

解 説

交直変換器の交流側の対称化とコモンモードフィルターの薦め(前半)

佐藤 健次*

Recommendation of Symmetrization and a Common-Mode Filter for the AC-Line System of an AC-DC Converter (first half of two parts)

Kenji SATO*

Abstract

The author recently noticed that noise not only contaminates signals, but also heats electronic circuits. This new viewpoint suggests a reason why lithium-ion batteries of a sophisticated new aircraft, Boeing 787, encountered overheating, or caught fire, because conventional electronic circuits could produce enough noise to heat circuit elements. In order to overcome this issue concerning the DC-line system of the AC-DC converter, it has been practically and theoretically proven that a symmetric three-line (S3L) circuit with both common- and normal-mode filters is excellent for noise reduction. On the other hand, the author identified a common-mode noise in addition to the normal-mode noise at an AC line, several years ago. In order to overcome such problems of an AC-line system as those of a DC-line system, the author recommends the symmetrization and a common-mode filter for the AC-line system of an AC-DC converter. This paper describes how both common- and normal-mode noises could heat electronic circuits based on calculations of three-line circuit theory. Heating occurs along with the coupling of common- and normal modes of a propagation wave type and the reflection of both waves at circuit elements, causing complicated phenomena beyond our understanding based on the conventional circuit theory.

日本加速器学会誌『加速器』では、筆者による「対称3線回路(第1部 概要編)」¹⁰⁾と「対称3線回路(第2部 実践編)」¹⁵⁾が発行され、その勢いのまま、「対称3線回路(第3部 理論編)」を書き進めていたところ、見落としがあることに気付いた。見落としの事情を、本稿で長々と説明することになり、読者の皆さんにはご迷惑を掛けるが、「老人さらに老い易く学成り難し」とでも思っ、お許し願いたい。また、本稿は、上記の既発行の2つの解説の見直しにもなっているので、「対称3線回路(番外編)」と呼べるものである。ただし、延々とした計算が続くので、長文の原稿となり、前半と後半の2部に分けた。本稿は、その前半である。なお、参考文献の番号は、「第1部 概要編」と「第2部 実践編」の既出の1)から14)の通し番号の続きとさせて頂く。

1. はじめに

2014年2月12日発行の日本学士院紀要には、

「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」と邦訳出来る題名の、土岐博・佐藤健次論文¹⁾が掲載された。その論文では、ボーイング787型機(以下、B787型機)のバッテリー事故の原因はノイズによる放電であると書いた。これに対して、2014年9月25日に国土交通省運輸安全委員会により「航空重大インシデント調査報告書」¹⁶⁾が提出されたが、その要旨をざっくりとまとめれば、「B787型機のメインバッテリーの類似発熱事案が3件発生し、発熱現象は、内部短絡によると考えられるが、その発生機序を最終的に特定することはできなかった」とされている。放電ではなく発熱と言うことなので、「発熱の謎」と呼ぶことにする。ところが、日本学士院の会員有志から、その「調査報告書」では、上記の学士院紀要の土岐・佐藤論文が引用されておらず、この論文に、「運輸安全委員会向け説明書」を付して、運輸安全委員会に送付すべしとの申し入れがあった。

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

その「説明書」を書き進める中で、見落としに気付いた。昨年（2014年）の春頃ではなかったかと思うが、J-PARCでは、加速器関連の、とある電源を更新したところ、盤内で発熱し、当面は、電源盤の裏扉を開けて、扇風機で吹いて、冷やしてやっている、との報告を聞いた。その昔の筆者の経験では、結局、裏扉にファンを並べて取り付け、見掛けは何事も起こっていないかのように美しく見せて、盤内に送風して冷やすことによって、発熱問題を解決するのが常套手段であった。まあ、そんなもんだとして納得する年寄りが多いかと思う。

筆者は、こうした常套手段に慣れ親しんだ年寄りではあるものの、発熱の原因はノイズであると考え、2014年7月発行の『加速器』の「対称3線回路（第1部 概要編）」¹⁰⁾では、『「2線回路」では、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、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、さらには、回路要素の発熱や制御回路の誤動作が起これば』と書いた。発熱は、何もB787型機バッテリーで起こっているだけではなく、電気回路の多くで起こっていることになる。しかし、筆者自身もそうであったように、お恥ずかしい話ではあるが、これまで、発熱の原因を詮索することはなかった。反省すること頻りであるが、これに対して、「調査報告書」では、「発熱の謎」が明言された点で、今回の調査は注意深く念入りなものであることは特筆に値する、と筆者は考えた。

発熱は、B787型機バッテリーに限らず、とある電源のような、一般の電気回路でも発生していることからして、共通の原因があると考えれば良い。その昔から、その発生原因が不詳で謎めいていとされて来た電磁気現象がある。それはノイズであり、「ノイズの謎」と呼んでおこう。しかし、考えて見れば、ノイズは、電気回路のそこかしこに存在し、電気回路を構成する配線や回路要素を電流として流れているので、ジュール熱や誘電体損失、さらには磁気損失等々により、配線や回路要素が発熱する。回路配置によっては共振現象が発生し、ノイズにより、放電も起これば短絡も起これる。従って、ノイズはシグナルを汚すだけでなく発熱他の不具合の原因であると考えられ

る。

このような考えに至ったのは、最近、測定データに基づいて、簡単な計算をすれば良いことに気付いたからである。HIMACの「対称3線回路」の電磁石と電源では、電流ノイズは 2×10^{-6} であり、TARN2のような「2線回路」に基づく従来技術では、電流ノイズは 1×10^{-3} であり、ノイズの大きさの比は500である。ノイズによる電気回路での損失電力は、その平方で計算されるから、ノイズによる発熱量は、後者は前者よりも、 2.5×10^5 倍も大きく、猛烈である。こんな計算が出来るのも、もちろん、ノイズをほぼゼロに出来る世界があることを知ったからである。

発熱が百万倍近く大きいとは言え、自分が製作した電源が焼損した経験から言えば、発熱すると何が起これるのかについては自明ではなく、以下の3通りを考えている。

- ① 発熱した回路要素そのものの、発熱が昂じて、発煙や焼損が起これる。
- ② 発熱した回路要素の近くに、燃え易いものがあれば、それに飛び火する。
- ③ 発熱した電気機器が膨張したり熱変形したりすると、その近くにある電気機器との距離が近づき、電源そのものの電力が供給されて、放電したり短絡して、被害が大きくなり、発煙や焼損が起これる。

このように3通りの筋書が可能であるということになると、特に、③のように、電力が大きい電源が直接関係して来ると、ノイズによる発熱が百万倍も大きいことも、無視出来ないと考えられる。B787型機バッテリーのトラブルも、内部短絡によるとは言うものの、諸悪の根源はノイズであり、バッテリーそのものでもないと言える。なお、②は、マッチの火がカーテンに燃え移って、火事となり、家が全焼する機構にも似ている。「マッチ1本火事の元」である。

