

磁界を調べるとわかること(その2)

小暮裕明

今回は、「電気」というインフラを成立させている、ファラデーゆかりの電磁誘導と磁界についてシミュレーションしてみました。ある物体が別の物体に影響を及ぼすという事実は、人間にとって直感的に受け入れやすい現象です。ファラデーは、1835年、静電気の研究で、電場、磁場、力線などを用いた「近接作用論」を提唱しています。近接作用があるのですから遠隔作用もあります。これらは直感的にわかりやすそうなのですが、深く考えるとけっこうはまりそうな理論です。

月はなぜ落ちてこないのか、人類誕生以来のこの疑問に答えたのはニュートン^{注1}でした。地球と月のように遠くても、物体と物体の間に働く力が空間をへだてて「直接」働くという考えかたが遠隔作用です。距離はいくらでもよいので、さらに遠く宇宙の果てまで及んでいる作用とも考えられます。

一方、ファラデー^{注2}は、前回シミュレーションしたような電気のおよび磁気的な作用では、物体と物体の間に働く力が空間(媒質)の物理的な変化によって伝えられると考えました。これを、遠隔作用に対して近接作用と言います。

電磁気学の教科書のはじめの章に登場するクーロン^{注3}の

法則は、ニュートンの万有引力の法則と同じ形をしています(図1)。ですからクーロンは、電気力を遠隔作用として説明するための実験を推し進めました。当時はニュートン力学のみが科学的な理論で、電気分野もこれに従うというのは自然な考えかただったと思われます。ですからファラデーの考えはとても受け容れがたいものだったのだと想像されます。

月が落ちないかどうか毎日心配している人はいません。身のまわりで観測される電気力は、空間をへだてて「直接」働く遠隔作用と考えても、生活するうえではなんら不都合はありません。しかし落ち着いて考えてみると、空間を越えて力(電気力)が働くというのは、いったいどういうことなのだろうと疑問に思うでしょう。

多くの科学者が電気力の遠隔作用に疑問を持たなかった中で、ファラデーだけはこのような先入観を払拭した説を唱えました。それが1835年に提唱した近接作用論ですが、電荷が変化を与える空間を「場(field)」と呼び、場の変化によって電気力が働くという考えかたがここに生まれました。いまでは、主に物理屋さんは電場、磁場という呼びかたをしますが、電気屋さんは電界、磁界と呼んでいます。

●クーロンの法則

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

ϵ_0 : 真空の誘電率 Q_1, Q_2 : 物体の電気量 r : 物体間の距離

●ニュートンの万有引力の法則

$$F = G \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

G : 万有引力定数 m_1, m_2 : 物体の質量 r : 物体間の距離

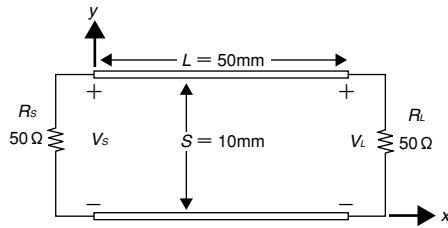
〔図1〕クーロンの法則とニュートンの万有引力の法則

クーロンの法則は、ニュートンの万有引力の法則と同じ形をしている。

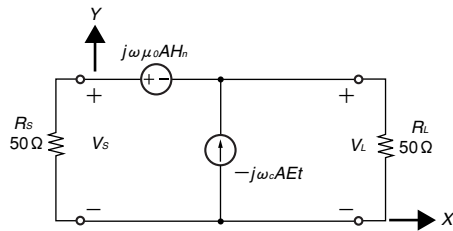
注1: ニュートン、1642年～1727年、英国の小さな村の農場で生まれた。ある日ニュートンは、木の枝からリンゴの実が落ちるのを見た。そのとき空に月が出ており、それも同時に見て「リンゴの実が落ちる原因となっている力が月まで届いていて、月を軌道にとどめる働きをしている」ことを悟った(ジェームス・トレフィル、美宅成樹訳、『科学1001の常識』、講談社)。生家の庭には万有引力発見のきっかけとなったといわれるリンゴの木も残っていて、東京大学理学部の植物園には、その接ぎ木の苗から育った木がある。

