

電磁気学の奥深さ（5）：電線に流れる電流は光の速さで進む？【改訂版 2】

電線に電圧をかけて電流を流し、相手に電力を送る仕組みは電気回路の授業で学ぶ。しかし、電気回路で扱うスケールは地球規模に比べて十分小さいので、電力が届く時間についてはあまり気に留めることはなかったと思う。一方、電磁気学の授業において、空間を伝搬する電波の速さは光の速さになること、すなわち、電波も光も同じ電磁波であることを学ぶ。では、電線に流れる電流の速さはどのくらいなのであろう。電流も光の速度に近いという話がある一方で、それを運ぶ電子の移動速度はカタツムリの歩み程度しかないとも言われている。何か不思議である。電流の速度という言葉自体が正しくないようにも思える。本資料では、電磁気学的視点からこの疑問に答えてみたい。マックスウェルの方程式までは学んでいる読者を対象に、丁寧に噛み砕いた形でまとめている。（脚注1）

1. 電気エネルギーの伝送

距離の離れた2点間で、電氣的エネルギーを伝送するには、主なものとして、アンテナを用いて空間を電波の形で伝送する（空間伝送）か、中空の金属パイプの中に電波を閉じ込めて伝送する（導波管伝送）か、導線に電流を流して伝送する（有線伝送）かの三つの方法がある。空間伝送と導波管伝送は学部レベルの電磁気学や電磁波工学（あるいは、電波工学、マイクロ波工学）の授業でしっかり学ぶはずである。

本資料では、電線を伝わる電気エネルギーの伝送速度に着目する（注2）。空間伝送では電波の速度は光の速度であること、導波管伝送では、管内に存在できる種々のモードによって伝送速度は異なり、光速よりは遅くなることを学んでいる。では、有線伝送では、どうであろうか？と言う問いである。

有線伝送の場合、何の速度を見ればよいのであろうか？エネルギーは、電荷を電流の形で相手に運ぶわけだから電流の流れる速さを調べればよいということになりそう。18世紀中ごろ、ホイットストンは、導線を伝わる電流の速度が光の速度に近いことを調べ、フィゾーは電話線を用いた測定で光速度の $2/3$ を得ていたと言う[1]。一方、導体内において、電流（電荷）を運ぶ担い手となる電子の動きは、カタツムリの歩みより遅いらしい[2]。足の遅いランナーに荷物を預けたら、超特急で届けてくれたという有り得ないことが起こっている。どうなっているのだろうか？本資料はこのメカニズムを分かりやすく解説したい。

注1：本改訂版2では、初版 YK-027 (July 12, 2019)、その改訂版 YK-027-rev (June 20, 2022) に対して、章構成や解釈において、大幅な書き換えを行っている。（筆者の未熟な理解等のため）

注2：本稿では、場面場面で、「エネルギー移動」、「電力伝送」と言うようにエネルギーや電力という用語を使っている。エネルギーの単位はジュール [J]、電力はワット [W]（単位時間当たりのエネルギー [W=J/s]）なので、どちらもエネルギーの動き（流れ）と言う意味において変わりはない。

有線伝送では、2本の導線を用意し、一方を電流の送り出し、もう一方を受け止めに使う。電流の向きが反対になり、一方が I のとき、もう一方は $-I$ である。この特性を理論的に調べたい場合には、幾何学的に対称な構造が望ましく、典型的なものとして、2本の平行導線（間隔は信号の波長に比べて十分狭い）や同軸円筒線路などがある。前者（平行導線）はレッヘル線と呼ばれ、アナログテレビ時代のフィード線や商用電源の送電線でお馴染みである。電磁界解析を容易に行うには、円筒同軸線路の方が向いており、この資料では、これを用いて解析する。

2. 直流電力の伝送

本レポートでは、直流電力と任意波形信号（交流信号）電力の伝送を扱う。直流は交流の角周波数 ω を 0 にしたものであり、直流電力伝送は交流電力伝送の一つの極限として扱えそうでもあるが、直流には直流の特徴を捉えた求め方があり、交流とは異なる特性になるので、本節では直流伝送におけるエネルギーの移動速度について述べる。本レポートのタイトルは電流の速度であるが、直流伝送においてはその定義が難しいためであり、電流の速度については、次章の任意波形伝送（交流伝送）で述べる。

