等々の全てが、見直しの対象である。これらの電気回路の中には、比較的容易に、「対称3線回路」として作り直し出来るものもある。加速器技術で言えば、各種電磁石とその電源の電気回路である。しかし、多くの電気回路は「2線回路」として、大地を流れるCA結合モード電流を無視して、製作されており、実用回路としても、また、市販品としても、広く普及しており、それらを「対称3線回路」として作り直すことは容易ではない。実際、筆者にもアイデアがない電気回路が多い。読者の皆さんの挑戦に期待するところ大である。

ただ1つ忘れないうちに断っておきたいこと

は、あらゆる場面で「対称化」が実現されることが望ましいと言うことである。電源を例にとって説明すると、電源内部の回路要素は、3番目の配線に対して、幾何学的に、左右や上下さらには前後に対称に配置するのがお勧めである。また、電磁場が伝搬するに際して、配線の相手が手に取って見えるように、配線と配線との間の特性インピーダンスが低くなるような配置にするのがお勧めである。従って、電源筐体の裏蓋を開けると、回路要素が、左右や上下さらには前後に、対称に美しく配置されていることが望ましい。

2.6 接地に対するジャクソンの誤り

「2線回路」ではノイズの起源は不明であるので、昔の人は、ノイズは接地と関係していると考えたようである。マクスウェルは、電気現象は、導体が2つ以上あるときに、コンデンサーを通して起こり、電圧（電位差）が物理的な意味を持つと考えた。そのため、電圧の基準が必要と考えたようである。その考えを継承し、多くの電磁気学の参考書では、コンデンサーを定義するとき、「平行平板線路等で漏れ電磁場を無視した近似ではよくあう」とされているが、それは静電気の場合であろう。

そんなことを頭に思い浮かべながら、接地について説明している電磁気学の参考書がないかと調べて見たところ、ジャクソンの参考書⁴⁾に気付いた。その序論では、「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（筆者注：交流）では有限な伝搬速度がこの概念をぼかしてしまう。いい換えれば、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」を保証するためには十分な注意が必要である」と書かれている。筆者自身、今になって考えると、この文章には、時間的に変化する場では、接地は役に立たないと書いてある気がする。実際、役に立たない考えであった。参考書の最初の序論にこんなことを書かれたら、誰だって、役に立たないと考えずに、「良い接地」が可能であると考え、何処を接地すると良いのかと探し回る作業を始めることになる。その昔、筆者自身もウロウロしたものだが、オロオロしたと言うのが正解かも知れない。それを始めたら、やって見てなんぼの世界と言うことになるから、これは単なる技術がお勧め

めと言う文章に過ぎず、「良い接地」が見付かったことがないだけに、ジャクソンも罪作りだったと言うことになる。

“良い接地”があると思わせたのは、接地に対するジャクソンの誤りである。その元は、マクスウェルが電圧の基準を考えたからであり、大地をグランドプレーンとする考えが登場したのだと思う。土岐・佐藤の多導体伝送線路の「新しい回路理論」では、大地を含めて、すべての配線は同等であるので、“良い接地”と言う考えは登場せず、グランドプレーンは不要で、大地も1本の配線で良いことになる。ただただ、多導体伝送線路の回路理論が必要とされただけのことで、これまで、その理論がなかったことこそ問題であったと言うことになる。

そうは言っても、やっぱりノイズのことが分かり難いと言うことかも知れないので、今少し、補足しておきたい。左端が、スイッチング電源が1台では、大地を相手にして、CA結合モードノイズが不可避免的に発生する。ここの仕掛けを理解出来る人が少ないようで、その昔の筆者がそうであったように、電源の大地に対する絶縁を完全にすれば良いと考えてしまうようである。しかし、大地に対してわずかであってもコンデンサーがあるとすると、必ず、何処かにインダクタンスがあり、コンデンサーとインダクタンスの積の平方根の逆数は光速度になる。ジャクソンの言葉を借りれば、「誘導的で容量的な迷走効果」と言うことになるかと思うが、完全な絶縁は不可能であることを意味している。光速度と言う縛りこそが電磁気学であるから、電気回路がどうあれ、何であっても、相対論を満たしているマクスウェル方程式が全てと言うことになる。即ち、遅延ポテンシャルの交流複素数表示が全てであり、絶縁が完全な理想的な電源はないと考えるべきである。交直変換器や直交変換器が1台では、必ず、ノイズが発生すると考えなければならない。

2.7 シールドよりも対称性

「2線回路」では、何の断りもなく、勝手に、大地が3番目の配線になって、CA結合モード電流が流れ、シグナルがノイズで汚されることを説明した。ところで、その昔から、複数の「2線回路」が平行に並んでいるとき、「2線回路」の信号が、お互いに干渉することは知られていた。そうした