「ノイズはシグナルを汚すだけでなく発熱他の不具合の原因である」と言う考えは、「対称3線回路」と題する、筆者による一連の解説では抜け落ちていたもので、見落としである。20年近くもこんな簡単な計算を実行して来なかったのは、「ノイズの謎」が、発熱の原因はノイズであると言う、単純明快な考えの大きな妨げになっていたのであろう。「ノイズの謎」が「発熱の謎」を呼

んでいたのである。そうは言っても、ノーマルモードノイズとコモンモードノイズの2種類のノイズが、配線や回路要素の全てに電流として流れることは自明ではない。本稿の第2章では、一般的な「3線回路」の場合、2種類のノイズの伝搬電力が、全てに行き渡ることを計算にて示す。

そうこうしているうちに、筆者は、岩波書店の月刊雑誌「科学」に、一般読者向けに、「わかってきたボーイング787型機バッテリーの発熱の謎」と題する記事¹⁷⁾を寄稿出来る機会を得た。その推敲を重ねたところ、「新しい回路理論」が示唆する要点を、数式抜きで文章で、6項目にまとめた。

- ① ノイズはシグナルを汚すだけでなく発熱他の不具合の原因である。
- ② ノイズは波動であり、コモンモードノイズとノーマルモードノイズの2種類の伝搬ノイズが発生する。
- ③ 2種類のモードの伝搬ノイズが結合する。
- ④ 電気回路を構成する回路要素により伝搬ノイズの反射現象が発生する。
- ⑤ コモンモードノイズとノーマルモードノイズの伝搬電力は配線や回路要素の全てに行き渡る。
- ⑥ 交直変換器や直交変換器のようなスイッチング電源を始めとして全ての信号源はコモンモードノイズとノーマルモードノイズを同時に発生する。

これらの6項目をつないで行くと、発熱の原因はノイズであることが説明出来るが、その話はまるで風が吹けば桶屋が儲かるにも似た流れとなるので、それについては、一般読者向けに書いた、岩波「科学」¹⁷⁾をご覧頂きたい。

ところで、筆者は、「ノイズの謎」を解明すべく、『加速器』に「対称3線回路」と題した3部からなる解説のうち、既に2部までを『加速器』で発行済み^{10, 15)}であるが、上に列挙した6項目のうち、①だけではなく、②と④を見落としていた。既に発行済みの今になって、この見落としに気が付いたので、読者を惑わせることになって申し訳ないことと思うが、よろしく、これらの解説にお付き合い願いたい。既発行の解説を訂正するとなると、膨大な作業になるので、読者の皆さんにおかれては、2種類の伝搬ノイズは結合する波動であり、

また、波動であるから回路要素により反射が起こり、さらに、ノイズは発熱の原因である、と読み替えて頂くことを、よろしく願いしておきたい。

本稿の第2章では、配線の本数が3本するとき、配線の途中に不連続があるときの④反射現象の計算例を示す。②2種類の伝搬ノイズが存在するため、従来の2導体伝送線路における反射現象とは似ても似つかない現象が発生し、そんなことになっているのかと驚くような特異な現象が発生する。しかし、その結果、一般的な「3線回路」の場合、2種類のノイズの伝搬電力が、配線や回路要素の全てに行き渡ることになり、それらが発熱する。この計算は「3線回路」の演習問題とも言えるものであるが、さらなる演習問題については附録Aで示すことにする。

しかし、本稿の本来の目的は、表題のように、「交直変換器の交流側の対称化とコモンモードフィルターの薦め」を解説することである。これを実現した加速器は世界にはないようである。しかし、交流側で、ノーマルモードノイズに加えて、コモンモードノイズが発生していることは、筆者により、既に、2007年発行の『加速器』の解説⁷⁾で報告済みである。交流側でも、やはり、「ノイズはシグナルを汚すだけでなく発熱他の不具合の原因である」と考えられる。その交流側のノイズを削減する必要があると考え、第3章や第4章で、表題に即して、それを説明する。スイッチング回路の上流の交流側で発熱や発煙、さらには、発火が起これば、その原因はノイズである。

ところで、ノイズの話をする、ノイズは小さいと考える人が多いことに気付かされる。その考えは、思い込みで、間違いであろう。上にも述べたが、損失電力にして25万倍も違うので、ノイズは無視出来ないほど大きいのである。元々ノイズは不詳であり謎めいていたから、無視出来ると考えて来たのもやむを得ないのかも知れない。そうした考えでは、ノイズがシグナルを汚すことを大問題にする必要はなかったし、また、ノイズが発熱の原因と考える必要もない。その結果、電源なりの性能仕様書で、ノイズの大きさは、別の理由で、規定すれば良いとされて来た。言い換えれば、それまでのノイズ削減の経験で蓄積された数値に基づいて、性能仕様を決めていたのであろう。そうした性能仕様を実現するためには、ノイズ削

減の「対症療法」が総動員されて来たきらいがある。しかし、筆者には、こうした取り組みは1つの文化と思え、誤りのような気がする。そうした考えは、ノイズが発生する過程や原因、さらには、それを削減する方法が不明な時代の産物であって、「ノイズの謎」が明らかになって、ノイズをほぼゼロに出来るようになった現在、電気回路のノイズを削減し、他の電気回路と相互作用しないと言う、新しい文化を作った方が良いと思える。「隗より始めよ」と言うことで、加速器の現場で実務に取り組んでいる研究者に期待するところ、大である。

また、土岐・佐藤の多導体伝送線路の「新しい回路理論」には定量性がないとの指摘を受ける。その昔、ノイズは不詳で謎めいた存在とされていて、定量性などなかったことを思えば、そんな指摘は的外れと筆者は思う。「対称3線回路」にすれば、ノイズは数百分の1になるので、計算出来なくても、ノイズ削減の方法を知っているからである。広く普及している「2線回路」の従来技術では、2本の主配線の回路に対して、大地が、勝手に何の断りもなく3番目の配線になり、「2線回路」に大地が加わった「3線回路」となり、その3番目の配線に流れる電流がコモンモードノイズとなっている。既発行の『加速器』の「対称3線回路(第2部 実践編)」¹⁵⁾で述べたように、また、本稿の2.1節でも述べるように、筆者は、コモンモードノイズを反射波として見たことからして、一般的な測定ではないので、コモンモードノイズを見た人は多くはないと思う。それは、大地を流れる電流を測定することが簡単ではなく、さらに、大地を3番目の配線と見做すときの回路定数を知ることは出来ないからである。このことからして、土岐・佐藤による「新しい回路理論」に定量性がないのは当然であるとも言える。ここでは、このように、居直っておきたい。その解説¹⁵⁾で述べたように、「3.6 実践に取り組む青年は荒野を目指せ!!!」としておきたい。どんな電気回路であっても「対称3線回路」として製作したり、コモンモードノイズと電気回路の発熱量を実測する青年(若者)が登場しても良いのではないかと思う。

