

# 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

佐藤健次

放射線医学総合研究所 HIMAC 263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川 4-9-1

## Success of very-stable operation of synchrotrons through a symmetric three-line circuit of power supplies and magnets from HIMAC to J-PARC/MR

Kenji Sato

HIMAC, National Institute of Radiological Sciences,  
Anagawa 4-9-1, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba 263-8555, Japan

### Abstract

HIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba) twin synchrotrons have worked very stably in spite of no beam feedback since commissioning in 1994 because a new practice of a symmetric three-line circuit of power supplies and magnets provides very-low noise which is essential for high accelerator performance. At that time in 1994, a three-line circuit theory of such lamped circuit elements as power supplies and magnets is clear but a theory of three-conductor transmission-line of three wires was not clear. Prof. Hiroshi Toki has found a new theory of not only three-conductor transmission-line but also multi-conductor transmission-line in early 2008 on the basis of coefficients of potential per unit length instead of coefficients of capacitance per unit length which is familiar in the well-known theory of such two-conductor transmission-line as Lecher wire and coaxial cable. Based on the new practice and the new theory, magnets of J-PARC/MR were symmetrically connected with three wires in the late 2008 and MR has succeeded to accelerate 30GeV protons just after completion of the wiring. Historical survey of the practice is described in the first half of this paper as a succession of fortune; for example, common-mode current of wave type propagating through the earth was observed as a phenomenon of reflection due to open end of three wires in INS TARN2 and impedance matching to the earth for common-mode current at the end was very helpful for improvement of wave form of noise in KEK 12GeV Proton Synchrotron. Technical and theoretical survey is given in the second half of the paper.

### 1. はじめに

2013 年（平成 25 年）4 月 6 日・7 日に大阪大学理学部において開催された杉本記念シンポジウムで、「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」と題して、「1. 対称 3 線方式」、「2. HIMAC 主電磁石電源」、「3. J-PARC/MR 主電磁石電源」、

「4. 土岐博・佐藤健次による新しい交流回路理論」、及び、「5. まとめに代えて：新しい電磁気学の到来の予感」の5章に分け、講演した。その講演の内容については、本稿の後半で説明させて頂くことにして、本稿の前半では、今回の講演に至るまでの「対称3線方式」に関する研究の経緯を、幸運な「巡り合わせ」の連鎖として、紹介させて頂く。

さて、「対称3線方式」（図6及び図7参照）と言う言葉は、2009年の土岐博・佐藤健次共著JPSJ第1論文<sup>2)</sup>が、2011年に日本物理学会第16回論文賞を受賞したときの、授賞理由<sup>7)</sup>に3度も登場している。筆者は、土岐さんが考え出した言葉だと信じ込んでしまっているが、それを確かめることなく、この言葉を愛用している。この方式では、従来の常識を覆して、電気回路を3本の線で配線し、そのうち2本を主配線とし、残りの1本を3番目の配線とする。このとき、3番目の配線に対して、電源から負荷及び主配線さらにはフィルターに至るまでの全ての回路要素を対称に配置すると、電磁ノイズが削減出来る。そこで、筆者は、この方式を、構成要素とその配置の観点から、「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」として紹介することも多い。なお、「対称3線方式」では、スタティックフィルターのみでも、通常の2線方式と比較して、電磁ノイズを1/100程度に削減出来、アクティブフィルターの後段では、さらに、1/10、削減出来る優れたものである。

放医研には1988年から1994年までの6年半在職し、HIMACの2台のシンクロトロン建設に取り組んだ。それから20年弱を経た2013年1月末のことであるが、放医研にて、『シンクロトロンでは電源良ければ全て良し：「対称3線方式」－HIMACはがん治療装置として今なお世界一』と題して、自分としては初めて、医師・看護師をも対象にしたセミナーにて話をした。

このセミナーに先立って、J-PARCのMRの加速器主幹に、「シンクロトロンでは電源良ければ全て良し」と題することに意見を求めたところ、基盤設備こそ重要で、言われる通りです、との返事を得た。J-PARCのMRが、ノイズを削減するため、HIMACの「対称3線方式」を採用するのが最善であることに気付いたのは2008年春のことである。その年末には、配線と負荷の対称化のための改造工事が行なわれ、その終了後3日にして、30GeV加速と速いビーム取り出しに成功した<sup>16,17,18)</sup>。ノイズが大幅に削減出来たからである。

しかしながら、その改造には電源の対称化が含まれておらず、従って、コモンモードフィルターを設けることが出来なかった。このように、部分的な対称化にとどまっていたため、ノイズの削減は不十分であった。そこで、さらに一桁以上ノイズを削減するべく、現在、MR主電磁石電源更新計画を策定中であり、2つの異なる方式の電源の研究開発が行なわれている。最新の高速で大電力のスイッチング素子（IGBTあるいはその相当品）を使ったものであるが、いずれも、原理的には「対称3線方式」である。中規模の試験電源が製作され、その運転では、ノイズが現状より一桁以上削減出来ると言う、素晴らしい結果<sup>19,20)</sup>を得ている。実機でこれに成功すれば、日ごろ、ノイズは正体不明のものとして、それに悩まされて続けている強電から弱電に至るまでの電気工学・電気技術のあらゆる分野の突

破口となり、ノイズ削減の朗報になる可能性が高い。

ところが、ところが、である。「対称3線方式」は、単なる技術にとどまらず、交流回路理論さらには電磁気学そのものの見直しを迫っていることが判明した。それを明らかにしたのは、土岐博さんである。百年以上に亘り、我々が教えられ教えて来た、レッヘル線や同軸ケーブルのような2導体伝送線路の回路理論では、単位長さ当たりの自己インダクタンスと単位長さ当たりのコンデンサーを想定するが、それでは、3導体伝送線路の回路理論が構築出来ないことに、筆者自ら気付いて、困り果てていた。土岐さんは、コンデンサーに代えて、電位係数を採用すると、マクスウェル方程式を満たす正しい解として、3本の配線に限らない、多導体伝送線路の回路理論が構築出来ることを発見した<sup>2)</sup>。筆者は、これを、土岐博さんが発見した「電位係数は凄い!!!」と呼んでいるが、コンデンサーは不適切な物理量であり、電位係数こそ適切な物理量であることが判明したことになる。

さらに、土岐さんは、遅延ポテンシャルを多導体伝送線路の交流現象に適用し、電気回路としての解を求めることにより、配線は電気信号を伝搬するだけでなく、同時に、アンテナとして電磁波を放射・吸収することを明らかにした<sup>3,4,5,6)</sup>。1本の配線の電気回路の場合には、アンテナとして電磁波を放射・吸収することが知られているが、それと同時に、1本の配線として電気信号を伝搬していることが判明した。言い換えれば、1本の配線であっても、磁気現象と電気現象が同時に発生するので、マクスウェル方程式が満たしている磁気と電気の双対性を満たしていることが明らかにされたが、これは世界初の快挙である。ノイズで言えば、3本の配線の電気回路では、ノーマルモードノイズとコモンモードノイズの2種類の伝導ノイズと、アンテナモードと名付けた放射ノイズとが同時に発生することを発見した。その理論に基づいて、「対称3線方式」は最善の解であることも証明した。筆者は、これを、土岐博さんが発見した「遅延ポテンシャルの交流複素数表示は凄い!!!」と呼んでいる。広く使用されている2本の配線の電気回路の場合には、実際には、大地が自動的に3番目の配線になり、コモンモードノイズとアンテナモードノイズの原因になっており、大地は無視出来ないことを意味している。「対称3線方式」では、電源を対称化して中点を設け、そこに中線をつないで3番目の配線としてやると、大地は4番目の配線となるものの無視出来ることを意味している。なお、ここで言うコモンモードノイズとノーマルモードノイズはいずれも波動として配線を伝搬する電磁場であり、その意味では、従来のノイズの考え方とは異なるものであることをお断りしておきたい。

以上のように、「対称3線方式」は技術と理論の両面から、ノイズを削減出来る唯一の方法であることを加速器分野から発信出来ることになり、社会的に大きい貢献を果たすことが期待出来る。

さて、筆者は、HIMACの他にGSIとTARN IIを含めてシンクロトロンに取り組んだのは12年間程度であるが、サイクロトロンに取り組んだのは東大核研と阪大RCNPの時代で、倍近く、25年間程度である。1994年から2006年までの11年半在職した阪大RCNPでは、現場に出たことはほとんどないが、サイクロトロンの性能向上の方法を発案し、「サ

イクロトンでは鉄芯温度が安定すれば全て良し」と言うことを確認した。これにより、RCNP サイクロトンのビーム品質は今なお世界一であると聞いている。その技術の詳細な説明は、本稿の主題ではないので、割愛させて頂くが、それを実現すればサイクロトンも優れた加速器であることを、今もって、一点の疑いもなく、信じている。

## 2. 幸運な「巡り合わせ」の連鎖

本章では、「対称3線方式」の実践と理論に至るまでの思い出話を語らせて頂くことにし、時代をさかのぼって1978年に戻って話を始めるが、幸運な「巡り合わせ」の連鎖と言うことになることを、最初に、お断りしておきたい。

### 核研 SF サイクロトン時代

東大核研のSFサイクロトンのMOPA (Master Oscillator and Power Amplifier) の建設に着手したのは1978年であった。それまでは、Dee電圧を発生させるため、3極真空管を用いた3点発振回路による自励発振器を使用していたが、7.5MHzから22.5MHzまでの周波数を実現しなかったのに対して、17.5MHzより高く出来ないことが判明した。その頃、ORICのサイクロトンのPACの論文で、4極真空管によるPA(最終段高周波電力増幅器)を用いた高周波加速系が計算機制御出来る可能性があることを知って、高周波加速系の更新を決断した。ORICに出掛け実物の写真を多数撮らせて貰い、また、阪大RCNPの三浦岩さんにPAのノウハウの詳細を教えて貰い、1981年初旬に完成させた。このシステムはパソコンで運転出来るようになったので、核研のオペレータがいない夜間でも、ユーザー自身でエネルギー変更を許すことが出来た。この運転を楽しんだ人も多いと聞いている。