干渉を緩和するために、同軸ケーブルが考案されたようである。同軸ケーブルでは、全ての電磁気現象は内導体と外導体の間で起こると考えられ、その結果、外部へ電気信号が漏れ出ることがなく、また、外部の信号が内部に入り込まないと考えられた。このとき、外導体は、まるで、静電遮蔽（筆者注：交流ではない）のファラデーケージのように、シールドの機能があると考えられたようである。

しかし、実際には、同軸ケーブルはノイズ削減に対して不完全であった。その理由として考えられるのは、同軸ケーブルでは、内導体が細く、外導体が太いので、3番目の配線となる大地に対して、「対称3線回路」にはなれないからである。このことからして、外導体にはシールドの機能はないようである。もちろん、電源が1台しかないことも問題である。

この考えを推し進めると、「2線回路」の周りをさらに導体で囲んでも、シールドにはなれないと言うことになる。結局、電磁場は、自分が伝搬するに当たって、インピーダンスが低い相手を欲しがっており、勝手に相手を探し出すかのようなのである。それを避けるためには閉じた電気回路となっていることが必要で、それには、電源を2台持つ「対称3線回路」が最適である。

「シールドよりも対称性」と言う筆者の主張は、何も、電源だけに限られる訳ではなく、制御系等の弱電回路でも採用すべきと言える原理的な話である。しかし、そのときの問題は、配線の本数が3本であるということ以上に、電源が2台必要であるということであろう。最近、デジタル信号の伝送には、3本の配線と同時に、データとデータバー（筆者注：データの符号反転信号）の2つの信号が使用される時代を迎えていると聞いている。制御系も「対称3線回路」になるのは、そう遠くないのかも知れない。

伝送ケーブルとして、光ファイバーケーブルを使うことが考えられる。その場合には、光と電気信号を変換するために設けられる、AD変換器やDA変換器の電気回路に「対称3線回路」が採用出来るであろう。この場合は、ノイズレスの信号の伝送が実現出来ると、筆者には思える。

謝 辞

土岐博さんは、「電位係数」と「遅延ポテンシヤ

ルの交流複素数表示」に気付き、多導体伝送線路の「新しい回路理論」の構築への道を切り拓いた。筆者は、共同研究者として、土岐さんに心から感謝します。また、山崎敏光先生には、2013年4月の杉本健三記念シンポジウムでの、筆者の講演⁸⁾を聴いて頂いたのを切っ掛けとして、日本学士院紀要への投稿を勧めて頂いた。土岐・佐藤の共著論文が2014年2月に発行された¹⁾が、本当に有難いことで、山崎先生に心から感謝します。杉本記念シンポの講演の報告では、それまでの『幸運な「巡り合わせ」の連鎖』を書き連ねたが、その後も続いていたことになる。高野善永さんは、文献⁹⁾の訳者であるが、筆者からの一方的なメールによる連絡にも快く応じて頂いており、最近のことであるが、1927年の文献³⁾を紹介して頂いた。この論文の登場により、日本学士院紀要の論文と併せて、本稿をまとめる思いを、筆者は新たにした。高野さんに心から感謝します。

参考文献

- 1) Hiroshi TOKI and Kenji SATO, New circuit theory of multiconductor transmission lines resulting from a new practice of noise reduction, Proc. Jpn. Acad., Ser. B90 (2014) 29-46. <http://www.japan-acad.go.jp/pjab>
- 2) 土岐博・佐藤健次, 解説「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 BUTSURI, VOL. 68, NO. 1 (2013) 11-18.
- 3) JOHN R. CARSON, Electromagnetic Theory and the Foundation of Electric Circuit Theory, The Bell System Technical Journal, January (1927) 1-17.
- 4) ジャクソン著, 西田稔訳, 「電磁気学(上)原著第3版」, 物理学叢書, 吉岡書店, 2003年
- 5) 熊谷寛夫, 「電磁気学の基礎—実験室における—」, 基礎物理学選書 16, 裳華房, 昭和51年
- 6) 佐藤健次, 「直流が流れる金属抵抗性導体における電磁気現象:ピンチ効果と場の理論」, 第11回日本加速器学会年会, 2014年8月, 青森, 発表申込み済み
- 7) 佐藤健次, 「交直変換器である電源の交流系統の新しい方式のフィルターの提案と他の変換器への応用」, 日本加速器学会誌『加速器』, Vol. 4, No. 4 (2007) 271-287.
- 8) 佐藤健次, 「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」, 杉本健三記念ページ | 学術文化同友会:アルスの会. <http://viva-ars.com/bunko/sugimoto/>
- 9) ポール J. ナーイン著, 高野善永訳, 「オリヴァー・ヘヴィサイド ヴィクトリア朝における電気の大才—その時代と業績と生涯」, 海鳴社, 2012年