2. コマルモード (comal mode) の発生機構・改訂版

2.1 見落としの経緯、及び、JPSJ78 土岐・佐藤論文の教えるところ

蛇足ではあるが、見落としが発生した経緯から話を始めたい。発行済みの「対称3線回路(第1部 概要編)」¹⁰⁾では、「対称3線回路(第3部 理論編)」の予告として、「comal mode (コマルモード)の発生機構」と題した譬え話で、コモンモードとノーマルモードとが結合する現象を説明すると書いた。実際、筆者は、平成17年(2005年)12月8日・9日の両日、東海にて開催された、第8回加速器電源シンポジウムで、「comal mode (コマルモード)の発生機構及び回路理論とベータトロン振動理論との類似と差異」と題して、講演を行った。comal modeとは、common modeとnormal modeの下線部をつないだ、結合を表す筆者による造語であるが、全く、コマルことが起こると言う話である。

このときの類推に採用したのは、シンクロトロンのような円形加速器の、ベータトロン振動である。水平方向と垂直方向の2つの振動が発生するが、例えば、四極電磁石を misalignment してしまうと、水平方向のベータトロン振動と垂直方向のベータトロン振動とは結合し、何が何だか、訳が分からない振動となる。

そうした2つの振動の結合をコマルモードと呼んだことになるが、単純に、そう考えたのが、そもそもの間違いであり、見落としの始まりである。ベータトロン振動は、波動ではなく、単なる振動であるので、反射現象は起きない。思い起こせば、「対称3線回路(第2部 実践編)」¹⁵⁾の「図3.2 TARN2での測定データ：架橋抵抗の効果」から分かるように、コモンモードノイズは反射波として見付かった。しかも、「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」で説明したように、コモンモードノイズに対してインピーダンス整合も行われていた。従って、コモンモードノイズは間違いなく波動であり、当然のことながら、ノーマルモードノイズも波動である。波動であれば反射が起こるが、その反射現象を見落としたのである。

こう考えると、ノイズと言う電磁気現象は、日

頃慣れ親しんでいるビームの挙動よりも複雑で、人にもよるであろうが、面白いと言えるのかも知れない。しかし、その複雑さ故に、これまで、ノイズとは何かと言うことが理解出来ず、「ノイズの謎」を生み出して来たことになる。

そうは言っても、往々にして、筆者はこうした説明を忘れがちで、単に、振動の結合現象と考えがちである。既に、第1章で述べたように、列挙した6項目のうち、①や②、さらには④を見落としがちである。しかし、③の2つの波動の結合現象だけでは、電気回路を構成する配線や回路要素の全てにノイズの電力が行き渡ることがなく、その結果、配線や回路要素の全てが発熱するとは言えないようである。

例えば、広く普及している配線の本数が2本の「2線回路」に基づく従来技術による電源で、コモンモードノイズとノーマルモードノイズの2種類の伝搬ノイズが発生するとしても、通常、電源の直後にはノーマルモードフィルターが設けられており、その結果、コモンモードノイズの電力は大きいものの、ノーマルモードノイズの電力は小さい。しかし、電源直後のコモンモードノイズだけでは、電気回路を構成する配線や回路要素の全てに、電源直後のコモンモードノイズの電力が行き渡り、従って、配線や回路要素の全てが発熱するとは即断出来ない気がする。

これに対して、④の回路要素による反射現象を考慮すると、回路要素の全てに、電源直後のコモンモードノイズの電力が行き渡るようである。その仕掛けを、本節にて、数式で解明する。その反

射現象は、我々が、配線の本数が2本の場合の、従来の伝送線路の回路理論で知っているものとは違って、非常に特異な現象であるようなので、丁寧に計算しておきたい。少々面倒くさい数式が続くが、お付き合い頂きたい。

本節で計算するのは、図1のような、配線の本数が3本の、一般的な「3線回路」である。3本の配線を、上から順に、配線#1、配線#3、配線#2と定義し、また、配線#1と配線#2を主配線と呼ぶ。これに対して、本稿で明らかにしたいのは図2の回路であり、配線の途中の $x = s$ に不連続があり、抵抗 R が主配線の配線#1と配線#2の間に設けられている場合である。この不連続により、どんな反射現象が起こるのかを知りたい。このときの抵抗は、通常の「2線回路」を模擬したものと考えて頂きたい。2本の主配線の間には直流電圧が掛かっているとして、その電圧を利用する「2線回路」が次から次へとぶら下がっている場合を想定し、その1つを抵抗で代表させていると考えて頂きたい。従って、反射現象が起こるのであれば、次から次へと、反射現象が連なり、計算し難い複雑な電磁気現象が起こることが考えられる。

図2を計算する前に、準備として、本節では、図1について計算を行い、それも、2011年度日本物理学会論文賞を受賞した、土岐博・佐藤健次の共著論文¹⁸⁾に基づくものとする。配線そのものの抵抗はゼロとする。時間的な変化は単振動の交流や高周波とし、その角周波数を ω とし、 $e^{j\omega t}$ とする。本稿で、この論文の式を引用する場合、

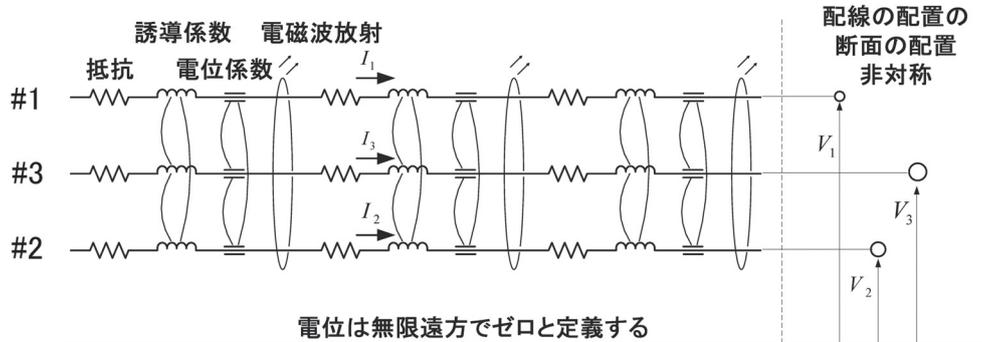


図1 3本の配線の配置の断面が非対称な一般的な「3線回路」の等価回路。配線の番号を、上から順に、配線#1、配線#3、配線#2とする。各配線の電位は無限遠方でゼロとする。しかし、本稿では、図中の配線の抵抗をゼロとし、電磁波放射は起こらないとして、 $I_1 + I_2 + I_3 = 0$ が成立しているとする。

その論文での式番号を示し, JPSJ78 (xx) と表すことにする.

回路の左から右へと進む波動を入射波と呼び, 右から左へ進む波動を反射波と呼ぶ. x 方向の左から右に伝搬する入射波は JPSJ78 (57) のように $e^{j(\omega t - jkx)}$ と表され, x 方向の右から左に伝搬する反射波は $e^{j(\omega t + jkx)}$ と表される. その時間変化の $e^{j\omega t}$ の係数を省略して, 電位あるいは電圧及び電流を位置 x の関数として表すことにする. ただし, $k = \frac{\omega}{c}$ である. なお, 電位は, 無限遠方でゼロになる, 有意な物理量であることに注意しておきたい.