このMOPAを蘭州のサイクロトンで採用することになり、日本の高周波装置のメーカーに発注する話が出て来て、来日した蘭州の人に、設計図と測定データの全てのコピーを手渡し、国内のメーカー3社とのそれぞれ個別の打ち合わせで説明した。しかしながら、結局、蘭州は、この3社ではなく、中国のメーカーに発注した。

### GSI 時代

このMOPAをSFサイクロトンでの最後の仕事として、国外で勉強したいと平尾泰男先生に申し入れたところ、GSIを紹介して貰った。1982年の2月から12月までの間、GSIの客員研究員として、SISの要素開発グループに属した。加速器部長からは研究課題を10個ほど並べ立てられた。その中で一番賑やかだった(???)課題は、高周波加速空洞の開発であった。当時、加速空洞の方式には、CERN方式とSATURNE II方式があったが、加速器部長が選んだのはSATURNE II方式であった。ところが、寄生共振が発生する問題に遭遇しており、周波数広帯域が実現出来ていなかった。そのため、CERN方式推薦派との間で、ところかまわず、ランチ時の食堂でさえも、激論を交わしていた。即ち、賑やかだった(!!!)。SISの皆さんも若かったと言えば若かったと言うことであろうが、今となって思

うのは、激論も許されている健全なグループでもあったということである。自分にとっては「巡り合わせ」と言うことになるが、結局、高周波加速空洞の開発グループに加わった。

それに専心するようになって、そのうち、寄生共振の原因に思い当たる節が出て来た。しかし、自分が望む弱電での測定が容易ではないのである。GSI では、**scientists, engineers, technicians** の3職階があり、普段は、**scientists** 自らは、ねじ回し一つ握れないとのことであった。ところが、夏休みが来て、人っ子1人いないことを知り、自分一人だけの弱電での測定を申し入れたところ、許可された。その測定で、寄生共振の原因が思った通りであり、寄生共振が制御出来ることが判明した。その報告と同時に、後々「対称8の字形バイアス巻線」と呼ぶようになった電氣的構造を提案した。夏休みが明けると10人以上の人がやって来て、たちまちのうちに、加速空洞を改造した。SIS を成功に導いたということで、その後、大いに感謝された。

なお、CERN 方式でも寄生共振があることは想像に難くないが、その機械的構造が堅固であるため、構造変更が容易ではなく、寄生共振の制御は簡単ではない。それに対して、SATURNE II 方式は柔らか構造であり、寄生共振の制御には適している。その点、加速器部長の選択は正しかったと言えるが、構造が軟弱なため、速い繰り返しのシンクロトロンには不向きである。繰り返しが速い場合には CERN 方式を選択せざるを得ないが、寄生共振には要注意である。

GSI では喫煙者は喫煙者と同室であった。相手は電磁石の担当者であったが、電磁石を直列につないだときの繰り返し回路の電気回路の計算をしていた。その回路はどういう訳か、3本線であった<sup>8)</sup>(図1参照)。電磁石のコイルを上下で切り離し、そのそれぞれを直列につないであり、電磁石の鉄芯は大地につながっているとされており、3本線の電気回路になっていた。また、各電磁石の上下コイルのそれぞれに抵抗が架橋されているのが特徴であった。これまで見たことがない3本線の回路であったり、大地が1本の配線と見做されている点で、興味をそそられた。しかし、電源は1台であり、負荷は3番目の配線である大地に対して対称に配置されているため、大地に電流が流れないとして、結局は、2本線回路が計算されていた。筆者は、加速空洞の仕事がなくなったので、その後は、この繰り返し回路の計算に凝っていた。ここでの計算が、その後の「対称3線方式」の発案の切っ掛けとなったので、これまた、喫煙者同士と言うことを含めて、自分にとっては「巡り合わせ」と言うことになった。

## TARN II 時代

GSI にて研究していた1982年に、NUMATRON 計画がとん挫したこともあり、帰国後は、東大核研のクーラーシンクロトロン TARN II の建設グループに属し、加速空洞の開発に、メーカーのA社の3人の人と一緒になって、取り組んだ。それと同時に、加速周波数の制御に必要なビーム負帰還のための低雑音の静電型ビームモニターの開発を行なった。

加速空洞で必要とされる加速周波数は1MHzから7MHzの7倍であるが、弱電の測定で、

寄生共振の周波数は 0.5MHz と 30MHz 以上（7MHz の 3 倍の 21MHz 以上に制御することが必要）にあり、寄生共振は思い通りに制御出来ていることを確認した。従って、0.6MHz から 9MHz の範囲でも運転可能であった。次の段階は PA（最終段高周波電力増幅器）の製作であるが、お金がなかった。蘭州の MOPA で付き合った B 社と C 社の 2 社に声を掛けた。ところが、KEK の 12GeV・PS で PA を担当した B 社は、電氣的構造仕様で十分と言う筆者の提案にも拘らず、びた一文、安くしてくれなかった。PS では周波数可変範囲は 4 倍であり、それでも手こずったのに、TARN II では 7 倍であり、必ずや、メーカーの持ち出しになると言うことであった。想像するに、12GeV・PS では、加速空洞の寄生共振の原因の解明が不十分であり、PA が安定に運転出来るようになるまでには、かなりの手間を要したと言うことのようなのである。

それに対して、C 社は蘭州との MOPA の打ち合わせでの筆者の説明が明快であり、TARN II の加速空洞の弱電での測定結果を信用し、電氣的構造仕様のみと言うことで、持ち合わせた予算で引き受けてくれた。自分にとっては「巡り合わせ」と言うことになる。C 社製の PA を取り付けて運転して見ると、何と、200MHz 近くのとんでもなく高い周波数で自励発振が発生し、PA の直流高圧電源の配線用のセラミック製のフィードスルーが破損した。そこで思い出したのは、その昔の三浦岩さんの教えであった。不要な空間を狭くすると言うことであったが、加速空洞と PA との間の結合部には大きく口を開けた空間があった。そこを銅板で塞いだところ、寄生共振が起こらなくなった。この加速空洞は HIMAC シンクロトロンでも採用した。NUMATRON 計画では重イオンシンクロトロンの技術的な課題の 1 つに周波数広帯域の加速空洞が挙げられていたと聞かすが、自分にとっては、GSI での研究も含めて、「巡り合わせ」により、その課題も、無理なく合理的に、克服出来た。

ところで、TARN II の加速空洞の開発に取り組んだ A 社の 1 人は、社内では、電源の部署に属している人であった。その人に、電磁石のコイルに抵抗を架橋する GSI での筆者なりの計算を見せたところ、驚かれてしまった。KEK の AR（現在の PF-AR）のサイリスタ電源を製作し、ノイズが少ないと言うことに自信を持って運転して見たところ、真空ダクトが音を出して唸り出すと言う、思いも掛けない現象に出くわしたと言うことである。サイリスタ電源の転流ノイズに付随する減衰振動の周波数、電磁石の繰り返し回路の共振周波数、及び、真空ダクトの機械的振動の固有振動数の 3 つが、全て一致してしまったためである。結局、この 3 つの共振のうち、制御して変化させられるのは、電磁石の共振周波数だけと言うことになり、コンデンサーと抵抗を直列につなぎ、それを各電磁石のコイルに架橋したとのことである。筆者は、その回路を机上で計算していたことになる。筆者にとっては「巡り合わせ」と言うことになるが、サイリスタの転流ノイズがノイズの原因であることを知った。後々、このノイズを削減出来る「対称 3 線方式」を発案し実現出来たことを思えば、それにしても、凄い「巡り合わせ」であった。

ただし、ここで断っておきたいことは、電磁石のコイルに抵抗を架橋すると電流ノイズが削減出来るには削減出来るが、通常の配線は 2 線方式であるため、数分の 1 程度の削減

にとどまり、「対称3線方式」のように1/100の削減は実現されないということである。

## HIMAC 時代

その後、筆者は1988年に放医研に転任し、HIMACで「対称3線方式」の電源を製作することになった。しかし、それは簡単な話ではなかった。12GeV・PSの電源を担当された松本啓先生には客員研究官になって頂き、電源に関して、本当に多方面から指導して頂いた。先生は、12GeV・PSではノイズが多くて困ったことを経験されており、電源が発するノイズの削減に情熱を燃やしておられた。しかし、筆者自身、「対称3線方式」の計算途上であるため、先生にはその良さを直ちには理解して頂けなかった。

それにも増して、困ったのは、メーカーのD社の取り組みであった。「対称3線方式」の電源の製作経験が皆無であったこともあり、当初、この方式は拒否された。そう言えば、筆者自身それまでサイリスタ電源製作の経験は皆無であり、それに加えて、筆者の紙と鉛筆での計算だけが「対称3線方式」の根拠であるから、無理もない話であった。しかし、計算はそれなりに進展し、筆者は、この方式以外にはノイズ削減を実現する方法はないと言う思いが募った。さらに運良く、これまた「巡り合わせ」であるが、TARN IIと12GeV・PSで、目には定かには見えないノイズ、それも大地を流れるコモンモードノイズが波動として存在することに気付かされた。TARN IIでは電磁石のコイルに架橋抵抗を設けることを提案したが、サイリスタの転流ノイズが削減出来ることに加えて、コモンモードノイズの反射波が存在していることを知った<sup>9)</sup>(図3及び図4参照)。そのコモンモードノイズの反射波は、大地を3番目の配線とすると、その末端が開放のときの現象になる。ところが、何と12GeV・PSでは、その末端がインピーダンス整合されていることを知った<sup>10)</sup>(図5参照)。松本先生には電磁石を1台切り離して貰って、その自己インダクタンスとコンデンサーを測定したところ、それらから定まる特性インピーダンスが、末端に設けられていた抵抗の値にほぼ一致することを確認した。こうして、未完ではあるものの筆者の計算は悪くないことになった。そこで、性能仕様を外し、電気的構造仕様のみで、製作を依頼したが、それに至るまでには、数カ月を要した。ところが、現場への納品直前の社内の試験で、D社始まって以来の高性能で、大幅にノイズが削減出来たとのことであった。

