

地球温暖化の原因は大地を流れる人工の電磁ノイズのコモンモード電流である - 大地の発熱で地中の水が気化されたときの大気中の水蒸気による温室効果 -

COMMON-MODE CURRENT OF MAN-MADE ELECTROMAGNETIC NOISE ON EARTH'S SURFACE CAUSES GLOBAL WARMING: GREENHOUSE EFFECT OF ARTIFICIAL CONSTANT INCREASE OF WATER VAPOR IN THE ATMOSPHERE

佐藤健次[#]

Kenji Sato[#]

National Institute of Radiological Sciences

Abstract

After accumulating data on actual global temperature, I have come to notice that temperature increases suddenly occurred twice: at around 1910, then again around 1980. Interestingly, at around 1910 AC electricity use spread rapidly in industry, railways, and homes due to the use of large-scale hydroelectric AC power generation and long-distance high-voltage overhead transmission lines. Synchronism indicates that electricity was one of the causes of increasing global warming. It is demonstrated from both of a new circuit theory and supporting evidence that electromagnetic common-mode noise of the wave type propagates in the ground as an electric current, which is equivalently calculated by observed strength of magnetic field at the Earth's surface under overhead transmission lines. An inclusive amount of global Joule heating due to the ground current takes account of the total amount of electric power generation in the world. Water in the ground is vaporized by the Joule heating, and is converted to water vapor. Artificial continuous increase of water vapor in the atmosphere has enhanced global warming due to the greenhouse effect. In around 1980, after the oil crises, useful power inverters to energy saving became available. The frequency of noise increased from commercial cycles (50Hz or 60Hz) to higher ones (5kHz or more), and thus increases of Joule heating due to stronger skin effect are continuing to contribute to the production of global warming. Quantitative calculations concerning this process show a temperature increase that is near to observations.

1. はじめに

産業革命は、十八世紀後期に、化石燃料である石炭の燃焼を利用した、ワットによる蒸気機関の発明により、著しく発展した。しかし、その後、スモッグが多発し、百年強経った二十世紀初頭には、大気汚染を始めとする環境問題が深刻になり、伝染病や呼吸器疾患が蔓延し、多数の死者が発生した。その一方、十九世紀後期に、テスラにより交流電動機や交流発電機が発明され、石炭と異なる、新エネルギー源として、電気が登場した。二十世紀初頭には、大容量の水力発電や長距離高圧送電線さらには変電所や配電の運用が始まり、産業や鉄道及び家庭で、人類は交流電気の本格的な利用を始めた。

そんな二十世紀の初頭に、地球の表面近くの世界平均気温が上昇していることに気付かれた。しかし、上に述べたように、人類のエネルギー利用の歴史をまとめてみると、気温上昇の原因には、化石燃料の燃焼と電気の利用の2つが考えられる。この場合、化石燃料の燃焼が原因であれば、十八世紀後期から二十世紀初頭までの百年強の間に、徐々に気温は上昇してははずである。これに対して、電気の利用が原因であれば、二十世紀初頭に、突然気温が上昇したはずであろう。

二十世紀初頭に地球温暖化が起きていることを論証したのは、蒸気機関技師のカレンダーで、1938年のことである[1]。彼の論文では、1885年から1935年までの

50年間の世界各地の200か所の測候所で観測された気温を収集・分析して、平均気温が上昇していることを示した。それと同時に、化石燃料の燃焼で発生する二酸化炭素が大気中で増加したことが、気温上昇の原因であることを論じた。

ところで、彼の論文に示されているデータを素直に眺めると、データの多くでは、1910年以前の25年間では気温上昇は小さく、1910年以降の25年間では気温上昇が大きいことが分かる。また、彼自身も、海洋や大陸の地域によっては、1910年頃を境にして、気温が明白に(distinctly)上昇していることを述べている。

筆者は、カレンダーの論文により、気温は1910年頃突然上昇したことに気付いたので、その原因は電気の利用であると考え、本稿では、その物理を明らかにする。そうは言っても、現在でも、電気は安全で清潔にして便利とされており、これまで、電気の利用が環境を直接汚染するとは誰一人として考えたことがない。それだけに、その物理現象は自明ではないので、それそのものから解明しなければならず、その上、定量性も必要とされるので、話は簡単ではない。ここでは、エイツとばかりに、人工の電磁ノイズが原因である、と一言で断っておきたい。

本稿では、人工の電磁ノイズが原因で地球温暖化が起る事情を定量的に展開するが、そもそも電磁ノイズの発生機構も削減方法もほとんど知られておらず、少数の加速器物理学者が知るのみであるので、読者の多くには、「風が吹けば桶屋が儲かる」にも似た話を聞いて頂く

[#] satokumikeng@gmail.com

ことになる。しかし、本稿は定量性を有することが自慢の一つであることを、今一度、断っておきたい。

交流を利用する通常の電気回路においては、人工の電磁ノイズのコモンモード成分が大地を流れると言う物理現象が不可避的に発生する。コモンモードノイズと言う言葉は特に新しいものではないが、不思議なことに、言葉はあるのに、数年前まで、その何たるかを語る正しい回路理論がなかった。そのため、電磁ノイズとは何かと言うことさえ、電気に関わる工学者や技術者のほとんどの人にとっては、判然としていないのが現状である。判然としていないのであるから、地球温暖化の原因になることなど、誰一人、思いも及ばない。

大地を伝搬するコモンモードノイズの波動を大地電流と呼ぶことにする。波動であるから、当然、交流である。この大地電流により、大地がジュール熱で発熱する。その発熱で地中の水が気化され、その結果、大気中の水蒸気量が増加する。ただし、本稿では、簡単のため、ジュール熱の全てが地中の水を気化するとし、ジュール熱は大地の温度を直接上昇させることはないと仮定する。この水蒸気の増加で、大気の温室効果が促進されて、気温が上昇する。水蒸気は温室効果気体であり、ジュール熱が時間的に一定であっても、大気中の水蒸気量が増加するので、気温は時間と共に上昇することになる。