図 2 の場合には, $x \geq s$ の右側の領域での入射波は, 左から右に進む波動であるので, 透過波と呼ぶのが適切かも知れないが, 本稿では, 入射波と呼ぶことにする.

図 1 では, 配線の途中の $x = s$ に何も無い場合, 即ち, 全く不連続がない, 無限長の様な配線とする. このとき, 3 本の配線に流れる電流を, 同じ向きに, それぞれ, $I_1(x)$, $I_2(x)$, $I_3(x)$ と定義する. ここでは, 3 本線の回路から電磁波の放射はないとして,

$$I_1(x) + I_2(x) + I_3(x) = 0 \quad (2.1.1)$$

が成立するとする.

このとき, ノーマルモードの電圧と電流は,

$$\begin{aligned} V_n(x) &= V_1(x) - V_2(x) \\ I_n(x) &= \frac{1}{2} \{I_1(x) - I_2(x)\} \end{aligned} \quad (2.1.2)$$

と定義され, コモンモードの電圧と電流は,

$$\begin{aligned} V_c(x) &= \frac{1}{2} \{V_1(x) + V_2(x)\} - V_3(x) \\ I_c(x) &= \frac{1}{2} \{I_1(x) + I_2(x) - I_3(x)\} = I_1(x) + I_2(x) = -I_3(x) \end{aligned} \quad (2.1.3)$$

と定義される. この定義から分かるように, コモンモード電流は配線 #3 を流れる電流である.

これらの電圧と電流は, JPSJ78 (64)・(65)・(66)・(67) により, 一般的に, 入射波と反射波の和として表される.

$$\begin{aligned} V_n(x) &= V_n e^{-jkx} + V'_n e^{jkx}, & I_n(x) &= I_n e^{-jkx} + I'_n e^{jkx} \\ V_c(x) &= V_c e^{-jkx} + V'_c e^{jkx}, & I_c(x) &= I_c e^{-jkx} + I'_c e^{jkx} \end{aligned} \quad (2.1.4)$$

これらの入射波と反射波の振幅に対して, JPSJ78 (62)・(63) が成立する.

$$\begin{aligned} V_n &= Z_n I_n + Z_{nc} I_c, & V_c &= Z_c I_c + Z_{nc} I_n \\ V'_n &= -Z_n I'_n - Z_{nc} I'_c, & V'_c &= -Z_c I'_c - Z_{nc} I'_n \end{aligned} \quad (2.1.5)$$

JPSJ78 論文には示さなかったが, この式を逆に解いておこう.

$$\begin{aligned} I_n &= \frac{Z_c V_n - Z_{nc} V_c}{Z_n Z_c - Z_{nc}^2}, & I_c &= \frac{Z_n V_c - Z_{nc} V_n}{Z_n Z_c - Z_{nc}^2} \\ I'_n &= \frac{-Z_c V'_n + Z_{nc} V'_c}{Z_n Z_c - Z_{nc}^2}, & I'_c &= \frac{-Z_n V'_c + Z_{nc} V'_n}{Z_n Z_c - Z_{nc}^2} \end{aligned} \quad (2.1.6)$$

ノーマルモードとコモンモードの 2 種類の波動の全伝搬電力 $P(x)$ は JPSJ78 (69) で与えられるが, それを計算する前に, ノーマルモードの伝搬電力 $P_n(x)$ と, コモンモードの伝搬電力 $P_c(x)$ を, 計算しておこう.

$$\begin{aligned} P_n(x) &= \frac{1}{4} \{V_n^*(x) I_n(x) + V_n(x) I_n^*(x)\} \\ &= \frac{1}{4} \left\{ \begin{aligned} &(Z_n I_n^* + Z_{nc} I_c^*) I_n + (-Z_n I_n' - Z_{nc} I_c') I_n' \\ &+ (Z_n I_n + Z_{nc} I_c) I_n^* + (-Z_n I_n' - Z_{nc} I_c') I_n'^* \\ &- 2Z_{nc} \cos(2kx) \operatorname{Re}(I_n I_c'^* - I_n' I_c) - 2Z_{nc} \sin(2kx) \operatorname{Im}(I_n I_c'^* - I_n' I_c) \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (2.1.7)$$

$$\begin{aligned} P_c(x) &= \frac{1}{4} \{V_c^*(x) I_c(x) + V_c(x) I_c^*(x)\} \\ &= \frac{1}{4} \left\{ \begin{aligned} &(Z_c I_c^* + Z_{nc} I_n^*) I_c + (-Z_c I_c' - Z_{nc} I_n') I_c' \\ &+ (Z_c I_c + Z_{nc} I_n) I_c^* + (-Z_c I_c' - Z_{nc} I_n') I_c'^* \\ &+ 2Z_{nc} \cos(2kx) \operatorname{Re}(I_n I_c'^* - I_n' I_c) + 2Z_{nc} \sin(2kx) \operatorname{Im}(I_n I_c'^* - I_n' I_c) \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (2.1.8)$$

驚いたことに, (2.1.7) のノーマルモードの伝搬電力と (2.1.8) のコモンモードの伝搬電力には, 入射波と反射波の重ね合わせとして定在波が発生し, 位置 x と共に振動する項が, 正負の符号が反転しただけの項として含まれている. その結果, 両者の和である全伝搬電力では, その項が

相殺し

$$\begin{aligned}
 P(x) &= P_n(x) + P_c(x) \\
 &= \frac{1}{4} \{ V_n^*(x) I_n(x) + V_n(x) I_n^*(x) + V_c^*(x) I_c(x) + V_c(x) I_c^*(x) \} \\
 &= \frac{1}{4} \left\{ \begin{aligned} &(Z_n I_n^* + Z_{nc} I_c^*) I_n + (Z_n I_n + Z_{nc} I_c) I_n^* \\ &+ (Z_c I_c^* + Z_{nc} I_n^*) I_c + (Z_c I_c + Z_{nc} I_n) I_c^* \\ &+ (-Z_n I_n' - Z_{nc} I_c') I_n' + (-Z_n I_n' - Z_{nc} I_c') I_n'^* \\ &+ (-Z_c I_c' - Z_{nc} I_n') I_c' + (-Z_c I_c' - Z_{nc} I_n') I_c'^* \end{aligned} \right\} \quad (2.1.9)
 \end{aligned}$$

が成立する。

この (2.1.9) の最右辺の項は JPSJ78 (69) をそのまま書き下した式である。そこに登場する全ての物理量は定数であるので、それを見る限りでは、入射波の電力と反射波の電力とは独立しているかのように見える。しかし、(2.1.7) と (2.1.8) からは、正負の符号が逆転した定在波の項が発生し、それが相殺して、(2.1.9) が得られる構造になっている。言い換えれば、(2.1.7) と (2.1.8) からすると、ノーマルモードの電力がコモンモードの電力に移動し、また、その逆に、コモンモードの電力がノーマルモードの電力に移動するという現象が起こっていることになる。その結果、全伝搬電力が一定と言う (2.1.9) が成立していることが分かる。