HIMACの運転でも、電流ノイズは、スタティックフィルターのみで2ppmであり、アクティブフィルターの後段では10倍近く改善されて0.3ppmであり、ノイズ削減を実現出来た<sup>11,12,13)</sup>。このスタティックフィルター後段での2ppmは、通常の2線方式で発生しているノイズの1/100程度であり、アクティブフィルターの後段ともなると、「ノイズもナノワールドになった」などと、筆者は言ったりしている。その結果、シンクロトロンの運転開始後1カ月程度で、全てのコースのビーム輸送に成功した。さらに、驚いたことに、治療照射の線量計の校正にはdirect countingが最適とされているが、それに必要な毎秒1,000個程度の微弱強度のビームの加速とビーム取り出しが、その後間もなく、実現出来ることが判明した。その測定に携わった研究者からは「シンクロトロンがサイクロトロンのようなになった」と言われた。しかし、8時間以上、微弱ビームが安定に保たれたので、サイクロ

トロンの運転を経験して来た筆者自身は、サイクロトロン以上になったと思った。

## 阪大 RCNP 時代

さて、HIMAC 後も「巡り合わせ」が続いた。以下では、1994 年の阪大 RCNP 転任後、2006 年の定年退職までの「巡り合わせ」について書かせて頂く。

筆者は、既に阪大 RCNP に転任してサイクロトロンに夢中であったためか、寡聞にして知らなかったが、SPring-8 の放射光源リングの前段の電子シンクロトロンの電源は「対称 3 線方式」であるとのことである。この電源の製作には 3 社のメーカーが応札したが、一番性能仕様がなくて、一番安かったのは、HIMAC 電源を製作したメーカーの D 社であった。結局、そこが落札したため「対称 3 線方式」になったものと思われる。

落札が出来なかったメーカー E 社が、これに慌てて、「対称 3 線方式」の電源を、RCNP にて、民間等との共同研究で開発したいと申し入れて来た。それを受けた。そうは言うものの、受変電や配線や分電盤のような電源本体以外のものにも多額の費用が発生し、RCNP のような中規模の研究所には大きい負担であった。当時、RCNP 内では「対称 3 線方式」の何たるかが知られておらず、たかが電源ごときものに貴重な予算を充てることに疑問を持たれた研究者もおられたかと思う。その当時の核物理研究センター長の江尻宏泰先生には、この研究とその予算を認めて頂いた。なお、負荷としては、その当時、既に解体されていた KEK の TRISTAN の長尺偏向電磁石を 4 台譲り受けた。こうした皆さんのご協力のお陰であるが、その性能は、スタティックフィルターのみで電流ノイズは 2ppm で、HIMAC の性能を再現し、「対称 3 線方式」が優れものであることを確認した。従って、誰が作ってもノイズを削減出来ることになったが、実際、この成果は、E 社の兵庫県立粒子線医療センターの電源へと発展した。

2006 年 3 月の筆者の RCNP での最終講義には、2 つのメーカーの電源担当者 2 人を呼んだ。定年退職直前になって、市販のパワー MOS・FET の電源を 2 台組み合わせると「対称 3 線方式」の配置に出来ることを思い付いた。これを発案した切っ掛けは、誰でも手軽に「対称 3 線方式」の素晴らしさを確認出来る測定を示せと言う、土岐博さんからの、強い強い、それは強い圧力があったからである。その結果は素晴らしいもので、10MHz 近くの高い周波数のノイズであるにも拘わらず、数十分の一近くまで大幅に削減出来ることが判明した。HIMAC のサイリスタでの 5kHz 程度のノイズと、このパワー MOS・FET の 10MHz 程度のノイズのいずれも、「対称 3 線方式」で大幅に削減出来ることが判明したので、スイッチング素子が IGBT でも、その 1MHz 程度のノイズを削減出来ることになる。そこで、将来、J-PARC や粒子線がん治療装置の IGBT 電源製作の担い手となると睨んだ、2 つのメーカーの 2 人を最終講義に呼んだ。

1 人は「対称 3 線方式」電源の民間等との共同研究に取り組んだ E 社の人である。もう 1 人は TARN II の加速空洞の開発に取り組んだ A 社の人であるが、先に紹介した人とは別人の、しかし、電源の部署の人である。その後、A 社と E 社の 2 つのメーカーの電源部署は切り離されて 1 つのメーカー F 社を作り、現在、2 人はその所属になって、J-PARC/MR



や粒子線がん治療装置の電源の製作に当たっている。これまた、「巡り合わせ」である。

### J-PARC/MR 時代

2007 年のことであるが、J-PARC/MR の主電磁石電源のノイズが大きいことに気付いた人がおられた。当時加速器施設長であった神谷幸秀さんである。筆者はその当時大阪電気通信大学の短期大学部に勤務していたが、神谷さんの手配で、その年の 4 月から 9 月にかけて、つくばや東海に出掛け、5 回に亘る J-PARC セミナーで、筆者は「対称 3 線方式」＝「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」により、ノイズを削減出来ることを紹介した。

ここで、脱線させて頂く。あるときのセミナーと同時に開催された J-PARC 加速器担当者打ち合わせで、再び、PF-AR（その昔の AR）の電源のトラブルの報告に出会った。旧来のサイリスタを IGBT に置き換えたところ、対地保護回路（正確な機器名称を筆者は失念した）が破損したとのことである。そのとき報告された、交流系統の、ある相の電流と相間電圧の測定から、交流系統にも、大地を流れる電流として、コモンモードノイズが存在していることに気付いた。それに基づいて、交流系統の新方式のフィルターを提案し提案した<sup>14)</sup>。PF-AR（その昔の AR）との、一度ならず二度に亘る、即ち、初回は直流側で、二度目は交流側のコモンモードノイズとの、運命的な「巡り合わせ」と言うことになる。

### 土岐博・佐藤健次による新しい交流回路理論と新しい電磁気学の到来の予感

閑話休題。土岐博さんとの共著論文として、2006 年には NIM 論文<sup>1)</sup>を、2009 年には、土岐博さんが発見した「電位係数は凄い!!!」ことに基づく JPSJ 第 1 論文<sup>2)</sup>を発表した。この 2009 年の論文の前年の 2008 年の中旬には、その理論がほぼ完成していたが、その一方で、先に述べたように、2008 年春に、J-PARC/MR の主電磁石電源の「対称 3 線方式」の検討が始まっていた。また、2008 年末の負荷と配線の対称化工事により、MR で良い結果が出たので、「対称 3 線方式」の技術自身は、佐藤・土岐回路<sup>16,17,18)</sup>と呼ばれたり、理論自身は、土岐・佐藤理論<sup>16,17,18)</sup>と呼ばれるようになった。佐藤・土岐回路は、測定結果や観測事実に基づいて発案されたものの、理論に基づくものではないので、土岐・佐藤理論を先取りしたと言える。

この JPSJ 第 1 論文の理論は、「電位係数は凄い!!!」ということに基づいて、コモンモードノイズとノーマルモードノイズの 2 種類からなる伝導ノイズの起源を明らかにした。しかし、現場で実務に取り組む筆者としては、電磁波の放射、即ち、放射ノイズの起源を知りたかった。この課題に対して、土岐さんは、「遅延ポテンシャルの交流複素数表示は凄い!!!」ことを発見し、2012 年には、それに基づいて、土岐博・佐藤健次共著 JPSJ 第 2 論文<sup>5)</sup>を発表した。さらに、それと相前後して、英文や邦文の複数の論文<sup>3,4,6)</sup>を発表した。

伝導ノイズと放射ノイズは同時に発生することが明らかになり、「新しい交流回路理論」が完成したことになる。そうは言うものの、これで話は終わりそうにもない。例えば、コンデンサーは不適切な物理量であり、電位係数こそ適切な物理量であることからして、コ

ンデンスーを流れる変位電流は不適切な物理量になり、従来の電磁気学を見直す必要がありそうである。また、1本の配線であっても、磁気現象と電気現象が同時に発生して、マクスウェル方程式と同じく、磁気と電気の双対性を満たしていることを、既に、第1章で述べたが、それにより、1本の配線の電位が定義出来ることになる。これまた、従来の電磁気学を見直す必要がありそうである。

もちろん、マクスウェル方程式は正しく、真電荷と伝導電流に対する連続の方程式も正しく、オームの法則も成立しているとするので、この限りでは、従来の電磁気学は正しく、その見直しを、「新しい電磁気学の到来の予感」と言うには言葉が過ぎるかも知れない。しかし、従来の電磁気学の参考書や教科書が、電磁場の伝搬のみを取り扱い、コンデンサーを適切な物理量としている点については見直す必要があると思える。

本章の最後に、その見直しの必要性を指摘して、幸運な「巡り合わせ」の連鎖の紹介を終えることにする。

### 3. HIMAC シンクロトロン主電磁石電源：「対称3線方式」

1982年にGSIに滞在していたとき、CERNのシンクロトロン加速器CPSの設計報告書の電源と電磁石負荷の回路図<sup>8)</sup>として図1を見た。どう言う訳か、3本線の回路であり、偏向電磁石のコイルは上下で切り離され、そのそれぞれが配線で直列につながれ、また、各コイルには抵抗が架橋されていた。左端には電源が1台設けられており、右端は、最後の電磁石の上下コイルが当然のことながら短絡されていた。3番目の配線はコイルが鉄芯に対して持つコンデンサーの行きつく先であるから、図中に示すように、大地と考えられる。