なお、電磁ノイズは交流であるから、表皮効果が起こる。その周波数が高ければ高いほど、表皮の厚さが薄くなり、ジュール熱が大きくなる。交流電気の利用は、先にも述べたように 1910 年頃始まったが、商用周波数は 50Hz や 60Hz の ELF (極超長波:0.03~300Hz) であった。この交流を整流して直流が得られていたが、1958 年に、SCR が実用化され、スイッチング (回路の開閉) 方式で、交流を直流に変換するコンバータ (交直変換器) が広く普及するようになった。このスイッチングにより、スイッチング周波数での電磁ノイズが発生するが、そのときの過渡現象として、減衰振動が発生し、それもまた、電磁ノイズとなっている。減衰振動の周波数は数 kHz の VLF (超長波:3kHz~30kHz) であり、これが、ELF のスイッチング周波数 (商用周波数) の電磁ノイズに付け加わる。

ところが、1973 年と 1979 年の二度にわたる石油危機 (オイルショック) の後、電磁ノイズの様相が激変した。石油危機に直面したことによって、省エネルギーの取り組みが始まり、省電力技術の開発が急がれた。当時、直流電動機を制御するに当たって、抵抗が多用されており、ジュール熱による発熱が大きかった。この発熱を減らすための省電力技術開発の優先課題は、直流を交流に変換するインバータ (直交変換器) を実用化することであった。そのため、スイッチング素子として、従来の SCR に加えて、GTO や IGBT さらには Power MOSFET が開発され、1980 年頃以降、インバータが実用化され、直交変換後の交流の周波数や振幅を自在に操ることが可能になった。交流電動機の制御においては、抵抗を使用しなくても良くなったので、発熱が大幅に減り、省電力への道が開かれた。

コンバータとインバータを順に組み合わせると、交流から交流への変換が可能であり、周波数や振幅を制御できる。インバータとコンバータを順に組み合わせると、

直流から直流への変換が可能であり、抵抗を利用しなくても、電圧を制御できる。このように、コンバータとインバータを組み合わせると何でもできる時代を迎えたが、その一方で、困ったことに、電磁ノイズが多発するようになった。コンバータでもインバータでも、スイッチングを利用するので、商用周波数の電磁ノイズに加えて、スイッチング周波数の電磁ノイズ、さらには、過渡現象の減衰振動の電磁ノイズが、同時に発生する。

筆者の知る限りでは、減衰振動の周波数はスイッチング周波数の 100 倍程度である。例えば、IGBT の場合には、商用周波数は 50Hz や 60Hz の ELF で、スイッチング周波数は可聴周波数の 10kHz 程度の VLF で、減衰振動の周波数は中波ラジオ波の 1MHz 程度の MF (中波:300kHz~30MHz) である。こんな複雑な構造を持つ電磁ノイズの何たるかを知る人が少ないため、誰一人として、電磁ノイズを削減できる電気回路の開発に挑戦することなく、従来方式の電気回路を使い続けていると言える。そのため、1980 年頃以降、インバータが普及した結果、電磁ノイズの周波数が高くなり、電磁ノイズは我が物顔で闊歩することになった。この歴史からして、1910 年頃と 1980 年頃の二度にわたり、気温が突然上昇したと考えられる。

筆者は、放医研 HIMAC のシンクロトロン電磁石電源で「対称 3 線(S3L)回路」を考案し、コモンモードノイズとノーマルモードノイズを従来方式の電気回路の数百分の一まで減らすことができた。この S3L 回路は従来方式より優れていることは、土岐博さんが構築した新しい回路理論で説明できる。さらに、最近のことであるが、ノイズが数百分の一になったので、電気回路における発熱は百万分の一近くになることに、筆者は気付いた。「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」と言える。

読者の中には、直流は電磁ノイズを発生しないと考え、直流を使用すれば地球温暖化が起こらないと考える人があるかも知れない。しかし、直流を直流のまま、発電したり、送電したり、変電したり、配電したりして、産業や鉄道及び家庭で利用することは簡単ではない。必ず、交流を経由して、直流を制御する必要があり、交直や直交の変換に際して、電磁ノイズが発生するので、そうは問屋が卸さないことを断っておきたい。しかも、現在使用されている、従来方式の電気回路では、大地に電流が流れて、コモンモードノイズとなっていることを避けることができない。これより、直流であれば地球温暖化は起こらないことにはならない。

ところで、カレンダーの二酸化炭素原因説は、温室効果ガスが二酸化炭素であると言う、IPCC の考えそのものかと言うと、そうでもないらしい。IPCC の解説を斜めに読むと、その後、カレンダーの名前が登場しなくなり、まるで、忘れ去られているかのようである。「歴史教科書ではどんな問題も解決済みで、まるで、過去と現在とが繋がっていないかのように記述される」と皮肉られることがあるが、お気の毒に思うしかない。言い換えれば、気温上昇の原因は二酸化炭素であると言うカレンダーの単純な考えは否定されているらしい。それと言うのも、大気中の二酸化炭素が、1958 年以降、ハワイのマウナロア観測所で、

連続的に測定されるようになり、年を追って、二酸化炭素は単調に増加していることが判明したからである。しかし、この単調増加に対して、この1958年を挟んで、気温上昇は、1946年以降、1980年頃まで、停止するか、寒冷化したので、カレンダーの考えでは矛盾を来し、彼はやがて無視されるようになったようである。1958年と言えば、SCRが発明された年であり、気温は上昇することなく、寒冷化のど真ん中であつたとは、歴史の皮肉かも知れない。

しかし、その寒冷化の事実を前にして、1980年頃に、インバータが普及し始めたこととは無関係に、二酸化炭素の増加が原因で、いずれは地球温暖化が起こると言う考えを主張する人たちがいた。実際、1980年頃、突然、気温が上昇し、さらに、1988年に北アメリカで大干ばつが起こった。予言通りであつたかして、この年、IPCCが発足し、その原因は化石燃料の燃焼であるとされた。しかし、カレンダーが言う二酸化炭素原因説の再来ではなく、正負のフィードバックを考慮した、大型コンピューターによるシミュレーション計算が主役になっており、地球温暖化が新たに発見されたと言っているかのようである。この観点からすると、1946年頃から1980年頃までの寒冷化は、化石燃料の燃焼の抑制を不要としたので、現在声高に叫ばれる地球温暖化対策に遅れを生じさせたことになり、この寒冷化は不幸な出来事であつたと言ふことになる。