この辺りの事情を正しく理解する必要があるであろう。ノーマルモードとコモンモードとが結合すると、2種類のモードの波動が伝搬するに当たって、ノーマルモードの電力がコモンモードの電力に移動し、また、その逆に、コモンモードの電力がノーマルモードの電力に移動すると思いたくなるが、定在波の項を除けば、そんなことは起こらず、コモンモードの電力はコモンモードの電力として定まっており、ノーマルモードの電力はノーマルモードの電力として定まっていると考えなければならない。こう言う事情が、(2.1.7) と (2.1.8) 及び (2.1.9) から読み取れる。

従って、左側の無限遠方 $x = -\infty$ に電源が設けられているとする場合、(2.1.5) より、元々、ノーマルモード電圧には $V_n = Z_n I_n + Z_{nc} I_c$ のようにコモンモード電流が含まれ、また、コモンモード電圧には $V_c = Z_c I_c + Z_{nc} I_n$ のようにノーマルモード電流が含まれていると考えなければならない。その結果、左端に設けた電源が元々ノーマルモード

電流とコモンモード電流を同時に発生させると考える必要がある。

このことからして、第1章で列挙した6項目のうち、「⑥交直変換器や直交変換器のようなスイッチング電源を始めとして全ての信号源はコモンモードノイズとノーマルモードノイズを同時に発生する」と考えざるを得ない。「対称3線回路(第1部 概要編)」¹⁰⁾ では、「ノイズに気付いたら、それはコモンモードノイズと思え」と書いたが、コモンモードノイズが見付かった場合には、電源そのものがコモンモードノイズを発生させたと考えなければならない。しかしながら、電源そのものからコモンモードノイズが発生する機構は自明ではなく、その機構そのものを解明しなければならないのが現状である。その機構を解明する手掛かりとなる電源の等価回路を、岩波「科学」¹⁷⁾ で示してあるので、それを参考にして頂きたい。

ところで、これまで、多くの人が、電源そのものからコモンモードノイズが発生するとは考えて来なかったようである。電源が大地と相互作用することがコモンモードノイズの原因であるとは考えるものの、電源を完全に絶縁すると大地と相互作用しなくなって、コモンモードノイズは発生しないと考えるようである。いわゆる電気工学や電気技術のプロと呼ばれる人たちから、電源を完全に絶縁出来ないので困っていると言う話をよく聞かされる。この事情は、「対称3線回路(第1部 概要編)」の「2.6 接地に対するジャクソンの誤り」の節で、「完全な絶縁は不可能である」と書き、また、「光速度と言う縛りこそが電磁気学であるから、電気回路がどうであれ、何であつても、相対論を満たしているマクスウェル方程式が全て」と書いたように、全く原理的な話として、完全な絶縁は出来ないことを指摘しておきたい。

これに対して、岩波「科学」では電源の等価回路図に浮遊電気容量を描いたが、上記の言明からして、この回路図は誤りと言っても良い。浮遊電気容量を描いてしまうと、それをゼロにして、完全な絶縁が可能と考えられてしまうからである。筆者の主張では、何処かに浮遊インダクタンスがあり、電気容量をインダクタンスで割り算したものの平方根は光速度になるべきである。従って、絶縁により浮遊電気容量が小さくなると考えると、浮遊インダクタンスが大きくなり、電源と大地の

間の相互作用がなくなることはない。しかし、悔しいことに、浮遊電気容量を描く以外に、適切な等価回路図を知らないのが現状である。何とも手足が出せずに、思い悩む日々が続いている。

電源がコモンモードノイズを発生する機構が分かったとしても、コモンモードノイズを削減するには「対称3線回路」しかないので、極端に言えば、結局は、「対称3線回路」を実現する方法しかない。「対称3線回路(第1部 概要編)」の『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』の節で紹介した考えでは、電源がコモンモードノイズを発生するとしても、「対称3線回路」にして、コモンモードフィルターを設けると、コモンモードノイズが発生しなくなるので、コモンモードノイズのシミュレーション計算は不要になる。そうだとすれば、「電気回路のトポロジー」と言う考えを、回路理論として普及させるのが良いと考えたい。

もう一言、話を付け加えたくなくなった。(2.1.5)より、配線の配置が非対称な $Z_{nc} \neq 0$ の場合、コモンモード電流がゼロ $I_c = 0$ であっても、ノーマルモード電流がゼロ $I_n \neq 0$ の場合には、コモンモード電圧がノンゼロ $V_c \neq 0$ になることである。この場合、(2.1.8)のコモンモードの電力において、反射波が存在しない場合、コモンモードの電力はゼロ $P_c = 0$ となる。これらの関係から、思い付くことが複数ある。電圧を測定したところで、コモンモードノイズの情報は得られないと言うことである。コモンモードノイズの情報を得るには、電流を測定しなければならない。「対称3線回路(第2部 実践編)」¹⁵⁾の3.6.2項では、「コモンモードノイズが同定出来るには、電圧と電流と言う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」と説明したが、そのことを言っているのであろう。

コモンモード電圧がノンゼロ $V_c \neq 0$ であるからと言って、コモンモード電流がゼロ $I_c = 0$ である場合には、コモンモード電力はゼロ $P_c = 0$ であるから、コモンモードノイズが発熱の原因になることはない。我々の測定の多くは電圧であろうから、コモンモードノイズの情報を得られない

と言って良さそうである。ノイズの測定方法自身を研究開発する必要がある。

2.2 ケース1：一般的な「3線回路」で配線が無有限長で、位置 $x = s$ に抵抗による不連続がある回路

前節の(2.1.9)からすると、一様で無有限長の配線の「3線回路」で反射波が発生していない限り、一定のノーマルモードの伝搬電力と一定のコモンモードの伝搬電力が存在するに過ぎない。しかし、それぞれが一定になっているように見えるとは言え、左端 $x = -\infty$ に設けられた電源がノーマルモード電流とコモンモード電流を同時に発生し、2つのモードが結合した結果である。言い換えれば、波動が配線に沿って伝搬するとき、ノーマルモードの伝搬電力がコモンモードの伝搬電力に移動したり、コモンモードの伝搬電力がノーマルモードの伝搬電力に移動したりしている訳ではない。左端で既に定まっていると言うことである。

しかし、(2.1.7)や(2.1.8)から分かるように、配線の途中に不連続が存在していて、反射波が発生する場合には、入射波と反射波が重なり合って定在波が発生し、ノーマルモードの伝搬電力がコモンモードの伝搬電力に移動したり、コモンモードの伝搬電力がノーマルモードの伝搬電力に移動する。ただし、定在波であるため、位置 x と共に変化するだけであって、2種類の波動が伝搬するに当たって、ノーマルモードの電力がコモンモードの電力に移動し、また、コモンモードの電力がノーマルモードの電力に移動する訳ではない。このとき、位置 x と共に変化する定在波の係数は、 $(I_n I_c^* - I_n^* I_c)$ や $(I_n^* I_c - I_n I_c^*)$ のように、ノーマルモードの入射波とコモンモードの反射波との積であったり、コモンモードの入射波とノーマルモードの反射波との積であったりして、何らかの反射波が発生しているときのみである。このことからして、位置 $x = s$ には、**図2**に示すように、何らかの不連続がある場合を解く必要がある。