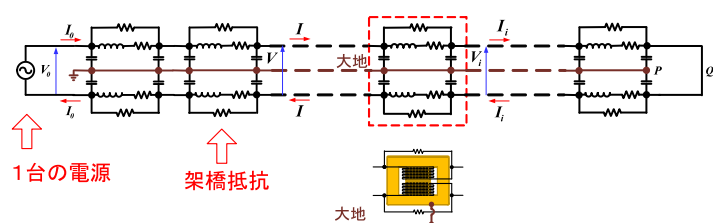


図1：

GSIで見た3本線回路（CERNのCPSの設計報告書<sup>8)</sup>）。電磁石コイルは上下に分離され抵抗が架橋されており、電源は左端に1台設けられている。

ここでお断りしておくと、この3本線回路はCERNのCPSでもGSIのSISでも製作された様子がない。しかし、最近CERNに出掛けて「新しい交流回路理論」のセミナーを行った土岐さんの話によれば、LHCで製作されるようになっていたとのことである。

さて、この回路は原理的には3端子入力で3端子出力の6端子回路網であり、その繰り返し回路になっている。ところが、電磁石は上下対称な配置になっていて、左端の電源が1台であるため、大地には電流が流れないことになるので、結局は、図中に示してあるように、電圧 $V$ と電流 $I$ に関する2端子入力で2端子出力の4端子回路網を計算すれば良い。

基本行列を用いると、繰り返し回路は

$$\begin{pmatrix} V_0 \\ I_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \cdots = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}^i \begin{pmatrix} V_i \\ I_i \end{pmatrix} = \cdots = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}^N \begin{pmatrix} V_N \\ I_N \end{pmatrix} \quad \text{where } V_N = 0 \quad (1)$$

と表わされる。筆者は、GSI で、この繰り返し回路の計算に凝っていた次第である。

それで分かったことをざっくりと言え、電磁石 1 台の電気回路としての共振周波数を  $f_0$  とすれば、 $N$  台の電磁石をつなぐと、共振が  $N$  個発生し、最低周波数は  $f_0 / N$  になる。

ところで、シンクロトロンでは台形励磁が時間的に繰り返されるので、左端の電源の電圧は、大雑把に言って、単位階段関数と考えられる。このとき  $N$  個の共振が励起され、それが磁場の変動になり、しかも、電磁石に沿って磁場が波動状に分布するので、ベータatron 振動しながら周回するビームに共鳴的な影響を与える。それを避けるために、各コイルには抵抗を架橋してやって、共振を緩和してやれば良いと言う仕掛けになっていた。

ところが、その後、この  $N$  個の共振がサイリスタ電源の転流ノイズにより励起されることを知り、従って、磁場にはリップルやノイズが現われることを知った。このとき、架橋抵抗が  $N$  個の共振を潰すのに有効であり、リップルやノイズを減らすのに有効であることを知った。また、電磁石のコイルの自己インダクタンスが高い周波数においてはインピーダンスが高くなるが、架橋抵抗はその側路になっていて、コイルを流れる励磁電流から高い周波数成分を減らすことに有効であるとも考えるようになった。

ところが、放医研で HIMAC に取り組んだところ、図 2 に示すように、左端の電源は、1 台ではなく、2 台直列につながっていることを知った。図 2 の 2 台の電源において、例えば、1 台それぞれが 3 相全波の 6 相整流とすると、2 台を直列につなぎ、2 台の交流系統の位相をずらして、12 相整流にしている。サイリスタを転流するときのタイミングを上下 2 台の電源でずらしているの、2 台の電源の接続点を中点と呼ばば、中点の電圧が  $\frac{1}{2}(U_0 - V_0)$  で変動する。

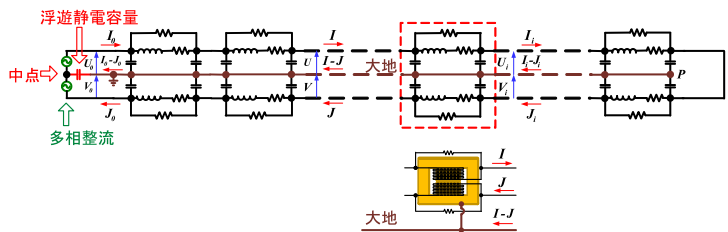


図 2 :

HIMAC に取り組んで初めて、多相整流のため、電源が上下 2 台直列であることを知った

この中点が大地に対して浮遊のコンデンサーでつながっていると考えると、大地には電流が流れることに気付いた。上の配線に流れる電流を  $I$  とし、下の配線に流れる電流を  $J$  とすると、1 本の配線と考えるようになっていた大地には両者の差の電流  $I - J$  が流れる。そこで、松本啓先生の助言により、この差の電流をコモンモード（正しい定義は(6)と(7)を参照のこと）と呼ぶことにした。ところで、図中に示してあるように、 $I = \frac{I+J}{2} + \frac{I-J}{2}$  及

び  $J = \frac{I+J}{2} - \frac{I-J}{2}$  が成立するので、リップルやノイズは、和の電流か、それとも、差の電流なのかを知れば良いことに気付いた。このとき、差の電流をコモンモードと呼ぶことにしたので、和の電流をノーマルモードと呼ぶことにした。

そうこうしているうちに、TARN II の田邊徹美さんから、電子冷却装置の運転に入ったものの、電磁石の電流のリップルやノイズが大きくて困っており、何か、打つ手はないかとの問い合わせがあった。そこで、コイルに抵抗を架橋することを提案した。そのときの TARN II の電源と電磁石の電気回路図を図 3 に示すが、電磁石は対称化されていない。

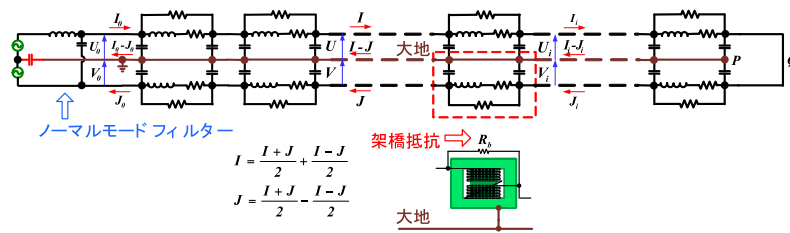


図 3 :  
TARN II での架橋抵抗

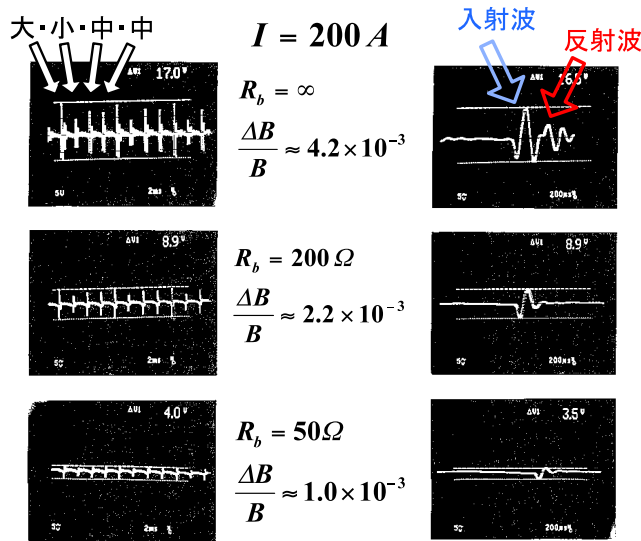


図 4 :  
TARN II の架橋抵抗の効果のサーチ  
コイルによる測定データ<sup>9)</sup> (今なお国  
内での唯一の貴重な測定データ)

2・3 日もしたら、図 4 の測定データ<sup>9)</sup>が送られて来た。このとき、2通りの方法で測定が行なわれており、1つは図 3 の左方にある電流  $I_0$  の DCCT による測定で、もう1つは電磁石磁場のサーチコイルによる測定である。図 4 はサーチコイルによる測定で、左列にある図では、転流ノイズが「大・小・中・中」の順序に3回並んでいて、12 相整流であることを示している。右列の図は、その中の1つを拡大したものであるが、架橋抵抗の値を小さくするとノイズが小さくなっている。それだけではなく、抵抗を架橋しないとき ( $R_b = \infty$ ) には転流ノイズの後にノイズが付随していることに気付いた。それは繰り返し回路がまるで伝送線路のような振る舞いをしていると考えたときの反射波であると判断した。

そして、その図から、電流の反射波の位相が反転していると言う、驚くべきことに気付

いた。電流の反射波の位相が反転するということは、電気回路は右端で開放であり、図3の右端の点Pと点Qとの間が開放であると考えれば良いことに気付いた。従って、大地が電磁石のコイルをつなぐ配線とはつながっていないと考えれば良いことになり、大地を流れる電流が励磁電流のリップルやノイズになっていることを知った。

なお、図4の測定データは、今なお、国内の唯一の測定データであり、「対称3線方式」が普及しつつある今となつては、こうした現象はもはや観測されることがなく、貴重な測定データである。

図3の右端の点Pと点Qとの間が開放であるため図4の反射波が発生したということになると、インピーダンス整合をすれば良いことになる。ところが、またまた驚いたことに、松本啓先生から、12GeV・PSの偏向電磁石では、図5に示すように、右端の点Pと点Qとの間に、抵抗とコンデンサの直列回路を、リップルやノイズを減らすために、設けてあるということを教えて貰った<sup>10)</sup>。そこで、古巣の東大核研から測定器を携えて、PSの運転停止日に出掛け、電磁石を1台切り離して貰って、励磁電流がゼロのときではあるが、その自己インダクタンス $L$ とコンデンサ $C$ を測定した。そして、特性インピーダンス $\sqrt{L/C}$ が抵抗の大きさにほぼ一致していることが判明した。何と、12GeV・PSでは、大地を流れるコモンモード電流に対してインピーダンス整合されていたのである。