2014年のIPCC第5次評価報告書[2]に示されている、「観測された世界平均地上気温(陸域+海上)の偏差(1850~2012年)」の図によれば、気温は1885年から2015年までの130年間で 0.85°C 上昇したとされる。一年当たり 0.0065°C の気温上昇である。しかし、その細部を眺めると、1910年頃他に、1980年頃の、二度、気温は突然上昇している。この気温上昇は電気の利用と関係していることは、本稿で、既に紹介済みである。しかし、電気の利用だけでは、気温は一方的に上昇し続けることになるので、1946年頃から1980年頃までの地球寒冷化は、説明できない。しかし、筆者の実力では、実際に起こった寒冷化の原因を特定することはできない。

さて、電気の利用で地球温暖化が起こると言う、筆者の筋書きを耳にするなり、首を横に振って、賛成できないとする人は多い。太陽光は $240\text{W}/\text{m}^2$ 程度のエネルギーを地表面に与えている。地球はこのエネルギーを受け取って、黒体放射すると、地表面の温度は -18°C と計算できる。ところが、地球の大気による温室効果を取り入れると、温度は 22°C と計算でき、 40°C 上昇するとされる。それにしても、温室効果はなかなか凄いな物理現象である。

ここで、電気の利用を考慮しよう。2011年の時点で、人類が使用している総電力は $2.52 \times 10^{12}\text{W}$ であり、地球の表面積は $5.1 \times 10^{14}\text{m}^2$ であるから、単位地表面積当たりの電力は $0.0049\text{W}/\text{m}^2$ 程度である。これを、 $240\text{W}/\text{m}^2$ と比較すれば、5桁ほど小さい。この5桁ほど小さい電力が太陽光に加わつたとして、 40°C 上昇させる温室効果を考慮すると、温度上昇は 0.00082°C 程度である。この値は、先の 0.0065°C の13%程度であり、悪くない値に思える。しかし、実際には、その考えは大間違いである。ここでの計算は熱平衡状態に対するもので、総電力が一定の場合には、 0.00082°C 上昇した気温が、そのまま、永遠に続くと言う定常状態を示しているに過ぎない。言い換

えれば、この計算の限りでは、電気の利用では地球温暖化は起こらないことになる。多くの人が首を縦に振らないのももっともな話である。

これに対して、先にも述べたように、大地電流によるジュール熱で地中の水が気化され、大気中の水蒸気が増加し、温室効果が促進されて、地球温暖化が起こるとなると、話は全く異なって来る。大地電流のジュール熱は総発電量の7.5%と計算できる。架空送電線による送電損失は配線のジュール熱で発生するが、送電量の5%程度である。架空送電線で5%であり、大地中で7.5%と言うことで、ほぼ等量であり、何となく、もっともらしい。大地でのジュール熱は $0.00037\text{W}/\text{m}^2$ となるが、この発熱で、地中の水が気化され、大気中の水蒸気が増加する。そう言うものの、増加量はわずかである。しかし、ここから先の物理が、温室効果に負けず劣らず、なかなか凄いな。大気中の水蒸気量と大気の温度の関係は、比例関係ではなく、ボルツマン因子で定まり、非線形関係になるので、温室効果を促進する。この計算の結果、気温上昇は、不思議なことに、先に求めた 0.00082°C に近い、 0.00094°C になる。ただし、これは水蒸気の増加による温室効果の計算であるので、毎年、総発電量が一定でジュール熱が一定であっても、気温は上昇を続け、先のデータの 0.0065°C の14%になり、実際に再現できたと考える。

以上のように、大気の温室効果は気温を支配する物理として凄いなものであることに負けず劣らず、電気の利用に伴って発生する大気中の水蒸気の増加で気温が上昇するのは、ボルツマン因子と言う物理も凄いなものであることが判明した。長々と、しかも、だらだらと書き連ねて来たので、もっともらしい話にはなっているが、大地電流やそれに伴うジュール熱の大きさをどのようにして知るのかについては、全く触れて来なかった。大地は広がりを持っているので、そもそも、大地を流れる電流を全て計測できそうにない。物理学は測定できなければならないとされているので、これでは物理学に反する。しかし、幸いなことに、直接ではないが、間接的に大地電流を知ることができる。1979年のことであるが、高圧送電線の周辺では小児白血病が多いと言う疫学的な調査結果が報告され、その原因は交流磁場であることが論証された。この交流磁場の大きさから大地電流を計算することができる。

後は、章を改めて、参考文献を引用しながら、大地電流を既存の理論や現象から計算できることを示しておこう。言い換えれば、ここまでの話では明らかにしなかったことの概略を記しておきたい。第2章では、コモンモードノイズの新しい回路理論を述べ、コモンモードノイズが確かに発生している現象として、例えば、CERNのLEPの偏向電磁石の磁場が電車の発着で乱された例を紹介する。第3章では、高圧送電線の直下で測定されている交流磁場の強さから、等価回路により大地電流を計算できることを示し、表皮効果を考慮して、ジュール熱を計算する数式をまとめる。第4章では、1910年頃と1920年頃に突然気温が上昇した理由として、電気の世界を振り返っておく。第5章では、大地電流の大きさを計算し、表皮効果を計算してやる。そして、気温上昇を計算してやる。第6章では結論を述べる。

2. コモンモードノイズの新しい回路理論と、 コモンモードノイズが実在することの傍証

2.1 「一般の 3 線回路」、及び、ノイズが少ない「対称 3 線(S3L)回路」とコモンモードノイズ

抵抗性導体の配線が多数あるときの、多導体伝送線路の新しい回路理論が、土岐博と著者(佐藤健次)の両名により、数年前に、完成した[3]。この理論では、各配線は自己電位係数と自己誘導係数と抵抗の直列回路になっており、これらの自己係数のそれぞれは、他の配線の自己係数のそれぞれと、相互電位係数と相互誘導係数で相互作用する。従来の回路理論と異なるのは、静電容量係数が登場しないことにある。静電容量係数は、配線の数が増えると、その値が増えるので、多導体の伝送線路の回路理論には不適切な物理量になっている。

配線の本数が何本であっても、原理的には、配線の間を伝搬する電磁波を解くための、連立積分微分方程式が得られた。この方程式で、配線の内部を伝搬する電荷や電流の振る舞いを、原理的には、解くこともできる。

本稿では、配線の本数が 3 本のときの実用的な回路に絞って検討する。3 本の配線はいずれも抵抗性導体とし、Figure 1 のように 3 本の配線の幾何学的な形状と配置が一般的な場合と、Figure 2 のように 2 本の主配線の断面形状が同じで、3 番目の配線から等距離に設けられている「対称 3 線(S3L)回路」の場合とする。