ここで、**図2**の定義を表すように、右足の添え字は、 $x \leq s$ に対しては左側を表すために l を付け、 $x \geq s$ に対しては右側を表すために r を付けることにする。(2.1.4)において、左側と右側の電流が議論の対象となるので、 I_{nl} , I'_{nl} , I_{cl} , I'_{cl} , I_{nr} , I'_{nr} , I_{cr} , I'_{cr} の8つの量を知る必要がある。

これに対して、**図2**の回路配置からして、左端

$x = -\infty$ に設けられた電源で発生し、左から右へと進む入射波の I_{nl} と I_{cl} は与えられていると考える。残りの6つの量をどう決めるかを検討するが、それらを定める基本方程式は2つあることに注意しておきたい。その1つはキルヒホフの第1法則（電流則）であり、もう1つはオームの法則である。従って、未知の6つの量のうち、2つを決めることしか出来ない。

ただし、いささか事情が込み入っており、話が2通りあることに注意しなければならない。配線が $x = s$ より右側に続いている場合（本節のようにケース1と呼ぶ）と、配線が $x = s$ で切れていて右側には配線がない場合（ケース2と呼ぶ）の2通りがある。ケース1（本節）とケース2（附録A.1参照）を別々に議論する。また、「対称3線回路」に対しては、ケース1に相当する場合をケース3（附録A.2参照）として、ケース2に相当する場合をケース4（附録A.3参照）として、解を与えることにする。ただし、本節ではケース1のみを示し、ケース2、ケース3、及び、ケース4は附録Aにて示すことにする。

点 P と点 Q の、それぞれで、キルヒホフの第1法則（電流則）が成立するとする。

$$I_l = I_{1l}(x=s) - I_{1r}(x=s) = I_{2r}(x=s) - I_{2l}(x=s) \quad (2.2.1)$$

右辺の2つの等式 $I_{1l}(x=s) - I_{1r}(x=s) = I_{2r}(x=s) - I_{2l}(x=s)$ をノーマルモード電流とコモンモード電流で表すと

$$\begin{aligned} I_{nl}(x=s) + \frac{1}{2}I_{cl}(x=s) - I_{nr}(x=s) - \frac{1}{2}I_{cr}(x=s) \\ = -I_{nr}(x=s) + \frac{1}{2}I_{cr}(x=s) + I_{nl}(x=s) - \frac{1}{2}I_{cl}(x=s) \end{aligned} \quad (2.2.2)$$

が成立する。この式から

$$I_{cl}(x=s) = I_{cr}(x=s) \quad (2.2.3)$$

が成立することが分かる。即ち、コモンモード電流は、主配線間の抵抗 R には影響されず、左側から右側へと、そのまま、通過する。従って、

$$I_R = I_{nl}(x=s) - I_{nr}(x=s) \quad (2.2.4)$$

が成立する。左側のノーマルモード電流と右側のノーマルモード電流との差が抵抗を流れる。

さて、点 P と点 Q の間の電圧は、左側のノーマルモード電圧と右側のノーマルモード電圧の2通りで与えられるから

$$V_n(x=s) = V_{nr}(x=s) \quad (2.2.5)$$

が成立する。これらの電圧に対して、キルヒホフの第2法則（電圧則）が成立するので、抵抗 R で割り算すると、その抵抗を流れる電流 I_R となる。従って、(2.2.4) と (2.2.5) を組み合わせると、

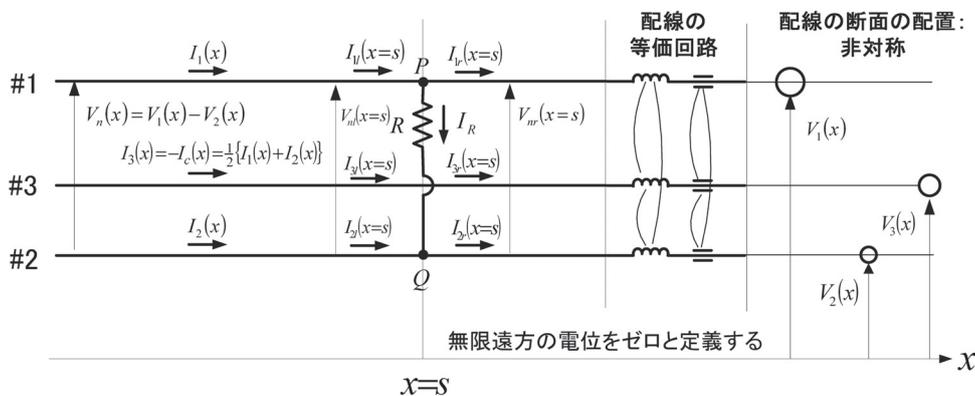


図2 配線の本数が3本の「3線回路」。 $x = s$ において、2本の主配線の点 P と点 Q の間に、抵抗 R が設けられていて、不連続がある回路。

$$\begin{cases} I_{nl}(x=s) - I_{nr}(x=s) = \frac{1}{R} V_{nl}(x=s) \\ I_{nl}(x=s) - I_{nr}(x=s) = \frac{1}{R} V_{nr}(x=s) \end{cases} \quad (2.2.6)$$

の連立方程式が得られる。この式から直ちに分かることは、左側のノーマルモードの電圧と電流は、右側のノーマルモードの電圧と電流とが結合するということである。何ともいわく言い難い現象であるが、波動であるためなのかも知れない。これらの式の限りでは、ノーマルモードしか登場しないようであるが、以下の計算で分かるように、コモンモードが影響して来る。とにかく、この2つを連立して解けば、 I_{nl} と I_{cl} 以外の I'_{nl} 、 I'_{cl} 、 I_{nr} 、 I'_{nr} 、 I_{cr} 、 I'_{cr} の6つの量を定めることが出来る。

しかし、(2.2.6)の連立方程式があるだけであるから、未知の6つの量のうち、2つを決めることが出来る。その素直な解は、コモンモード電流は(2.2.3)で示したように抵抗の影響を受けず素通りして入射波のみとし、左側のノーマルモード電流に反射波が生じ、その一方、右側のノーマルモード電流は入射波のみとする解である。それを書き下せば

$$I'_{nl} \neq 0, I'_{cl} = 0, I_{nr} \neq 0, I'_{nr} = 0, I_{cr} = I_{cl} = I_c, I'_{cr} = 0 \quad (2.2.7)$$

となる。なお、簡単のため、この式では $I_{cr} = I_{cl} = I_c$ と書いてあることに注意しておきたい。

この式を、(2.1.5)に代入すると

$$\begin{cases} V_{nl} = Z_n I_{nl} + Z_{nc} I_c, & V_{nr} = Z_n I_{nr} + Z_{nc} I_c \\ V'_{nl} = -Z_n I'_{nl}, & V'_{nr} = 0 \\ V_{cl} = Z_c I_c + Z_{nc} I_{nl}, & V_{cr} = Z_c I_c + Z_{nc} I_{nr} \\ V'_{cl} = -Z_{nc} I'_{nl}, & V'_{cr} = 0 \end{cases} \quad (2.2.8)$$