図1に示す円筒同軸線路に流れる直流信号のエネルギー移動をみてみたい。

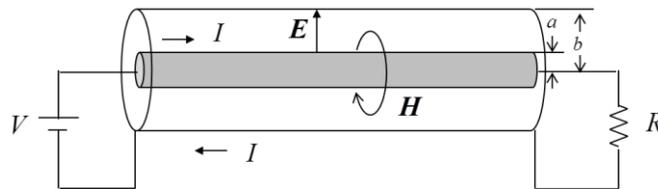


図1 円筒同軸線路による直流電力伝送

負荷抵抗 R に直流電圧 V をかけて電流 I を流し VI の電力伝送を行う。その伝送路に図に示す円筒同軸線路を用いる。円筒同軸線路は完全導体で構成され、半径 a の芯線と半径 b の外管よりなる。線路の長さは十分長いとし、その中央付近（電磁界が端の不連続部の影響を受けなくなっている部分）の円筒中空部分の電磁界に着目し、円筒座標 (r, φ, z) で考える。

電磁界の諸量は以下の関係式で結ばれる。

$$I = \frac{V}{R}, \quad E_r = \frac{V}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)r}, \quad H_\varphi = \frac{I}{2\pi r}, \quad Z = \frac{E_r}{H_\varphi} = \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)R} \quad (1a\sim d)$$

さらに、(1d)式より、

$$R = \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right)Z = \frac{R_0 Z}{Z_0} \rightarrow \frac{R}{R_0} = \frac{Z}{Z_0} \quad (2a, b)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \approx 376.73 \text{ } [\Omega] \quad (\text{自由空間の固有インピーダンス})$$

$$R_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (\text{同軸伝送路の特性インピーダンス (Z=Z}_0 \text{ のときの)})$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (\text{ポインティングベクトル}) \quad (3a)$$

$$P = E_r H_\phi \quad (\text{ポインティング電力}) \quad (3b)$$

伝送路の同軸管の空間部分に蓄えられる単位長さあたりのエネルギー u_G は次式で算定される。

$$\begin{aligned} u_G &= \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_a^b (\varepsilon_0 E_r^2 + \mu_0 H_\phi^2) r dr d\phi \\ &= \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_a^b \left(\varepsilon_0 \left(\frac{V}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)r} \right)^2 + \mu_0 \left(\frac{I}{2\pi r} \right)^2 \right) r dr d\phi \\ &= \frac{\varepsilon_0 \pi V^2}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} + \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad [\text{J/m}] \end{aligned} \quad (4)$$

伝送路の中空部の断面を通過する電力 P_S は

$$\begin{aligned} P_S &= \int_0^{2\pi} \int_a^b P r dr d\phi \\ &= \int_0^{2\pi} \int_a^b \frac{V}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)r} \frac{I}{2\pi r} r dr d\phi = VI \quad [\text{W}] \quad (= [\text{J/s}]) \end{aligned} \quad (5)$$

となる。この電力は図の電気回路で送られる電力 VI に等しくなっており、導線で運ばれる電力は、実は、円筒同軸線路の中空部分を電界と磁界が力を合わせて運んでいるとみなすことができる。電気回路的には、電線に流れる電流が電力を送っていると理解されるが、このような伝送路では、そしてそれは、平行2線のような他の伝送路においても同様に、電線の周りの電磁界が電力を運んでいるということがわかり、大変興味深い。

一方、同軸線路の中空部分が担うエネルギーの動く速度 v_G は、 $u_G v_G = P_S$ の関係より、

$$\begin{aligned}
 v_G = P_s / u_G &= \frac{VI}{\frac{\epsilon_0 \pi V^2}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} + \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right)} \\
 &= \frac{2c}{\frac{R}{R_0} + \frac{R_0}{R}} \leq c
 \end{aligned} \tag{6}$$