ここで、Figure 1 の回路の 2 本の主配線(#1,#2)だけのものを従来の回路と考えており、また、電源は主配線に対するもの 1 台のみと考えている。新しい回路理論では、従来の回路の 2 本の主配線(#1,#2)に加えて、勝手に、大地が 3 番目の配線(#3)になっているとする。このとき、大地は、他の配線と同じく、抵抗の他に、自己電位係数や自己誘導係数を持つので、グランドプレーンと呼ぶような電位の基準になることはない。繰り返しになってくどいが、Figure 1 は新しい回路理論に基づく回路図である。

Figure 2 の S3L 回路では、3 番目の配線(#3)は大地とは別途設ける。しかし、この回路配置の特殊性から電磁ノイズを大幅に削減することができ、かつ、大地は無視できる存在になる。この場合、電源は 2 台と考えている。HIMAC シンクロトロン[4]や J-PARC/MR シンクロトロン[5]では S3L 回路を採用し、電流の電磁ノイズの大きさは、従来方式の電源の数百分の一となり、数 ppm である。

前章では、「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」ことを述べたが、新しい回路理論が完成したとは言うものの連立積分微分方程式を得ただけで、誰が見ても簡単に理解できる解が得られた訳ではない。解が判然としないので、却って整理が付かず、複雑な説明で、混乱を招いているようであるが、その辺りの事情は、「わかってきた B787 型機バッテリー発熱の謎」と題した解説[6]に詳しい。

以下では、Figure 1 の従来の回路では、コモンモードノイズが大地(#3)を流れることに焦点を定めて、話を進める。Figure 1 と Figure 2 の図面のように番号を付けた電流を用いて、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を、それぞれ順に、定義しよう。

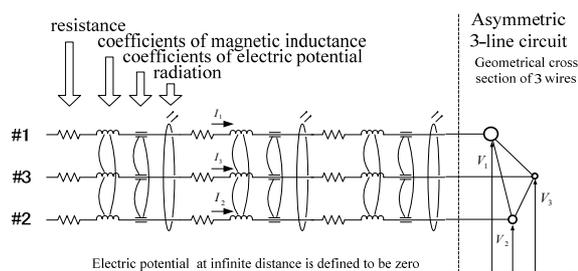


Figure 1: Equivalent circuit model of three-conductor transmission lines with an asymmetric cross-sectional configuration of 3 wires. Each wire has its own resistance, coefficient of self-inductance, and coefficient of self-electric potential. Wires interact with each other with coefficient of mutual-inductance and coefficient of mutual-potential. Electric potential is defined to be zero at infinity.

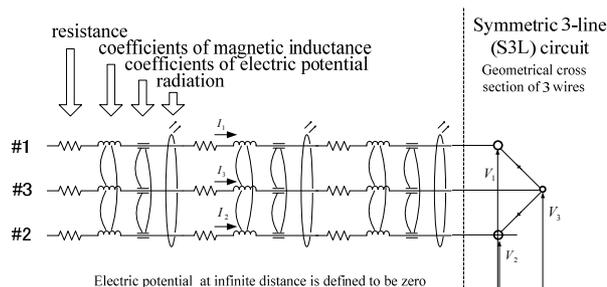


Figure 2: Equivalent model of a symmetric three-line (S3L) circuit with symmetric cross-sectional configuration of 3 wires. The S3L circuit is featured by a configuration in which the #1 and #2 conductors have the same thickness and are equidistant from the #3 conductor.

$$I_n = \frac{1}{2}(I_1 - I_2) \quad (2.1.1)$$

$$I_c = \frac{1}{2}(I_1 + I_2 - I_3) \quad (2.1.2)$$

$$I_a = I_1 + I_2 + I_3 \quad (2.1.3)$$

本稿では、簡単のため、回路から電波が放射されないとして、

$$I_a = 0 \quad (2.1.4)$$

が成立するとする。このとき、3番目の配線を通る電流は、コモンモードノイズの符号を反転したものと一致する。

$$-I_3 = I_c = I_1 + I_2 \quad (2.1.5)$$

ただ、この式で、最左辺が最右辺に等しいことだけを見て、1 番目の配線(#1)と 2 番目の配線(#2)を通る電流の差が 3 番目の配線(#3)を通ると単純に解釈する

と、2本の主配線だけの従来の回路において、電流が漏れ出す現象と誤解され、実際、3番目の配線が大地である場合、漏れ電流と呼ばれてしまった。新しい回路理論では、この式の中央にコモンモードノイズが登場し、漏れ電流と呼ばれるものではないことを断っておきたい。

2.2 コモンモードノイズが実在することの傍証:ジュネーブ駅を高速電車が発着するときに発生した CERN の LEP での奇妙な磁場変動

CERN の LEP は e^+e^- の衝突型加速器で、1989年に運転が開始された。その運転当初から、偏向電磁石の磁場の奇妙な変動に悩まされていた。その変動は日中に起こり、安定しているときには磁場変動は 20ppm 以下であるものの、磁場変動が起こると、奇妙なことに、200ppm 程度ずれてしまい、ときには、元に戻らないこともあった。

1995年のことであるが、高速電車がジュネーブ駅を発着するとき、磁場変動が起こることに気付かれた。それに気付いたのはスイス国鉄の技術者で、彼は、レールの大地に対する電圧を測定することを思い付き、その電圧変動が磁場変動と同期していることを明らかにした[7]。

CERN の最寄り駅があるジュネーブは、思えば、なかなか、興味深い地域である。発着する高速電車には2種類あり、フランス国鉄の直流 1500V の SNCF と言う TGV と、スイス国鉄の交流 15000V の CFF である。ところで、LEP の磁場変動を引き起こすのは、直流の SNCF で、交流の CFF ではない。

両者の違いは、電気回路系の違いに求めることができる。直流方式は Figure 1 に類似した電気回路になっており、大地には電流が流れる。しかし、これに対して、交流方式は Figure 2 に類似した電気回路になっており、大地に流れる電流はほとんど無視できる。

なお、この現象を報告した論文[7]の題名は The influence of train leakage current on the LEP dipole field である。しかし、新しい回路理論の(2.1.5)式で述べたように、leakage current ではなく、正しくは、大地に流れる電流はコモンモードノイズであることに注意しておきたい。