が得られる。また、(2.1.6)に代入すると

$$\begin{cases} I_{nl} = \frac{Z_c V_{nl} - Z_{nc} V_{cl}}{Z_n Z_c - Z_{nc}^2}, & I_{nr} = \frac{Z_c V_{nr} - Z_{nc} V_{cr}}{Z_n Z_c - Z_{nc}^2} \\ I'_{nl} = \frac{-Z_c V'_{nl} + Z_{nc} V'_{cl}}{Z_n Z_c - Z_{nc}^2}, & I'_{nr} = 0 \\ I_{cl} = I_c = \frac{Z_n V_{cl} - Z_{nc} V_{nl}}{Z_n Z_c - Z_{nc}^2}, & I_{cr} = I_c = \frac{Z_n V_{cr} - Z_{nc} V_{nr}}{Z_n Z_c - Z_{nc}^2} \\ I'_{nr} = 0, & I'_{cr} = 0 \end{cases} \quad (2.2.9)$$

が得られる。(2.1.4)より、左側(右足の添え字 l)と右側(右足の添え字 r)の電圧と電流の一般式として、

$$\begin{cases} V_{nl}(x \leq s) = (Z_n I_{nl} + Z_{nc} I_c) e^{-jkx} - Z_n I'_{nl} e^{jks}, & I_{nl}(x \leq s) = I_{nl} e^{-jkx} + I'_{nl} e^{jks} \\ V_{cl}(x \leq s) = (Z_c I_c + Z_{nc} I_{nl}) e^{-jkx} - Z_{nc} I'_{nl} e^{jks}, & I_{cl}(x \leq s) = I_c e^{-jkx} \\ V_{nr}(x \geq s) = (Z_n I_{nr} + Z_{nc} I_c) e^{-jkx}, & I_{nr}(x \geq s) = I_{nr} e^{-jkx} \\ V_{cr}(x \geq s) = (Z_c I_c + Z_{nc} I_{nr}) e^{-jkx}, & I_{cr}(x \geq s) = I_c e^{-jkx} \end{cases} \quad (2.2.10)$$

が得られる。

これらの式を、 $x = s$ での(2.2.6)の連立方程式に代入して

$$\begin{cases} I_{nl} e^{-jks} + I'_{nl} e^{jks} - I_{nr} e^{-jks} = \frac{1}{R} \{ (Z_n I_{nl} + Z_{nc} I_c) e^{-jks} - Z_n I'_{nl} e^{jks} \} \\ I_{nl} e^{-jks} + I'_{nl} e^{jks} - I_{nr} e^{-jks} = \frac{1}{R} (Z_n I_{nr} + Z_{nc} I_c) e^{-jks} \end{cases} \quad (2.2.11)$$

が得られる。これらの式を変形し整理すると、 $I'_{nl} e^{jks}$ と $I_{nr} e^{-jks}$ を未知数とする連立方程式

$$\begin{cases} \left(1 + \frac{1}{R} Z_n\right) I'_{nl} e^{jks} - I_{nr} e^{-jks} = -\left(1 - \frac{1}{R} Z_n\right) I_{nl} e^{-jks} + \frac{1}{R} Z_{nc} I_c e^{-jks} \\ I'_{nl} e^{jks} - \left(1 + \frac{1}{R} Z_n\right) I_{nr} e^{-jks} = -I_{nl} e^{-jks} + \frac{1}{R} Z_{nc} I_c e^{-jks} \end{cases} \quad (2.2.12)$$

が得られる。この連立方程式の解は

$$\begin{cases} I'_{nl} e^{jks} = \frac{\frac{1}{R} (Z_n I_{nl} + Z_{nc} I_c) e^{-jks}}{2 + \frac{1}{R} Z_n} \\ I_{nr} = \frac{2 I_{nl} - \frac{1}{R} Z_{nc} I_c}{2 + \frac{1}{R} Z_n} \end{cases} \quad (2.2.13)$$

と求まる。

なお、(2.2.12)からすると、いわゆるインピーダンス整合の条件 $R = Z_n$ は、右辺の第1項の係数をゼロにはするものの、ノーマルモード電流の反射波をゼロにはしてくれないことを注意しておきたい。配線の本数が2本ときの「2線回路」では起きなかった現象である。このように、(2.2.6)の連立方程式は見掛け上ノーマルモードの電流と電圧だけで与えられていただけなのに、それとは違った結果を与える感じである。(2.2.13)のノ-

マルモードの反射波 $I'_{nl}e^{jks}$ の式からすると、コモンモード電流が存在する限り、ノーマルモード電流に対するインピーダンス整合は実現出来ない。繰り返しのようになってくどのようなのであるが、(2.2.12)と(2.2.13)において、その昔から知られているインピーダンス整合の条件 $R = Z_n$ としたときでも、反射波が発生するので、話は簡単ではないと言える。

この式を、抵抗に流れる電流の式(2.2.4)に、(2.2.13)を代入して、整理すると

$$I_R = 2 \frac{\frac{1}{R}}{2 + \frac{1}{R}Z_n} (Z_n I_{nl} + Z_{nc} I_c) e^{-jks} = 2 I'_{nl} e^{jks} \quad (2.2.14)$$

が得られる。(2.2.13)で、抵抗 R を流れる電流には、左側からやって来るコモンモード電流の入射波が影響する。何がどうなって、コモンモード電流の入射波が登場するのかと考えて見ると、右辺のカッコ内の式は、(2.2.8)において、 $x = -\infty$ のノーマルモード電圧の入射波 $V_n = Z_n I_{nl} + Z_{nc} I_c$ そのものであることが分かる。結局、抵抗 R を流れる電流は、元々、コモンモード電流を含むノーマルモード電圧で発生していることになり、不連続が原因で、ノーマルモードがコモンモードに変換されたと考えることは出来ないようである。言い換えれば、 V_{nl} 、 V_{cl} 、 I_{nl} 、 I_c の大きさが変化する訳ではない。繰り返しのようになってくどのようなのであるが、前節で述べたように、2つの波動の結合現象は、左端 $x = -\infty$ に設けられた電源そのものから発生していたことになる。

こう言う事情が分かると、(2.2.14)を(2.2.13)を利用して変形したくなる。例えば、コモンモード電流の項を消去したり、ノーマルモード電流の項を消去して、抵抗 R を流れる電流を計算する。

$$\begin{aligned} I_R &= \frac{2 \frac{1}{R}}{2 + \frac{1}{R}Z_n} (Z_n I_{nl} + Z_{nc} I_c) e^{-jks} \\ &= 2 I'_{nl} e^{jks} = \frac{1}{R} (Z_n I_{nr} + Z_{nc} I_c) e^{-jks} \end{aligned} \quad (2.2.15)$$