と算定される（脚注3）。負荷抵抗 R が同軸線路の特性インピーダンス R_0 に等しいとき、エネルギーが動く速度は光速になり、それからずれると、ずれの大きさに従って遅くなる。直流伝送の場合、エネルギーの伝達速度が光の速度になるのは、ある特殊な条件、すなわち $R=R_0$ のときのみであるが、それ以外でも光の速度に近いことにおいて変わりはない。式(6)では、エネルギーの移動速度を負荷抵抗 R と伝送路の特性インピーダンス R_0 の関数で与えているが、電磁波視点で、 Z と Z_0 の関係で見ると、(2b)式より、次式である。

$$v_G = \frac{2c}{\frac{Z}{Z_0} + \frac{Z_0}{Z}} \tag{7}$$

本章冒頭でも述べたように、上式はエネルギーの移動速度であって、電流や電荷の移動速度ではない点に留意してほしい。ここでは、このような形になると言うことで止めておくが、この式が意味するところについては、分布定数回路の基本伝送モードを学んだ後の3.2節で種明かしをしたい。

3. 分布定数回路の基本伝送モード

ここでは交流信号（任意波形信号）の伝送を調べる。交流は角周波数 ω で定まる周期信号であり、 $\omega=0$ とすれば、直流と言うことになる。しかし、解析上は、両者は全く違う取扱いになる。伝送線路を考えると、交流信号では、信号の波長に対して十分長い長さでの伝送を考える。直流信号では、線路の長さを無限大にしても、この条件が満たされないからである。交流信号の分布定数回路伝送の理論については、電気回路の教科書等にまとめられているので、ここでは、それを踏まえた式展開を行う。また、最後に、エネルギーの移動速度に関して、直流伝送と交流伝送の関係を明らかにする。

注3) 動く姿が見えないもの速度を求めるのは簡単ではない。全く流れが見えない穏やかな川、すなわち、水量が一定で、表面が鏡のような川を想像してみよう。それでも、単位長さあたりの水量はわかるので、川の途中に水門を設け、そこを単位時間当たりの通過する量を測れば流れの速さがわかる。ここではこの方法によっている。

3.1 基本伝送モード

ここでは、伝送線路内に存在できる基本伝送モードの特性を調べる。伝送線路は、単位長さあたりの自己インダクタンス L のコイルと静電容量 C のキャパシタよりなる基本回路が無限に縦続接続する分布定数回路 (図2) で表される。図1に示した円筒同軸線路の L と C は次式である。

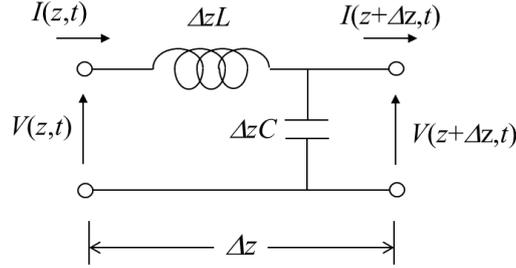


図2 LC 分布定数回路微小区間 (Δz) の等価回路

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right), \quad C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (8a, b)$$

この伝送線路の特性インピーダンス R_0 は、次式により定められる。

$$R_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}{2\pi} Z_0 \quad (9)$$

当然ながら、(2)式で求めた R_0 とは同じになっている。伝送線路上の電圧と電流を $V(z,t)$ 、 $I(z,t)$ とすると、伝送線路の理論により、次式で表される。

$$V(z,t) = f_V(z-vt) + g_V(z+vt) \quad (10a)$$

$$I(z,t) = f_I(z-vt) + g_I(z+vt) = \frac{1}{R_0} \{f_V(z-vt) - g_V(z+vt)\} \quad (10b)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = c \quad (11)$$

ここで、 f_V, g_V は任意形状の電圧波形である。

(10)式より、同軸伝送線路では、電圧・電流波形が歪まず減衰せず光速で z の正方向に伝送するモードと、逆方向に伝送するモードの二つが存在することが分かる。

単位時間に伝送するエネルギー（＝電力）を、電流と電圧が運ぶとすると

$$P_{VI}(z,t) = V(z,t)I(z,t) = \frac{1}{R_0} \{f_V^2(z-ct) - g_V^2(t+zt)\} \quad (12)$$