それにしても、これまで、加速器と電車との相互作用を考慮して、それぞれが設計されることはなかった。こうした現在我々が知る設計手法は何処か何かが不十分であり、ものの見方を変える必要があるだろう。

その点、CERN の LEP で起こった磁場変動は教育的である。Figure 1 の主配線が2本の従来の回路に基づく3本線回路は避けるべきものであり、Figure 2 の対称3線(S3L)回路を広く普及させる必要がある。さらに、誤解のないように一言付け加えておくと、問題は、電車の回路だけにあるのではなく、LEP 加速器の回路にもあり、電車と加速器の両方を S3L 回路にする必要がある。

2.3 古典電気力学のパラダイムシフトと新しい回路理論

従来の回路理論では、大地は、電位の基準になり、グランドプレーンと呼ばれるのに対して、新しい回路理論では、大地は抵抗性導体で、コモンモードノイズが伝搬することを述べた。新旧の回路理論の違いを、最新の場の量子論に至る歴史からして、古典電気力学のパラダイムシフトとして説明するのが分かり易いであろう。従来の回

路理論は、ヘヴィサイドにより、1876年頃、電信方程式として提唱された。その数年後の1885年頃、彼は、マクスウェル方程式を電場と磁場で書き表した。マクスウェル自身は、1873年頃には、電場と磁場とは別種の場の量であるポテンシャルで書き表すことも提唱していた。しかし、ヘヴィサイドは、ポテンシャルは形而上学的で数学的虚構であるとして、ポテンシャルを排斥した。

これに対して、リーマンやローレンスは、ポテンシャルの研究を進め、電磁波は有限の光速で伝搬し、遅延現象が起こることを示した。その後、マクスウェル方程式をポテンシャルで書き表し、偉大な物理学者の精力的な研究により、量子力学や量子電気力学(QED)を考慮して解を求め、最新の場の量子論[8]へと到達した。この歴史からすると、マクスウェル方程式自体は、ものの考え方を変えるほど、大きく、進歩したのに対して、従来の回路理論は1876年頃のまま進歩がなかった。この停滞こそが、電磁ノイズの何たるかを解明できなかった原因であろう。

ここで、場の量子論から読み取れる、古典電気力学のパラダイムシフトを要約しておこう。場は電場と磁場からなり、物質は電荷と電流からなり、場と物質とは区別される。場は真空中を光速で伝搬し、物質は光速以下の速度で伝搬する。場の源は物質であり、マクスウェル方程式が成立する。従って、電場の時間変化が磁場を発生することではなく、同じ文脈で、磁場の時間変化が電場を発生することはない[9]。場と物質は相互作用し、ローレンツ力が成立する。場と物質とは、それぞれ、エネルギー、運動量、及び、角運動量を持つが、ローレンツ力の下では、全エネルギー、全運動量、及び、全角運動量は保存する。

従来の回路理論は、以上に述べた古典電気力学の新しいパラダイムを満たしていない。複数の配線の間では、暗黙のうちの理想化であろうが、コンデンサー(静電容量係数)が想定されている。コンデンサーでは、電荷や電流が時間変化したとき発生する電磁場の伝搬速度は無窮大であり、遅延現象が起こらない。その結果、従来の回路理論では電磁場の放射は起こらない[10]。電磁波の放射を語るため、別途の理論が必要とされた。新しい回路理論では、伝搬と放射とを同時に統一して取り扱うことができる。

ところで、場の理論から分かったことは、場の源は物質であると言うことである。これからして、電源は物質(電荷と電流)を発生し、物質を電気回路に供給する装置であることが明らかになった。この考えからして、配線の数が3本の Figure 1 や Figure 2 の回路では、ノーマルモードの電源とコモンモードの電源が存在しなければならない。

ところで、配線の数が2本の従来の回路では、電源は1台だけ設けると考えているので、コモンモードノイズの電源が何処にあるかは不明である。コモンモードノイズに電荷や電流を供給する電源はどうなっているかについて、解明しなければならない。

2.4 コモンモードノイズが実在することの傍証:ELF帯とVLF帯

従来の回路理論では大地をグランドプレーンと考えてきたので、新しい回路理論で大地を抵抗性導体であると

断定するには、何処となく、不安がある。言い換えれば、大地は、交流に対して、表皮効果の現象が起こるとして良いのかと考え込まれる。

地球は、大気を挟んで、大地を導体とし、電離層も導体とする、空洞共振器と考えることができ、シューマン共鳴と呼ばれる共振が起こる[11]。地球の周長は 4 万 km で、光速は 30 万 km であるから、基本モードの共振周波数は 7.5Hz になる。実際に測定されているのは 7.83Hz で ELF である。大気中で雷が発生すると、電磁波は光速で伝搬し、大地に達すると、反射される。反射された電磁波は電離層に達すると反射される。この反射を繰り返しながら、地球を一周する。

7.83Hz という ELF でも反射が起こるが、反射には、当然のことながら、物理がある。大地に電磁波が達すると、その電磁場によるローレンツ力で大地の中の電子が揺り動かされ、電荷や電流が発生する。この電荷や電流が源になって、電磁波が発生する。それが反射である。この物理現象からして、ELF でも表皮効果が起こると考えて良い。

潜水艦では、双曲線電波航法に基づく、オメガと呼ばれる電波航法が使用されてきた。その周波数は 10kHz~14kHz の VLF で、海中での表皮効果による深度は数十 m まで到達することを利用している。

最近 GPS が使用されるようになり、オメガは使用されなくなって来たものの、送信局は稼働している。この VLF を利用して、地中の抵抗率の分布などの電磁探査が行われている[12]が、大地の表皮効果を利用している。

大地は、以上で分かるように、ELF でも VLF でも表皮効果の現象が起こる抵抗性導体である。従って、大地電流の大きさとその周波数が分かれば、表皮効果のジュール熱による発熱量を計算して良いことになる。

3. 高圧送電線の直下での大地電流と大地のジュール熱

3.1 三相三線式高圧送電線に等価な二導体伝送線路

従来の電気回路では、大地が勝手に3番目の配線となり、コモンモードノイズの波動が伝搬し、大地電流が流れることを述べた。大地には、こうした人工起源の電流が流れる他、自然起源の電流が流れる。例えば、大地震が発生する前には、その前兆として地殻変動が起こり、大地に電流が流れることが知られている。この現象を利用して、大地の異なる2点間の電圧を常時測定し、その異常により地震を予知する研究が続けられている。