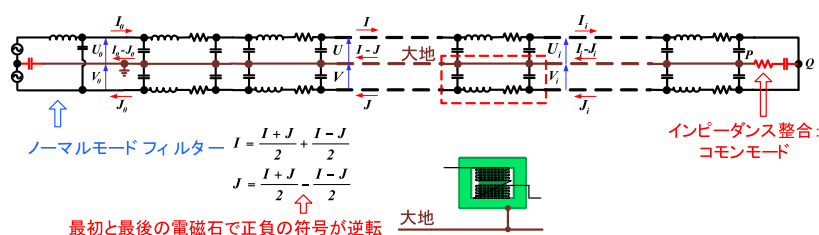


図5：  
12GeV・PSでのコモンモードノイズとそのインピーダンス整合<sup>10)</sup>

これで、目には定かには見えない、大地を電流として流れる、コモンモードノイズの素性が判明した。そうであれば、またまた、雰囲気のあることを思い付いた。図5にも式を示しているが、コモンモードノイズであれば、最初の電磁石と最後の電磁石のノイズとは、正負の符号が逆転しているはずである。12GeV・PSの末野毅さんと佐藤皓さんに測定をお願いしたところ、確かに、正負の符号が逆転していた<sup>10)</sup>。

これだけデータが揃えば、ノーマルモードと呼ぶ和の電流はリップルやノイズの原因にはなっていないことになる。それは、電源では、図5の左方に示すように、多かれ少なかれ、フィルターが設けられているが、それはノーマルモード用であり、このノーマルモードフィルターがノーマルモードノイズを削減していると考えて良いからであると判断した。

そこで、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検討した。それには、電源の中心に、大地に代えて、3番目の線をつなぎ込めば良いことに気付いた。この3番目の配線により、大地は4番目の配線になるものの無視出来ると考えた。そこで、図6に示すように、HIMACでは、コモンモードフィルターにはリアクトル

トランス方式のコモンチョークコイルを、ノーマルモードフィルタにはリアクトルトランス方式のノーマルモードチョークを直列につないで、その後段を、コンデンサーで中線につないだ。機能分離型フィルタと呼ぶことが出来る。

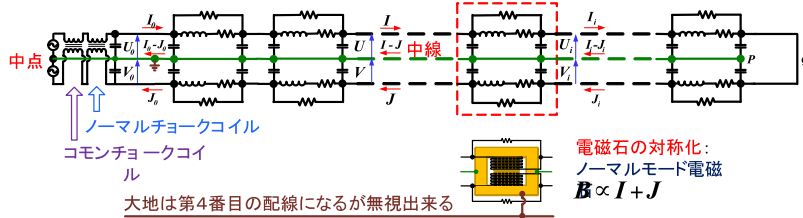


図 6 : HIMAC で製作した「対称 3 線方式」電源と機能分離型フィルタ

それにも負けず劣らず、ノーマルモード電磁石と呼ぶ、電磁石の対称化には惚れ込んだ。図 6 の電磁石の説明にあるように、上下コイルを切り離して励磁電流を流すと、磁極間隙での磁場は、コモンモードノイズには影響されず、ノーマルモードのみで定まるのである。即ち、 $B \propto I + J$  が成立し、磁場はコモンモードノイズには汚されないことになる。従って、電源と負荷の両方から対称化が相乗効果を発揮出来ることになる。

その結果、HIMAC で実現出来た性能<sup>11,12,13)</sup>は、電流ノイズにして、2つのスタティックフィルタの後段で、ノーマルモードノイズとコモンモードノイズは 2ppm 程度であった。実際には、その後段に、アクティブフィルタを設けており、0.3ppm であった。

以上により、「対称 3 線方式」＝「電源と負荷と配線の対称化＋コモンモードフィルタとノーマルモードフィルタ」の HIMAC シンクロトロンの主電磁石電源が完成した。

ここまでは、何とはなく直感に頼った話なので、少しばかり、理論的な説明をしておきたい。そう大見えを切っては見たものの、当時の話は行列の世界での話であった。大地を流れるコモンモード電流は差の  $I - J$  であることが判明し、和の  $I + J$  をノーマルモード電流と呼ぶことにしたので、ノーマルモード電圧を  $U + V$  と定義し、コモンモード電圧を  $U - V$  と定義した(正しい定義は(6)と(7)で、単なる和と差とは係数が異なることに要注意)。

このとき、和と差の関係は、基本行列では、

$$\begin{pmatrix} U_0 + V_0 \\ I_0 + J_0 \\ U_0 - V_0 \\ I_0 - J_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 + V_1 \\ I_1 + J_1 \\ U_1 - V_1 \\ I_1 - J_1 \end{pmatrix} = \cdots = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix}^i \begin{pmatrix} U_i + V_i \\ I_i + J_i \\ U_i - V_i \\ I_i - J_i \end{pmatrix} = \cdots = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix}^N \begin{pmatrix} U_N + V_N \\ I_N + J_N \\ U_N - V_N \\ I_N - J_N \end{pmatrix} \quad (2)$$

が成立する。このような 4 行 4 列の行列の繰り返し回路は絶望的な計算になるが、対称化すると、話は簡単になる。即ち、対称化により、逆対角成分がゼロ、即ち、

$$a_{13} = a_{14} = a_{23} = a_{24} = a_{31} = a_{32} = a_{41} = a_{42} = 0 \quad (3)$$

を成立させれば、部分空間が対角化されるので、和の世界と差の世界が分離される。

$$\begin{pmatrix} V_0 + U_0 \\ I_0 + J_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_+ & b_+ \\ c_+ & d_+ \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 + U_1 \\ I_1 + J_1 \end{pmatrix} = \cdots = \begin{pmatrix} a_+ & b_+ \\ c_+ & d_+ \end{pmatrix}^i \begin{pmatrix} V_i + U_i \\ I_i + J_i \end{pmatrix} = \cdots = \begin{pmatrix} a_+ & b_+ \\ c_+ & d_+ \end{pmatrix}^N \begin{pmatrix} V_N + U_N \\ I_N + J_N \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} V_0 - U_0 \\ I_0 - J_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_- & b_- \\ c_- & d_- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 - U_1 \\ I_1 - J_1 \end{pmatrix} = \cdots = \begin{pmatrix} a_- & b_- \\ c_- & d_- \end{pmatrix}^i \begin{pmatrix} V_i - U_i \\ I_i - J_i \end{pmatrix} = \cdots = \begin{pmatrix} a_- & b_- \\ c_- & d_- \end{pmatrix}^N \begin{pmatrix} V_N - U_N \\ I_N - J_N \end{pmatrix} \quad (4)$$



このようにノーマルモードとコモンモードとが分離出来ると、そのそれぞれを制御すれば良いので、ノイズも削減出来ることになる。しかし、対称化が実現されていない場合には、部分空間が対角化されないで、コモンモードとノーマルモードとが結合し、如何ともし難いと言うことで、2005 年の第 8 回加速器電源シンポジウムでは、「comal (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」と題した発表<sup>15)</sup>を行なった。comal (コマル) とは common の前半と normal の後半とをつなぎ合わせた造語で、言葉遊びではあったが、水平方向と垂直方向の 2 つのベータトロン振動が、例えば、四極電磁石のミス・アラインメントでスキュー四極成分を持つと、結合する事情に類似していることを指摘した。しかし、その説明においては、ベータトロン振動を 4 行 4 列の変換行列で語り、連立の偏微分方程式で解釈しなかったため、その結合の物理的意味を明快に説明出来なかった。後ほど、第 4 章で、「土岐博・佐藤健次による新しい交流回路理論」で紹介するように、3 導体伝送線路の回路理論での偏微分方程式と変換行列との関係が明らかにされた。

さて、図 6 では、コモンモードフィルタとノーマルモードフィルタのそれぞれに対して、リアクトルトランス方式のチョークコイルを採用しているが、単なるリアクトルとコンデンサを組み合わせることも出来る。図 7 にそれを示す。この図の方が、何となく、親しみ易い人も多いかと思うので、図 6 に代えて示す機会が多いが、ノーマルモードフィルタとコモンモードフィルタの結合型になる。

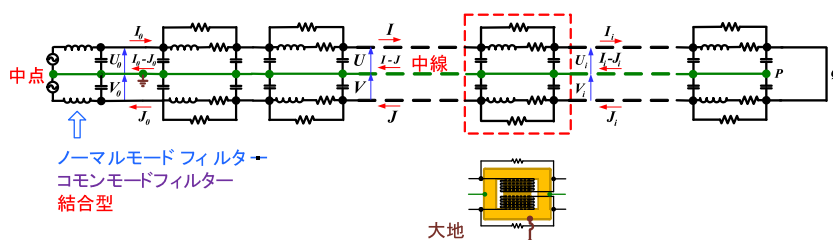


図 7 :  
結合型フィルタによる「対称 3 線方式」

#### 4. J-PARC/MR 主電磁石電源

筆者には、HIMAC の建設に当たって、四極電磁石の対称化については少しばかり苦い思い出がある。それを説明するため、2008 年末に行なわれた、J-PARC/MR での負荷と配線の対称化のうち、四極電磁石の対称化の紹介から始めたい。図 8 は、対称化前の通常結線と、対称化後の結線を表わしている<sup>16,17,18)</sup>。対称化後は、四極電磁石の N 極と N 極、及び、S 極と S 極とがつながれ、隣の四極電磁石へと結線され、ノーマルモード電磁石になる。即ち、図中にも示されているが、 $B \propto I + J$  が成立する。なお、この図では描き込まれていないが、鉄芯は 3 番目の配線でつながれており、各コイルには抵抗が架橋されている。

対称化前と対称化後の電流偏差の周波数スペクトルが示されているが、コモンモード成分が磁場に現われなくなった。この測定データは驚くべきものである。電源には中点がないので対称化されておらず、コモンモードフィルタを設けることが出来ない。従って、