この電圧と電流の関係を円筒内の電磁界で表すと、次式である。

$$E_r(r,z,t) = \frac{V(z,t)}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)r} = \frac{1}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)r} \{f_V(z-ct) + g_V(t+zt)\} \quad (13a)$$

$$H_\phi(r,z,t) = \frac{I(z,t)}{2\pi r} = \frac{1}{2\pi r R_0} \{f_V(z-ct) - g_V(t+zt)\} \quad (13b)$$

z 軸の正方向に進む成分（最終辺の第 1 項）の電界と磁界の比 Z_f は

$$Z_f = \frac{2\pi R_0}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} = Z_0 \quad (14)$$

となり、自由空間の固有インピーダンス Z_0 になる。同様に負方向に進む成分（同第 2 項）についても $Z_g = -Z_0$ となる。電磁界も電圧・電流波形と同様、 z 軸の正負両方向に光速で伝搬していることが分かる。

導波路の単位面積当たり通過する電力 P_S は

$$\begin{aligned} P_S(z,t) &= \int_0^{2\pi} \int_a^b E_r(r,z,t) H_\phi(r,z,t) r dr d\phi \\ &= \frac{1}{R_0} \{f_V^2(z-ct) - g_V^2(t+zt)\} = P_{VI}(z,t) \end{aligned} \quad (15)$$

となり、ポインティングベクトル $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ がエネルギーの流れを示している。

3.2 不整合負荷が接続される場合の伝送特性

前説の説明は、伝送線路内に存在できる二つのモードの話であったが、実際の伝送路では、終端に負荷が置かれ、その負荷が伝送線路の特性インピーダンスと異なる場合には、 g_V, g_I は、 f_V, f_I の反射信号となる。入射信号と反射信号の関係は、電磁界の不整合問題として扱うか、電圧・電流の電気回路問題で扱うかのどちらかをとる（当然結果は同じ）。ここでは、後者の電気回路で考えてみたい。

負荷抵抗 R （実数値）を伝送線路の終端位置 $z=0$ に置く。負荷の電圧 V_R と電流 I_R は、 $I_R = V_R/R$ のオームの法則で定められる。キルヒホッフの法則より、 $z=0$ の点において、

$$f_V(0,t) + g_V(0,t) = V_R(t), \quad \frac{1}{R_0} \{f_V(0,t) - g_V(0,t)\} = \frac{V_R(t)}{R} \quad (15a, b)$$

より、

$$f_V(0,t) = \frac{V_R(t)}{2} \left(1 + \frac{R_0}{R} \right) \quad (16a)$$

$$g_V(0,t) = \frac{V_R(t)}{2} \left(1 - \frac{R_0}{R} \right) \quad (16b)$$

反射係数 Γ_0 を、 $z=0$ での入射電圧と反射電圧の比で定義すると、

$$\Gamma_0 = \frac{g_V(0,t)}{f_V(0,t)} = \frac{R - R_0}{R + R_0} \quad (|\Gamma_0| \leq 1) \quad (16c)$$

負荷抵抗 R が線路の特性インピーダンス R_0 であれば $\Gamma_0=0$ 、 $R=0$ では $\Gamma_0=-1$ 、 $R=\infty$ では $\Gamma_0=1$ である。それぞれのエネルギーは反対方向に光速で伝搬するので、エネルギーの平均的な速度 \tilde{v}_G は、両成分の平均電力で重み付け平均すると、

$$\tilde{v}_G = \frac{\langle |f_V|^2 \rangle - \langle |g_V|^2 \rangle}{\langle |f_V|^2 \rangle + \langle |g_V|^2 \rangle} c = \frac{1 - \Gamma_0^2}{1 + \Gamma_0^2} c = \frac{2c}{\frac{R}{R_0} + \frac{R_0}{R}} \quad (17)$$

となる。どこかで見た式、そう、(6)式の形である。これはどういうことだろう。読者の皆さんには、以下の種明かしの前に、なぜ同じになったかを、是非、自身で考えてほしい。

図1の直流伝送を考え、負荷は実数値の抵抗で $R \neq R_0$ としよう。直流回路で示した $I=V/R$ のオームの法則に落ち着くまでには、伝送路を光速で何往復もしなければならないのである。2節で示した(6)式は、結構時間がかかったのちの定常状態でのエネルギー移動速度なのである。時刻 $t=0$ で、入力電圧のスイッチを入れたところからスタートしよう。