しかし、例えば、CERN の LEP の奇妙な磁場変動の原因は高速電車の電気回路系のコモンモードノイズであったことから知られるように、大地には、各種各様の電磁ノイズによる電流が流れている。それも、架線やレールから遠く離れた LEP の真空ダクトを電流が流れていることからして、その大地電流の測定は簡単ではない。

そんな大地電流によるジュール熱を測定することは出来ない相談と思えるが、案外と、そうでもないように思える。それは送電線の直下の交流磁場が測定されており、その磁場から、大地電流が計算できる。その原理を Figure 3 に示す。

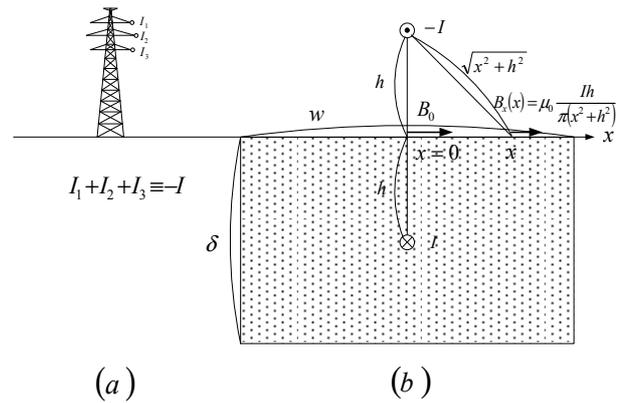


Figure 3: (a) Overhead transmission lines of the AC 3-phase and 3-wire type and definition of a total current of 3 currents of (I_1, I_2, I_3). (b) Equivalent circuit of two-conductor lines of a total current and a ground current of common-mode noise.

3.2 大地電流とジュール熱の計算式のみ

Figure 3 に登場する記号や式の詳細な説明を割愛し、数式を列挙しておく。

3本の配線を通る3相交流電流の総和を

$$-I = I_1 + I_2 + I_3 \quad (3.2.1)$$

と定義する。この電流の鏡像の電流が大地に流れるとして、等価的に、2導体伝送線路の回路になるとして、地表面に発生する交流磁場は

$$B(x) = \mu_0 \frac{Ih}{\pi(x^2 + h^2)} \quad (3.2.2)$$

で与えられる。このとき、送電線の直下での交流磁場は

$$B_0 = B(x=0) = \mu_0 \frac{I}{\pi h} \quad (3.2.3)$$

となる。このとき、大地電流が一樣に流れるとして、その横幅を

$$w = \frac{1}{B_0} \int_{-\infty}^{\infty} B(x) dx = \pi h \quad (3.2.4)$$

で与えられるとする。

また、大地電流が流れる深さは表皮効果の厚さで計算する。交流の角周波数、大地の透磁率、及び、大地の電気伝導率あるいは大地の抵抗率が与えられているとき、表皮の厚さは

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega \mu}} \quad (3.2.5)$$

となる。ただし、電気伝導率と抵抗率の関係は

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3.2.6)$$

で与えられる。

大地電流が一様に流れるとするときの断面積が定まったので、抵抗は

$$R = \frac{\rho}{w\delta} = \frac{1}{w} \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} = \frac{1}{\pi h} \sqrt{\frac{\omega\mu\rho}{2}} \quad (3.2.7)$$

となる。これより、送電線の直下での単位長さ当たりの発熱量は

$$P = \frac{1}{2} RI^2 \quad (3.2.8)$$

となる。

4. 1910年頃と1980年頃の突然の気温上昇

4.1 IPCC第5次評価報告書に基づく気温変化の分類

2014年のIPCC第5次評価報告書[2]に示されている、「観測された世界平均地上気温(陸域+海上)の偏差(1850~2012年)」の図を素直に眺めると、1850年から2014年の気温の変化は、4つの期間に分類できる気がする。

1910年頃より以前は気温が変化していないとみなして、名前を付けない。1910年頃から1945年頃までは気温が上昇していた時代で、第I期と呼び、1946年頃から1979年頃までは気温が安定していたか寒冷化していた時代で第II期と呼び、1980年頃から1997年頃までは気温が上昇していた時代で第III期と呼び、1998年頃から現在まではハイエイタスとして気温が安定していた時代で第IV期と呼ぶ。

気温の変化を4つの期間に分類してみたが、本稿では、第I期の始まりと第III期の始まりは電気の利用が原因であるとしたから、この分類は有意であると考えられる。この場合、電気は利用し続けているので、第II期や第IV期で気温が安定であったり寒冷化した原因を解明しなければならない。

4.2 1910年頃と1980年頃の電気での出来事

第一次世界大戦は1914年に始まったが、その年以前に、気温の上昇が始まった。この大戦ではヨーロッパのほとんどの国が参戦したものの、アメリカは当初は参戦しなかったが、1917年に宣戦布告した。

そんなアメリカでは、大戦の直前の1913年にビッグクリーク水力発電計画[13]の運用が始まった。シエラネバダ山脈から東海岸のロサンゼルスまで、390kmの長距離にして150kVの高圧の送電線で大電力が送電され、ロサンゼルスは一大工業都市になった。

この時代は、送電された交流は変電されて交流のまま利用されたり、単なる整流で、直流に変換されているのみであった。

石油危機は1973年と1979年の二度にわたって起こり、石油価格が大幅に引き上げられたこともあり、省エネルギーに取り組む必要が生じた。

1973年の石油危機の後、省電力技術の開発が急がれ、インバータの実用化が優先課題となった。その取り組みの中で、スイッチングのための素子として、1958年に開発されたSCRに続いて、GTO、IGBT、さらには、Power MOSFETが開発され、産業や鉄道さらには家庭での利用が進んだ[14]。

コンバータでのSCRによるスイッチングノイズに比較して、インバータでの高速スイッチングにより電磁ノイズの周波数が高くなり、ノイズの問題が大きくなった。

鉄道の電化も、コンバータとインバータの開発と軌を同じくしている[15]。

5. コモンモードノイズによる大地の発熱の計算

5.1 交流電磁場の許容制限値

交流電磁場は非電離放射線とされ、ICNIRPにより、許容制限値が定められている[16]。例えば、交流磁場の許容制限値は1,000mGである。

こうした許容制限値で思い起こされるのは、1979年に、送電線の周辺で小児白血病が発生しやすいと言う報告である。国内の電力会社は、送電線の周辺での交流磁場の測定値を公表している。