コモンモードノイズそのものは発生しており、それにも拘らず、磁場にはコモンモードノイズが現れない。それは、コモンモードとノーマルモードの結合がほどける一方で、四極電磁石を対称化したので、磁場はノーマルモード電流のみで  $B \propto I + J$  と定まり、コモンモードは磁場に影響を与えないからである。この測定データから分かることは、負荷と配線の対称化により、ノーマルモードとコモンモードの結合がほどけたということである。

なお、図8の測定データは、今なお、世界的にも唯一の測定データであり、「対称3線方式」が普及しつつある今となつては、こうした現象はもはや観測されることがなく、貴重な測定データである。

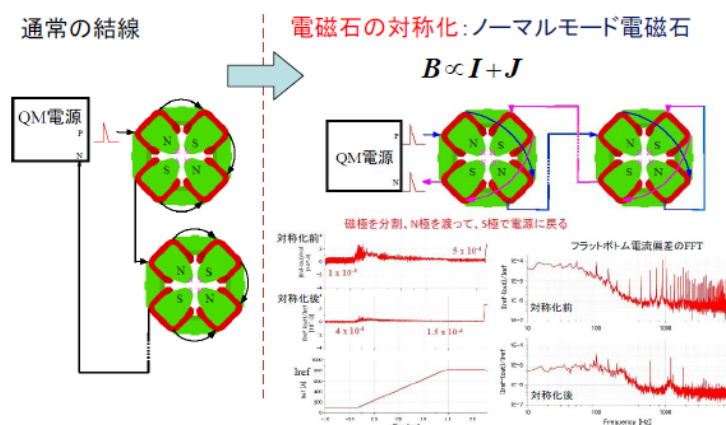


図8 :  
J-PARC/MR 四極電磁石の対称化とノイズの削減（対称化の前と後での、今なお世界的にも唯一の貴重な測定データ）16,17,18)。ただし、この図では鉄芯をつなぐ中線と架橋抵抗が示されていない。

さて、HIMACでの筆者の少しばかり苦い思い出とは、この配置に出来なかったことである。メーカーとの打ち合わせにおいて、上半分のN極とS極とをつなぎ、下半分のS極とN極とをつなぐことを承認した後になって、四極電磁石の対称化を思い付いた。そこで、変更を申し入れたが、既に製作中で費用が必要との回答があり、対称化を断念した。なお、この対称化はJ-PARC/MRに先立って、兵庫県立粒子線医療センターで採用されている。

この四極電磁石に負けないほど驚くべきことが、J-PARC/MRの偏向電磁石電源で起こった16,17,18)。そうは言っても、電源の直接の担当者ではないので回路の詳細を知らないが、想像するに、元々は図9のようになっていたのではないかと思います。MR主電磁石電源は6台からなり、リング一周の電磁石を6つのブロックに分けたとき、6台の電源は直列につながれていた。ただし、電磁石の鉄芯は図6で言う中線に匹敵する配線でつながれていた。なお、6つのブロックを全て描くとゴチャゴチャするので、図9では、2台の電源と2つのブロックを描いてある。なお、電源そのものには中点がなく、対称化されていなかった。

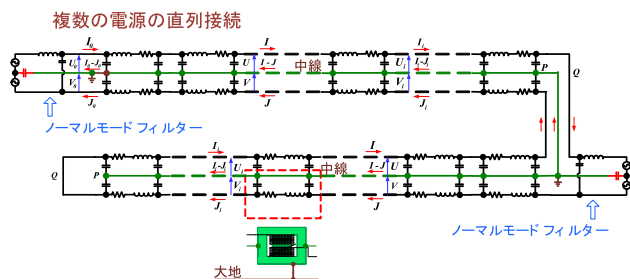


図9 :  
J-PARC/MRの当初の配置（佐藤の想像による）で、既に、鉄芯は配線でつながれていた



これに対して、図 10 は、電磁石と配線を対称化した後の回路図である。対称化すると、もはや、電源を直列につなぐことが出来ないので、6 台の電源を分散させ独立に運転しなければならない。ビームがリングを一周することを思えば、分散させ独立に運転する電源

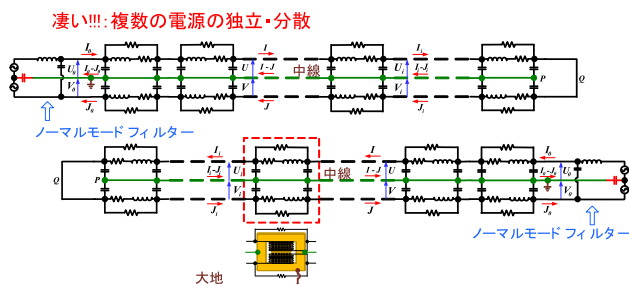


図 10 :  
J-PARC/MR の負荷と配線の対称化。その結果、複数の電源は独立・分散されている。

全てを同期させて運転する必要があるだけに、大いなる決断であったに違いない。ただただ頼りにするのは、電源で発生するノイズが削減され、DCCT やその他の制御回路あるいは弱電回路にノイズが混入することがないので、測定精度が高まると言うことであった。

この対称化でも負荷と配線が対称化されただけであるので、コモンモードノイズが削減出来ている訳ではない。しかし、図 8 の四極電磁石の対称化と同じく、コモンモードとノーマルモードとの結合がほどけ、磁場にはコモンモードノイズが影響しなかったのである。

負荷と配線の対称化工事が終了した 3 日後に、30GeV 加速と速いビーム取り出しに成功した。即ち、電源を分散させ独立に運転することは可能であることが判明した。

このような、複数の電源の分散と独立は国内では経験したことがない挑戦であったが、この成功により、シンクロトロンが幾ら巨大になっても大丈夫と言うことになった。シンクロトロンや衝突型の円形加速器にとっては、さらなる巨大化に向けての朗報である。

## 5. 土岐博・佐藤健次による新しい交流回路理論

土岐博さんは、「電位係数は凄い!!!」と言うことと、「遅延ポテンシャルの交流複素数表示は凄い!!!」と言うことを発見して、百年強続いて来た交流回路理論を新しく塗り替えてしまった。そこに至るまでの筆者なりの取り組みの紹介から話を始める。

しかし、その前に、行列に基づく、土岐博・佐藤健次共著論文を 1 つ紹介しておきたい。土岐さんは、配線が 3 本あるときの、コモンモードとノーマルモードの考え方に関心を持ち、それを理解するために、図 6 のように負荷が繰り返し回路のときではなく、負荷を単なる集中定数回路要素とする簡単な場合を行列で解いて、NIM 論文<sup>1)</sup>とした。配線が 3 本あるとき、ノイズにコモンモードとノーマルモードの 2 種類あることが理解し易いので、この論文を引用する人もある。

ところで、その昔、HIMAC の建設中、図 6 の HIMAC 電源での中線（緑色の配線）の仕様を工事業から尋ねられた。しかし、配線の理論が不明であったためどうすれば良いのか判然としなかったので、筆者の高周波に取り組んだ経験に基づいて、編素線を使用す

るようにと、適当に回答した。ただし、その編素線に対してコイルをつなぐ配線は等距離に設けるように指示した。その一方で、当時は、4行4列の行列で物を考えていたので、伝送線路の偏微分方程式に基づく回路理論には頭が回らなかった。しかし、図11のようなことを考え始めた。従来の2導体伝送線路に対して、図5に関連して、繰り返し回路では、インピーダンス整合が成立しているので、その極限は分布定数回路になり、3導体伝送線路の回路理論が構築出来ると考え始めた。くどいようであるが、インピーダンス整合は、通常の電気回路理論では、2導体伝送線路回路理論として学ぶので、図11の右側の回路図は、3導体伝送線路を表わすと思った。

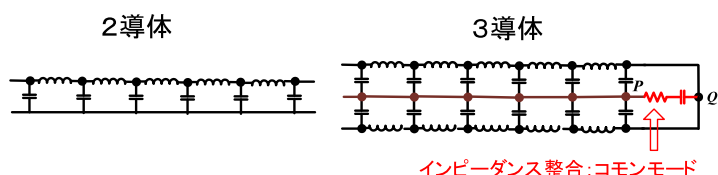


図 11 :

結果として拙かった伝送線路のモデル。コンデンサーは不適切な物理量である。

そこで、筆者なりに、静電容量係数と静電誘導係数、即ち、コンデンサーを用いて、3導体伝送線路の偏微分方程式に基づく回路理論を構築する取り組みを始めた。しかし、それがすんなりとは行かず、それもコンデンサーの取り扱いに混乱が生じて、たちまちのうちに、行き詰まった。そこで、問題を土岐博さんに投げ込んだ。土岐さんが何をどう考えたのかは筆者には分からない。とにかく問題を投げ込んでから2・3カ月後のことではないかと思うが、土岐さんは「電位係数は凄いい!!!」と言うことを発見した。コンデンサーに代えて電位係数を用いると、多導体伝送線路の偏微分方程式に基づく回路理論が素直に構築出来ると言う話である。これに基づいて、土岐博・佐藤健次共著 JPSJ 第1論文<sup>2)</sup>が出来上がった。従って、図11の、2導体と3導体の回路図は拙いということが判明した。

その後、土岐博・佐藤健次共著 JPSJ 第2論文<sup>5)</sup>が出来上がり、それこそ、正しい交流回路理論ではあるが、簡単のため、ここでは、JPSJ 第1論文での発見をざっくりと紹介しておきたい。電位係数は電位を電荷で展開したときの係数である。ちなみに、コンデンサーは電荷を電位で展開したときの係数で、ざっくりと言えば、電位係数とコンデンサーは逆数の関係にある。

このとき、電位とベクトルポテンシャルは、電位係数  $P_{ij}$  と誘導係数  $L_{ij}$  を用いて

$$\begin{aligned} V_i(x,t) &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{Q_j(x',t)}{|x-x'|} dx' = \sum_{j=1}^N P_{ij} Q_j(x,t) \\ A_i(x,t) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I_j(x',t)}{|x-x'|} dx' = \sum_{j=1}^N L_{ij} I_j(x,t) \end{aligned} \quad (5)$$