注2: ファラデー、1791年～1867年、英国の物理学者、化学者。電磁誘導の発見(1831年)、電気分解のファラデーの法則(1833年)、自己誘導の発見(1834年)など。また静電気の研究では電場、磁場、力線などを用いた近接作用論を提唱(1835年)。

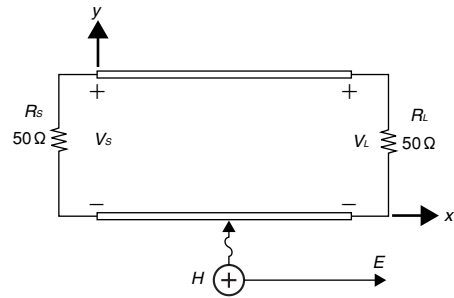
注3: クーロン、1736年～1806年、フランスの工学者・実験物理学者。工兵学校で学び、陸軍の技師となった。パリ大学で力学実験の研究。帯電体相互の間に働く力、磁極相互間に働く力を測定し、クーロンの法則を発見(1785年)。



〔図2〕 ループ状の回路モデル
 前回の図15(a)と同じモデル。

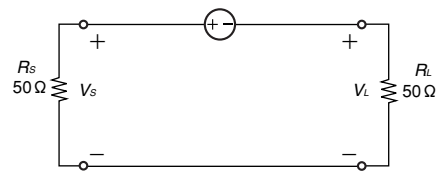


〔図4〕 図3の等価回路
 伝送線路モデルを適用。



〔図3〕 誘導電流計算のためのモデル

電界が x 方向、磁界が z 方向の入射平面波が、 x - y 平面内を y 方向へ進んでいる。



〔図5〕 図3をより簡単にした等価回路
 図4の電流源がゼロ。

1 磁界と誘導電流

● 磁界の値から回路の誘導電流を計算する

38万kmも離れている地球と月の間に働く力は、空間をへだてて直接働く遠隔作用に支配されています。一方、近くにあるノイズ源から基板の回路に結合する電磁エネルギーは、空間を伝わる近接作用に支配されています。

前回は図2のモデルを用いて、ループ状の回路を通り抜ける磁界の大きさを知り、この回路に誘導されて流れる電流の値を調べました。Paulの提唱する簡便な計算方法¹⁾は、次のようになります。

図2は、10mm 間隔、50mm 長の平行2線(リボン・ケーブル)です。両端は50Ωの抵抗で終端されています。この線路の特性インピーダンスは次の式で求められます。

$$Z_c = 1/\pi \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} \cdot \ln(s/r_w) \\ = 120 \cdot \ln(s/r_w)$$

s : 線の中心間隔, r_w : 線の半径

いま r_w を0.5mm とすれば、この線路の特性インピーダンス Z_c は、リボン・ケーブルの絶縁体の影響を無視したとき

約360Ωになります。終端抵抗の値はこれよりも小さいので、いわゆる低インピーダンス負荷の回路となります。

いま図3に示すように、電界が x 方向、磁界が z 方向の入射平面波が、 x - y 平面内を y 方向へ進んでいるとします。線路長50mmは、1GHzの波長300mmの1/6ですから、Paulの例題の1/3 λ_0 (100MHzで1m長：電氣的に「短い」限界としている) よりさらに小さい値です。この場合は、伝送線路モデルが適用でき、図4のような等価回路が考えられます¹⁾。

入射平面波の電界(x 方向)を1V/mとすれば、磁界(z 方向)は次の式で求められます。

$$H = E/\eta_0 = 1/120\pi = 2.65 \times 10^{-3} \text{ (A/m)}$$

η_0 : 自由空間の波動(電波)インピーダンス²⁾

線路を横切る電界成分はゼロですから、線路のある平面に垂直な磁界成分だけを考えればよいことになります。これは図4に示す線間の電流源がゼロということですから、結局、図5のような簡単な等価回路を考えればよいことになります。そこで、等価回路の電源は次の式¹⁾で求められます。

$$j\omega\mu_0AH_n = -j \times 2\pi \times 1.0 \times 10^9 \times 4\pi \times 10^{-7}$$