5.2 大地電流と大地の発熱量

大地電流の大きさや大地の発熱量は測定できそうにもないので、ここでは、送電線の等価回路をFigure 3として、(3.2.1)~(3.2.8)を利用して、大地電流と大地の発熱量を計算で求める。

東京電力が公表している送電線の周辺での交流磁場の大きさは70mG以下である[17]が、ここでは、 $B_0=10\text{mG}=1\mu\text{T}$ とする。送電線の高さを $h=50\text{m}$ とすると、大地電流の大きさは $I=125\text{A}$ となり、電流が一様に流れる幅は $w=157\text{m}$ となる。コモンモードノイズの周波数を $f=5\text{kHz}$ とし、大地の抵抗率を $\rho=200\Omega\cdot\text{m}$ とすると、表皮の厚さは $\delta=100\text{m}$ と計算で求まる。幸運なことに、表皮の厚さが送電線の高さの2倍になったので、大地電流 I は幅 w と深さ δ の断面積を一様に流れるとして良いであろう。その結果、抵抗の大きさは $R=1.27\times 10^2\Omega$ と計算され、送電線の直下での大地の発熱量は、単位長さ当たり $P=99.2\text{W/m}$ となる。

送電線の長さが分かれば、地球全体の発熱量が分かるが、そうしたデータはなさそうである。そこで、日本のデータを流用する[18, 19]。2011年の日本の送電線の亘長(こうちょう)は $8.32\times 10^7\text{m}$ で、発電量は $1.103\times 10^{11}\text{W}$ であった。従って、大地の発熱量は $8.25\times 10^9\text{W}$ となり、発電量の7.5%である。

ところで、2011年の世界の総発電量は $2.52\times 10^{12}\text{W}$ であった[19]から、大地の発熱量は $1.88\times 10^{11}\text{W}$ と計算できる。

とんでもない計算に思えるかも知れないが、それなりに合理的な可能性がある。架空送電線では、送電線の抵

抗のジュール熱で、送電量の 5%程度を送電損失が発生している。この損失はノーマルモードに対するものであり、コモンモードノイズが大地電流となっている場合には同程度の発熱がある可能性がある。

6. 人工電磁ノイズにより増加する水蒸気の温室効果が原因の気温の上昇

6.1 大気中の水蒸気の増加量

地中の水を気化するには、20°Cでは、1g 当たり、586cal/gの熱が必要で、2,453W/gと換算できる。ところで、大地の発熱量は $1.88 \times 10^{11} \text{W}$ と求めたので、1秒当たり $7.66 \times 10^7 \text{g/s}$ の水蒸気が大気中で増加し、1年当たりでは $2.42 \times 10^{15} \text{g/y}$ の水蒸気が大気中で増加する。

地球の表面積は $5.09 \times 10^{14} \text{m}^2$ であるから、単位表面積当たりの大気中の水蒸気の増加量は

$$\Delta W = 4.75 \times 10^{-3} \text{kg} / \text{m}^2 / \text{y} \quad (6.1.1)$$

と計算できる。

6.2 電磁ノイズで発熱するときの等温1層大気モデル

電磁ノイズによる発熱は全て、地中の水を気化するのに使用され、大気中の水蒸気が増加するとしているので、大地の表面温度は変化しないと考えることができる。

この場合、Figure 4 の等温1層大気モデル[20]が成立すると考える。

大気がなく、従って、温室効果がないときの地表面温度 T_0 は

$$\sigma T_0^4 = I_0 = \frac{1}{4} S_0(1-A) \quad (6.2.1)$$

で与えられる。ただし、 $\sigma = 5.671 \times 10^{-8} \text{W/m}^2/\text{K}^4$ はステファンボルツマン定数であり、太陽光が地球に届く強度は、大気による散乱を考えると

$$I_0 = 340 - 100 = 240 \text{W} / \text{m}^2 \quad (6.2.2)$$

となる。ここで、大気の放射率を ε とすると、温室効果により、地表面の温度 $T_c \text{K}$ は

$$T_c = \left(\frac{2}{2-\varepsilon} \right)^{\frac{1}{4}} T_0 \quad (6.2.3)$$

と与えられる。ただし、 $0 < \varepsilon < 1$ である。また、等温大気の温度 $T_a \text{K}$ は

$$T_a = \left(\frac{\varepsilon}{2-\varepsilon} \right)^{\frac{1}{4}} T_0 \quad (6.2.4)$$

と与えられる。(6.2.3)と(6.2.4)から、大気の温度は、地表面の温度より、低くなること分かる。

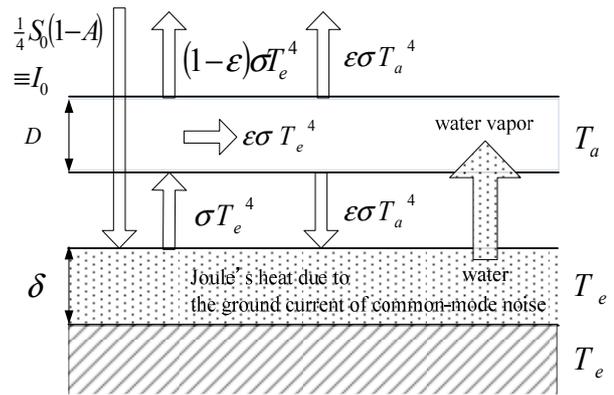


Figure 4: One-layer isothermal atmosphere model for a two-layer ground. The first layer of the ground is heated by Joule heating due to the ground current but the second layer of the ground is not heated. Because all of the Joule heating is considered to vaporize water in the ground into water vapor in the atmosphere, temperature of the first layer is same as that of the second layer.

$$T_a = \left(\frac{\varepsilon}{2} \right)^{\frac{1}{4}} T_e < T_e \quad (6.2.5)$$

大気の放射率 ε を、 $\text{mm}=\text{kg}/\text{m}^2$ の単位で与えた有効水蒸気量 w^* を用いて、計算しよう。 $1\text{mm} < w^* < 100\text{mm}$ の範囲では

$$\varepsilon = 0.393 \ln \left\{ 1 + 2.2(w^*)^{0.36} \right\} \quad (6.2.6)$$

と与えられている[21]。

まず、ジュール熱が発生していないときの放射率を求めておこう。(6.2.2)の I_0 を用いると、(6.2.1)より、

$$T_0 = 255.05 \text{K} \\ \Rightarrow T_0 = 255.05 - 273.15 = -18.1^\circ \text{C} \quad (6.2.7)$$