と与えられる。ただし、これらの式は、本稿では簡略化して示してあり、正確には、論文2,3,5,6)を参照して頂きたい。これらの電位係数と誘導係数とは導体の幾何学的な配置で一意的に定まる物理量であり、従って、重ね合わせの原理が成立するときの展開係数でもある。

結局、土岐さんの取り組みにより、3導体で、電磁波が放射されない場合には、図2で

定義した電圧と電流により、ノーマルモードは

$$\begin{aligned} V_n(x,t) &= U(x,t) + V(x,t) \\ I_n(x,t) &= \frac{1}{2} \{I(x,t) + J(x,t)\} \end{aligned} \quad (6)$$

と定義され、コモンモードは

$$\begin{aligned} V_c(x,t) &= \frac{1}{2} \{U(x,t) - V(x,t)\} \\ I_c(x,t) &= \frac{1}{2} \{I(x,t) - J(x,t)\} \end{aligned} \quad (7)$$

と定義され、(4)の行列で和と差で定義したのとは、係数が異なることが明らかにされた。そして、これらが満たす偏微分方程式は、配線が対称化されていないとき、一般的には、

$$\begin{cases} \frac{\partial V_n(x,t)}{\partial x} = -L_n \frac{\partial I_n(x,t)}{\partial t} - L_{nc} \frac{\partial I_c(x,t)}{\partial t} \\ \frac{\partial V_n(x,t)}{\partial t} = -P_n \frac{\partial I_n(x,t)}{\partial x} - P_{nc} \frac{\partial I_c(x,t)}{\partial x} \\ \frac{\partial V_c(x,t)}{\partial x} = -L_{cn} \frac{\partial I_n(x,t)}{\partial t} - L_c \frac{\partial I_c(x,t)}{\partial t} \\ \frac{\partial V_c(x,t)}{\partial t} = -P_{cn} \frac{\partial I_n(x,t)}{\partial x} - P_c \frac{\partial I_c(x,t)}{\partial x} \end{cases} \quad (8)$$

と与えられることが示された。この偏微分方程式の解を変換行列で表現すれば4行4列になるが、それが、集中定数回路の場合の(2)に対応することが判明した。

また、配線を対称化した場合には、

$$L_{nc} = L_{cn} = P_{nc} = P_{cn} = 0 \quad (9)$$

が成立し、ノーマルモードとコモンモードとは結合がほどけ、それぞれが独立した偏微分方程式

$$\begin{cases} \frac{\partial V_n(x,t)}{\partial x} = -L_n \frac{\partial I_n(x,t)}{\partial t} \\ \frac{\partial V_n(x,t)}{\partial t} = -P_n \frac{\partial I_n(x,t)}{\partial x} \\ \frac{\partial V_c(x,t)}{\partial x} = -L_c \frac{\partial I_c(x,t)}{\partial t} \\ \frac{\partial V_c(x,t)}{\partial t} = -P_c \frac{\partial I_c(x,t)}{\partial x} \end{cases} \quad (10)$$

を満たすことになる。これらの偏微分方程式のそれぞれの解を変換行列で表現すれば2行2列になり、集中定数回路の場合の(4)に対応することが判明した。ここで言う配線の対称化は、3番目の配線に対して、2本の主配線を同じ太さにして等距離に設けると言うことである。

ここで、一般的に、配線が対称化されていないときの、3導体の伝送線路の等価回路図を、図12に示す。ただし、この図に置いて、各配線に平行な2本線は、土岐博・佐藤健次により定義された、自己電位係数を表わす新しい回路記号である。

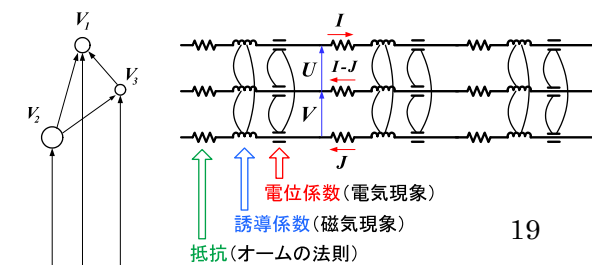


図12 :  
電磁波を放射しないときの3本の配

線の等価回路。ただし、各配線に平行な 2 本線は自己電位係数を表わす新しい回路記号である。

この回路理論が出来上がった途端、筆者は、放射ノイズの起源が解き明かされるのではないかと直感した。電磁波の放射は遅延ポテンシャルを用いて計算される。そこで、土岐さんに多導体伝送線路からの電磁波の放射の問題を投げ込んだところ、遅延ポテンシャルを交流の複素数で表示すれば良いことを発見した。これを筆者は、土岐さんが発見した「遅延ポテンシャルの交流複素数表示はすごい!!!」と呼んでおり、以下の通りである。

電位とベクトルポテンシャルの遅延ポテンシャルは、本稿では簡略化した形で示すが、以下の通り与えられる。なお、正確には、論文<sup>3,5,6)</sup>を参照して頂きたい。

$$\begin{aligned}
 V_i(x,t) &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{Q_j\left(x',t-\frac{1}{c}|x-x'|\right)}{|x-x'|} dx' \\
 &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{Q_j(x',t)\cos\left\{\frac{\omega}{c}|x-x'|\right\}}{|x-x'|} dx' + j \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{Q_j(x',t)\sin\left\{\frac{\omega}{c}|x-x'|\right\}}{|x-x'|} dx' \\
 &= \sum_{j=1}^N P_{ij}(\omega) Q_j(x,t) + \tilde{V}_i(x,t) \\
 A_i(x,t) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I_j\left(x',t-\frac{1}{c}|x-x'|\right)}{|x-x'|} dx' \\
 &= \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I_j(x',t)\cos\left\{\frac{\omega}{c}|x-x'|\right\}}{|x-x'|} dx' + j \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I_j(x',t)\sin\left\{\frac{\omega}{c}|x-x'|\right\}}{|x-x'|} dx' \\
 &= \sum_{j=1}^N L_{ij}(\omega) I_j(x,t) + \tilde{A}_i(x,t)
 \end{aligned} \tag{11}$$

これらの式のそれぞれの第 2 行目の第 1 項目は配線に沿って伝搬する電磁場を与え、それに対して、第 2 項の係数には純虚数  $j$  が現われるが、この項は、配線に沿って伝搬する電磁場エネルギーが失われる現象を表わすことを、土岐さんは発見した。即ち、電磁波の放射現象を意味している。ただし、交流に対する電位係数  $P_{ij}(\omega)$  と誘導係数  $L_{ij}(\omega)$  は、(5)

と(6)とは違って、交流の周波数に応じて変化することには要注意である。

結局、3 導体の場合には、ノーマルモードは

$$\begin{aligned}
 V_n(x,t) &= V_1(x,t) - V_2(x,t) \\
 I_n(x,t) &= \frac{1}{2} \{I_1(x,t) - I_2(x,t)\}
 \end{aligned} \tag{12}$$

と定義され、コモンモードは

$$\begin{aligned}
 V_c(x,t) &= \frac{1}{2} \{V_1(x,t) + V_2(x,t)\} - V_3(x,t) \\
 I_c(x,t) &= \frac{1}{2} \{I_1(x,t) + I_2(x,t) - I_3(x,t)\}
 \end{aligned} \tag{13}$$

と定義され、アンテナモードは

$$V_a(x,t) = \frac{1}{2} \{V_1(x,t) + V_2(x,t)\} + V_3(x,t) \quad (14)$$

$$I_a(x,t) = \frac{1}{2} \{I_1(x,t) + I_2(x,t) + I_3(x,t)\}$$

と定義される。

これらの式から、驚くべきことが判明した。アンテナモードに対する(14)の定義によれば、3導体の電位の和で与えられており、電位の差（電圧）では定義されていない。従って、無限遠方でゼロとした基準に対する、3導体の電位が、交流で時間的に振動しており、それが電磁波の放射現象を表わしていることになる。これらを3導体伝送線路の等価回路で表わすと、図13となる。このようなアンテナモードの電位を定義したのは、土岐・佐藤が世界で最初ではないかと思う。マクスウェルが著わした1873年の電磁気学の参考書では、電位差である電圧しか登場しないので、マクスウェルは光の電磁波説を提唱したものの、交流回路から電磁波の放射が起こるとは考えていなかったことになるであろう。

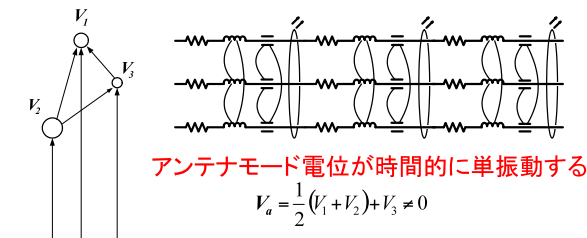


図13 :  
新しい交流回路理論による3導体伝送線路が電磁波を放射するときの等価回路

なお、3本の配線が対称化されていない場合には、ノーマルモードとコモンモード及びアンテナモードの3つのモードは結合し、3本の配線が対称化されている場合には、コモンモードとアンテナモードとは結合するものの、しかし、ノーマルモードは分離して独立することが示される。ここでも、配線の対称化はノイズ削減には必須であることが明らかにされた。