この式から、 I_{nl} と I_c が、 I'_{nl} と I_{nr} から与えられ

ることになる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{R} Z_n I_{nl} e^{-jks} &= \frac{1}{R} Z_n I'_{nl} e^{jks} + \frac{1}{R} Z_n I_{nr} e^{-jks} \\ \frac{1}{R} Z_{nc} I_c e^{-jks} &= 2 I'_{nl} e^{jks} - \frac{1}{R} Z_n I_{nr} e^{-jks} \end{aligned} \quad (2.2.16)$$

(2.2.15)から、 I_{nl} 、 I'_{nl} 、及び、 I_{nr} を、 I_c と I_R で与えるのが良さそうである。

$$\begin{aligned} I_{nl} &= \frac{1}{Z_n} \left(\frac{2 + \frac{1}{R}Z_n}{2 \frac{1}{R}} I_R e^{jks} - Z_{nc} I_c \right) \\ I'_{nl} &= \frac{1}{2} I_R e^{-jks} \\ I_{nr} &= \frac{1}{Z_n} (R I_R e^{jks} - Z_{nc} I_c) \end{aligned} \quad (2.2.17)$$

(2.1.7)を利用して、左側のノーマルモードの電力を計算しておこう。

$$\begin{aligned} P_{nl}(x) &= \frac{1}{4} \{ V_{nl}^*(x) I_{nl}(x) + V_{nl}(x) I_{nl}^*(x) \} \\ &= \frac{1}{4} \left\{ (Z_n I_{nl}^* + Z_{nc} I_c^*) I_{nl} + (Z_n I_{nl} + Z_{nc} I_c) I_{nl}^* - Z_n I_{nr}^* I'_{nl} - Z_n I_{nr} I_{nl}^* \right\} \\ &\quad \left\{ + 2 Z_{nc} \cos(2kx) \operatorname{Re}(I_{nr}^* I_c) + 2 Z_{nc} \sin(2kx) \operatorname{Im}(I_{nr}^* I_c) \right\} \end{aligned} \quad (2.2.18)$$

(2.1.8)を利用して、左側のコモンモードの電力を計算しておこう。

$$\begin{aligned} P_{cl}(x) &= \frac{1}{4} \{ V_{cl}^*(x) I_{cl}(x) + V_{cl}(x) I_{cl}^*(x) \} \\ &= \frac{1}{4} \left\{ (Z_c I_{cl}^* + Z_{nc} I_{nl}^*) I_{cl} + (Z_c I_{cl} + Z_{nc} I_{nl}) I_{cl}^* \right. \\ &\quad \left. - 2 Z_{nc} \cos(2kx) \operatorname{Re}(I'_{nr}^* I_c) - 2 Z_{nc} \sin(2kx) \operatorname{Im}(I'_{nr}^* I_c) \right\} \end{aligned} \quad (2.2.19)$$

定在波の項は、正負の符号が反転している。(2.1.9)を利用して、左側の全伝搬電力を計算しておこう。

$$\begin{aligned} P_l(x) &= \frac{1}{4} \{ V_{nl}^*(x) I_{nl}(x) + V_{nl}(x) I_{nl}^*(x) + V_{cl}^*(x) I_{cl}(x) + V_{cl}(x) I_{cl}^*(x) \} \\ &= \frac{1}{2} (Z_n I_{nl}^* I_{nl} + Z_c I_c^* I_c + Z_{nc} I_{nl}^* I_c + Z_{nc} I_{nl} I_c^* - Z_n I_{nr}^* I'_{nr}) \end{aligned} \quad (2.2.20)$$

ノーマルモードの電力 $P_{nl}(x)$ とコモンモードの電力 $P_{cl}(x)$ は、定在波により、位置 x に依存して変化するものの、全伝搬電力 $P_l(x)$ は位置 x には無関係に定まることが分かる。この式からすると、

左側の全伝搬電力 $P_l(x)$ は、入射波の伝搬電力から反射波の伝搬電力を差し引いたものになっていると考えて良いようである。ここで、(2.1.9)を利用して、右側の全伝搬電力 $P_r(x)$ を計算しておこう。右側には反射波は存在しないので、右側の全伝搬電力は入射波の伝搬電力として計算すれば良い。

$$\begin{aligned} P_r(x) &= \frac{1}{4} \{V_{nr}^*(x)I_{nr}(x) + V_{nr}(x)I_{nr}^*(x) + V_{cr}^*(x)I_{cr}(x) + V_{cr}(x)I_{cr}^*(x)\} \\ &= \frac{1}{2} (Z_n I_{nr}^* I_{nr} + Z_c I_c^* I_c + Z_{nc} I_c I_{nr}^* + Z_{nc} I_c^* I_{nr}) \end{aligned} \quad (2.2.21)$$

(2.2.20) と (2.2.21) の振る舞いからして、それぞれが一定の、右側の伝搬電力から左側の伝搬電力を引き算すると、抵抗 R での消費電力になると思える。そこで、右側の電力から左側の電力を引き算する。(2.2.17) を代入すると、手間のかかる面倒な計算ではあるが、

$$P_l(x \leq s) - P_r(x \geq s) = \frac{1}{2} R I_R^* I_R \quad (2.2.22)$$

が成立することが示される。当然のことながら、電力は不変であることが判明した。

こう言う話になって来ると、左端 $x = -\infty$ の無限遠方での、ノーマルモードの電圧と電流、及び、コモンモードの電圧と電流を与えるのではなく、反射波の伝搬電力と透過波（右側での入射波）の伝搬電力との関係を知るのが良いように見える。そのような考え方に、ハイゼンベルクが提唱した散乱行列 (Scattering matrix) がある。電気回路理論では S パラメータ解析と呼ばれているものに

相当する。

筆者は不勉強で S パラメータ解析の詳細を知らないが、ハイゼンベルクが言うところの散乱行列は波動関数に関するもので、波動関数による確率の総和は 1 で、損失はゼロであり、しかも、2 種類の波動が結合することはない場合と考えられる。これに対して、今回の計算は、ノーマルモードとコモンモードの 2 種類の伝搬モードがあつて、その途中に、抵抗による損失がある場合であり、そんな例は、これまで、取り扱われていない可能性がある。しかし、(2.2.15) や (2.2.16) の関係が得られ、また、(2.2.22) が成立するので、何とか、定式化して見たいとは思つたが、余白もないようなので、本稿では割愛する。もっとも、筆者にはそんな実力がないのではあるが、それにしても、面白そうな課題である。

参考文献

- 15) 佐藤健次, 『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-』, 日本加速器学会誌「加速器」, Vol.11, No.3 (2014) 140-151.
- 16) 航空重大インシデント調査報告書, <http://www.mlit.go.jp/jtsb/aircraft/rep-inci/AI2014-4-3-JA804A.pdf>
- 17) 佐藤健次, わかってきたボーイング B787 型機バッテリーの発熱の謎, 自然科学月刊雑誌「科学」, 岩波書店, 2015 年 3 月号, Vol.85 No.3, 0231-0235 頁.
- 18) Hiroshi TOKI and Kenji SATO, Three Conductor Transmission Line Theory and Origin of Electromagnetic Radiation and Noise, J. Phys. Soc. Jpn. 78 (2009) 094201.