となり、地表面の摂氏温度はマイナスになる。実際には摂氏 22.0°C として、

$$T_c = 22.0^\circ \text{C} \\ \Rightarrow T_c = 22.0 + 273.15 = 295.15 \text{K} \quad (6.2.8)$$

を(6.2.3)に代入すると、放射率が

$$\varepsilon = 0.885 \quad (6.2.9)$$

と定まる。

(6.2.7)と(6.2.8)より、 $T_c/T_0 = 1.157$ となるから、地表面からの放射エネルギーは

$$\sigma T_c^4 = 430.36 \text{W} / \text{m}^2 \quad (6.2.10)$$

となる。(6.2.2)の $I_0=240\text{W/m}^2$ と比較すると、温室効果により、 190.36W/m^2 だけ余分に地表が暖められたことになる。このときの有効水蒸気量は

$$w^* = 42.55\text{mm} = 42.55\text{kg/m}^2 \quad (6.2.11)$$

と計算される。なお、大気温度は

$$T_a = 240.73\text{K} \Rightarrow T_a = -32.4^\circ\text{C} \quad (6.2.12)$$

と計算される。大気温度は摂氏ではマイナスになって間違いに思えるが、地表面温度は正しく計算できているので、これが等温大気1層モデルの限界なのであろう。

6.3 ずれが起きたときの計算と気温の上昇

有効水蒸気量が Δw^* だけずれたときの気温のずれや放射率のずれを計算しよう。そのため、(6.2.3)と(6.2.6)のずれの式を求めておこう。

$$\frac{\Delta T_e}{T_e} = \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} \frac{\epsilon}{4(2-\epsilon)} \quad (6.3.1)$$

$$\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} = \frac{\Delta w^*}{w^*} \frac{0.792(w^*)^{0.36}}{\{1 + 2.2(w^*)^{0.36}\} \ln\{1 + 2.2(w^*)^{0.36}\}} \quad (6.3.2)$$

(6.3.1)と(6.3.2)とを組み合わせると、有効水蒸気量のずれに対する気温のずれの式が求まる。

$$\frac{\Delta T_e}{T_e} = \frac{\Delta w^*}{w^*} \frac{0.0779(w^*)^{0.36}}{\{1 + 2.2(w^*)^{0.36}\} [2 - 0.39331 \ln\{1 + 2.2(w^*)^{0.36}\}]} \quad (6.3.3)$$

この式の右辺の係数の大きさを(6.2.11)の有効水蒸気量で計算すると

$$\frac{0.0779(w^*)^{0.36}}{\{1 + 2.2(w^*)^{0.36}\} [2 - 0.39331 \ln\{1 + 2.2(w^*)^{0.36}\}]} = 0.0284 \quad (6.3.4)$$

となる。そこで、有効水蒸気量のずれとして(6.1.1)の値を用いると

と求まり、 $T_e=295.15^\circ\text{C}$ とすると、1年当たりの気温のずれ

$$\frac{\Delta T_e}{T_e} = \frac{4.75 \times 10^{-3}}{42.55} \times 0.0284 = 3.17 \times 10^{-6} \quad (6.3.5)$$

が

$$\Delta T_e = 0.00094^\circ\text{C} \quad (6.3.6)$$

になる。この気温上昇は、この130年の平均の気温上昇の14%程度であり、実際に起こっていることが再現できていると考えて良い。

7. 結論

コモンモードノイズの電流が大地を発熱させるときの発熱量が世界の発電量の7.5%とすると、地中の水が気化して、大気中の水蒸気が増加する温室効果により1年当たりの気温上昇は実際の値の14%と計算され、合理的と思われる。この7.5%は、架空送電線のジュール熱による送電損失は5%程度であることに匹敵している。

前者はコモンモードで発生し、後者はノーマルモードで発生すると考えることも可能である。

参考文献

- [1] G.S. Callendar, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 64, 275 (1938) 223-250.
- [2] 環境省、IPCC 第5次評価報告書の概要 - 第1作業部会 (自然科学的根拠) -。
- [3] H. Toki and Kenji Sato, Proc. Jpn. Acad., Ser. B90 (2014) 29-46.
- [4] M. Kumada *et al.*, Proc. Of EPAC94, London, England, (1994) 2338-2340.
- [5] H. Kobayashi, Proc. Of PAC09, Vancouver, BC., Canada, (2009) 1823-1827.
- [6] 佐藤健次、「科学」、第85巻、第3号、岩波書店、(2015) 0231-0235頁。
- [7] E. Bravin *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A417 (1998) 9-15.
- [8] S. Weinberg, "To Explain the World: The Discovery of Modern Science", PENGUIN BOOKS, (2015) スティーブン・ワインバーグ著、大栗博司解説、赤根洋子訳、科学の発見、2016年5月10日第1刷発行。
- [9] 太田浩一著、「電磁気学 I & II」、丸善、2000年10月20日、第1刷発行。
- [10] J.R. Carson, The Bell System Technical Journal, Vol. 6 No.1 (1927) 1-17.
- [11] J.D. Jackson, "Classical Electrodynamics Third Edition", JOHN WILLY & SONS, INC., 1998, J.D. ジャクソン著、西田進訳、「電磁気学第3版(上)(下)」、吉岡書店、2002年。
- [12] Y. Orihara *et al.*, Proc. Jpn. Acad. Ser. B 86(9) (2010) 914-919.
- [13] https://en.wikipedia.org/wiki/Big_Creek_Hydroelectric_Project
- [14] https://en.wikipedia.org/wiki/Power_Inverter
- [15] https://en.wikipedia.org/wiki/Railway_electrification_system
- [16] HEALTH PHYSICS 74(4) (1998) 494-522
- [17] <https://www.tepco.co.jp/ps-engineering/denjikai/image/20140530.pdf>
- [18] <https://www.fepco.or.jp>
- [19] https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_electricity_production
- [20] <https://en.wikipedia.org/wiki/Hydropower>
- [21] 岩田徹、大滝英治、大橋唯太、塚本修、山本晋、「環境気象学入門」、大学教育出版、2007年。
- [22] 近藤純正、「地表面に近い大気の科学 - 理解と応用 -」、東京大学出版会、2000年。