今少し、アンテナモードとは何かについて、図14のように、1本の導体の等価回路で説明しておきたい。この回路はこれまでにない特徴がある。1本の配線に、磁気現象を表わす自己インダクタンスと、電気現象を表わす自己電位係数と、オームの法則による抵抗とが直列につながっている。1本の配線であっても、磁気現象と電気現象とが同時に発生し、マクスウェル方程式が磁気と電気に対して対称で双対性を満たしていることに対応している。電気現象が1本の配線でも発生するので、電位を定義出来る。そして、電磁波を放射する。これは、土岐さんが発見した「電位係数は凄い!!!」と言うことと「遅延ポテンシャルの交流複素数表示は凄い!!!」と言うことに基づくものである。従来の伝送線路の回路理論では、2本の配線の間のコンデンサーを定義することで初めて電気現象が語られていたが、それとは大いに異なる。こう考えると、コンデンサーは不適切な物理量であり、電位係数こそ適切な物理量であることが理解出来る。

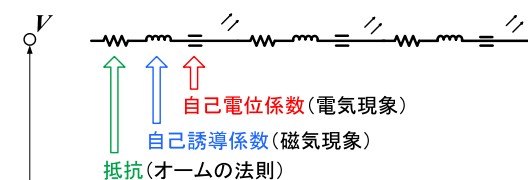


図14 :

無限遠方での電位をゼロ

1 本の導体での電磁場の伝搬と電磁波の放射はの同時に発生し、従って、共存する

くどのようなであるが、1本の配線であっても、磁気と電気の双対性が成立し、磁気現象と電気現象が同時に発生することを、電場と磁場で示しておこう。図15に示すように、導体の内部と外部のいずれの境界においても、電磁場の伝搬と電磁場の放射の電場と磁場とが存在するが、同時に発生することからして、これらの電場と磁場を合成したものが、我々が観測する電場と磁場になると考えられる。

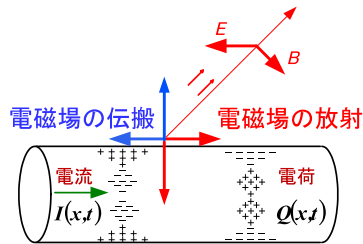


図 15 :

導体の内部と外部の境界での、電磁場の伝搬と電磁場の放射の電場と磁場を合成したものが、我々が観測する電場と磁場になる

## 6. まとめに代えて：新しい電磁気学の到来の予感

土岐さんが発見した、「電位係数は凄い!!!」と言うことと「遅延ポテンシャルの交流複素数表示は凄い!!!」と言うことは、新しい電磁気学の到来を予感させるものである。

まず、電位係数が適切な物理量で、コンデンサーは不適切な物理量と言うことになる。これまで、変位電流はコンデンサーを流れると考えられて来たのであるから、変位電流も不適切な物理量になる。通常電磁気学では、変位電流を含めてキルヒホフの第1法則（電流則）が成立するとされているから、変位電流が不適切な物理量となると、キルヒホフの第1法則（電流則）の適用にも限界が生じる。

また、配線に沿って電磁場の伝搬と電磁波の放射とが同時に発生するので、両者の電磁場が共存することになる。従来の電磁気学の教科書や参考書では伝搬のみを取り扱って来ているので、それを修正する必要がある、その一方で、アンテナ理論の教科書や参考書では電磁波の放射のみを取り扱っており、これまた、修正する必要がある。

しかし、第2章の最後に述べたことの繰り返しになるが、土岐・佐藤 JPSJ 第2論文で示したように、マクスウェル方程式は正しく、真電荷と伝導電流に対する連続の方程式も正しく、導体表面での境界条件の式、及び、オームの法則も成立しているとするので、この限りでは、従来の電磁気学は正しく、その見直しを、「新しい電磁気学の到来の予感」と言うには言葉が過ぎるかも知れない。しかし、従来の電磁気学の参考書や教科書が、電磁場の伝搬のみを取り扱い、コンデンサーを適切な物理量としている点については見直す必要があると思える。その観点で、本稿で紹介した新しい交流回路理論を包含する、新しい電磁気学の到来が予感される次第である。

## 謝辞

杉本健三先生に、土岐博・佐藤健次による新しい交流回路理論をお話しすると、「コノナニワ……」とおっしゃりながら、身を乗り出して、喜んで、聴いて頂けたに違いない。そ

の機会が得られことなく、お亡くなりになられた。この上なく、悔しく、また、残念です。

また、杉本記念シンポジウムでの講演と本稿執筆の機会を与えて頂いたことに、世話人の方々に、心から感謝します。

本稿で紹介した、幸運な「巡り合わせ」の連鎖からして、本当に、数多くの人に感謝申し上げなければならない。ここでは、その中から4人の方々に、感謝申し上げておきたい。

もちろん最初は、平尾泰男先生である。先生は HIMAC を2台のシンクロトロンにすることに熱い思いを持っておられ、その実現に取り組んだ筆者は少なからずストレスを感じた。しかし、2台のシンクロトロンであるがゆえに、シンクロトロンが1台だけのときには不要と思える、「クロック停止」と呼ぶ制御機能を設けておいた。現在、その機能は、設計当初の目的で使用されることはないものの、「100 秒の間に減速を 10 回行なって、三次元治療の深さ方向の照射野を形成する」ことに活かされている。それを実現した放医研 HIMAC の若い人たちの取り組みには深い感動を覚えます。世界に例を見ない減速方法により、筆者は、「HIMAC はがん治療装置として今なお世界一」と言っている。

本稿の主旨からして、松本啓先生に感謝申し上げます。先生の KEK12GeV・PS での電源のノイズ削減の多方面に亘る研究開発の多くを、HIMAC では借用させて頂いた。筆者は後にも先にもシンクロトロンの建設に携わったのは HIMAC のみであり、無知ゆえに大いなるご迷惑をお掛けしたが、「対称3線方式」が成功したのも先生のご指導の賜物である。

また、熊田雅之さんに感謝します。熊田さんは、筆者が、本稿の第3章の始まりから(4)辺りまで解明し、基本的な設計を終え発注した頃に、放医研に転任して来られ、現場での測定を含む実務の全てに取り組まれた。筆者は現場に出ることがなく、大いに助けられた。また、熊田さんは、(4)を具体的に計算し、その計算と測定データに基づいて、博士を授与された。

最後に、土岐博さんに感謝申し上げます。何はともあれ、ノイズの発生機構に関心を持ち、「電位係数は凄い!!!」と言うことと「遅延ポテンシャルの交流複素数表示は凄い!!!」と言うことを発見された。これにより、「対称3線方式」が単なる技術にとどまらず、新しい交流回路理論に加えて、電磁気学そのものの見直しを迫る切っ掛けとなり、2人しての共同研究を今も楽しませて貰っている。

## 参考文献

- 1) Kenji Sato and Hiroshi Toki, “ Synchrotron magnet power supply network with normal and common modes including noise filtering ”, Nucl. Instrum. Meth. A 565 (2006) 351-357.
- 2) Hiroshi Toki and Kenji Sato, “ Three Conductor Transmission Line Theory and Origin of Electromagnetic Radiation and Noise “, J. Phys. Soc. Jpn. 78 (2009) 094201
- 3) Hiroshi Toki and Kenji Sato, “ Electrodynamics of Multiconductor Transmission-Line Theory with Antenna Mode “, Chapter of 17 of Electromagnetic Wave Propagation



in Complex Matter, InTech – Open Access Publisher, 2011

- 4) 土岐博、佐藤健次、「加速器の電磁ノイズ問題と新しい回路理論」、物理科学雑誌「パリティ」、2011 年 09 月号、close-up、42-46 頁
- 5) Hiroshi Toki and Kenji Sato, “ Multiconductor Transmission-Line Theory with Electromagnetic Radiation “, J. Phys. Soc. Jpn. 81 (2012) 014201
- 6) 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、2013 VOL.68 No.1、『解説』、11-18 頁
- 7) 日本物理学会ホームページ、学会活動、論文賞・若手奨励賞、第 16 回論文賞受賞論文
- 8) E. Regenstreif, CERN59(29)(1959)154
- 9) 田邊徹美、渡邊伸一、私信、1989 年 9 月
- 10) 松本啓、末野毅、佐藤皓、私信、ただし、12GeV・PS の偏向電磁石の 1 台の自己インダクタンスとコンデンサーの測定は、筆者と東大核研の藤田宗孝さんの 2 人で行ない、特性インピーダンスの大きさを計算で定めた
- 11) M. Kumada et al., “THE HIMAC VERY LOW RIPPLE SYNCHROTRON - PARTII”, Proc. of 5<sup>th</sup> European Particle Accelerator Conf., Barcelona, Spain, 1996
- 12) M. Kumada et al., “HIGH PERFORMANCE ACTIVE FILTER FOR THE POWER SUPPLY OF THE HIMAC SYNCHROTRON MAGNET”, Proc. of 5<sup>th</sup> European Particle Accelerator Conf., Barcelona, Spain, 1996
- 13) 佐藤健次、「重イオン・シンクロトロン加速器技術と物理・その 1ー電源と電気回路としての電磁石負荷：コモン・モード・ノイズとの格闘ー」、日本加速器学会誌「加速器」、第 3 巻第 1 号、2006 年、10-23 頁
- 14) 佐藤健次、「交直変換器である電源の交流系統の新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」、第 4 巻第 4 号、2007 年、271-287 頁
- 15) 佐藤健次、「comal (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の類似と差異」、第 8 回加速器電源シンポジウム、2005 年
- 16) 吉岡正和、「J-PARC 加速器、特に MR コミッショニングに寄せて」、高エネルギーニュース、Vol.28 No.1 (2009)26-34.
- 17) 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)214-221.
- 18) H. Kobayashi, “BEAM COMMISSIONING OF THE J-PARC MAIN RING”, Proceedings of PAC09, Vancouver, BC., Canada, (2009)1823-1827.
- 19) 小関国夫他、「J-PARC MR 「新」 電源の開発」、J-PARC/MR 主電磁石電源レビュー委員会、2012 年 10 月 2 日（筆者注：「新」電源は NPC(Neutral Point Clamped)チョップアップ方式である）
- 20) 中村衆他、「副変換器を持つ対称化電源の開発」、J-PARC/MR 主電磁石電源レビュー委員会、2012 年 10 月 2 日