- ① 電源の位置にある回路のスイッチを $t=0$ でONにする。
- ② 電圧 $f_1=V$ 、電流 $f_1=f_1/R_0$ のステップ型波形が負荷側に向かって光速で進む。
- ③ この電流が負荷抵抗までたどり着くと、整合条件の式(15)、(16)に従って、抵抗に流れ込む電流と反射する電流に分かれる。
- ④ 反射した電圧・電流は、逆向きのステップ型波形 g_1, g_1 となって光速で入力側に戻る。
- ⑤ 入力側の回路抵抗は0なので、今度はここでの電圧・電流整合条件のため $f_2=-g_1, f_2=-f_1/R_0$ のステップ型波形となって、負荷方向に光速で進む。
- ⑥ この波形の負荷への入力によって、負荷の端子電圧がさらに変わるため③と同じルールにより、新たな g_2, g_2 が生まれ、その波形が入力側に向かう。
- ⑦ このようにして、電源側と負荷側で無限回の反射が繰り返され、反射毎に生み出される反射信号の強さは徐々に弱くなるので、合成電圧と合成電流はやがて定常状態に達する。

電源側から負荷側に向かう波形の全電圧を合わせた電圧を V_t 、逆方向の合計電圧を V_r とする

と、負荷側の反射係数 Γ_0 （電源側の反射係数は-1）を用いて、以下のように表される。

$$V_t = (1 - \Gamma_0 + \Gamma_0^2 - \Gamma_0^3 + \dots)V = \frac{1}{1 + \Gamma_0}V \quad (18a)$$

$$V_r = (\Gamma_0 - \Gamma_0^2 + \Gamma_0^3 - \dots)V = \frac{\Gamma_0}{1 + \Gamma_0}V \quad (18b)$$

$$\rightarrow V_t + V_r = V \quad (19c)$$

正負両方向に光速で進むエネルギーの速度をそれぞれの電力で加重平均すると、

$$v_G = \frac{V_t^2 - V_r^2}{V_t^2 + V_r^2}c = \frac{1 - \Gamma_0^2}{1 + \Gamma_0^2}c = \frac{2c}{\frac{R}{R_0} + \frac{R_0}{R}} \quad (20)$$

となる。2章の終わりに、(6)式の意味は後で説明すると書いたが、からくりはこういうことだったのである。一方、任意波形信号に対する平均速度 ((17)式) は、(19)式と違って、行き帰りの一往復のみを考えてるが、上記①～⑦の動作は共通であり、往復の全てを考慮しても同じになることを確認してほしい。また、電源側にも内部抵抗を考えると、負荷側と電源側での反射係数の違いによって、(20)式とは別の速度が出てくる。これについても読者で考えてみてほしい。

以上を踏まえて、理解確認問題を一つ。

【問】 図3に示すように、特性インピーダンス R_0 、長さ1kmの伝送線路（完全導体で構成される）の先に抵抗 R の豆ランプが付けられていて、 $R < R_0$ とする。 $t=0$ の時刻にスイッチを入れたときからの豆ランプの明るさの変化を時間に対して示せ。（豆ランプは μs オーダーの電圧変化にも反応する高速性があるとする。伝送線路は平行2線で描いているが、形状は何でも良く、特性は R_0 だけで決まる。）

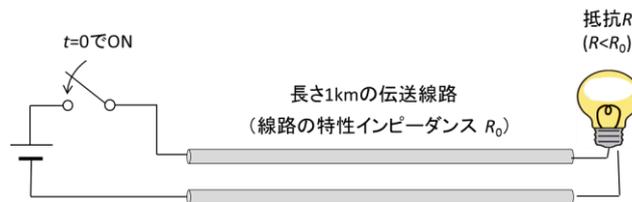


図3 スイッチ投入後の豆ランプの明るさの変化は？

4. 電荷と電子の移動速度と全体のまとめ

ここまでをまとめると、

- 1) 伝送線路の中では、電圧・電流波形が正負の両方向に光速で進む二つのモードがある
- 2) 伝送線路を構成する導体の周囲の空間を電界と磁界が波動として光速に進む二つのモードがある。電圧・電流波形のモードとは一対一の対応がある
- 3) 伝送線路の終端に任意の負荷が接合される場合、整合負荷との比によって定まる反射係数があり、二つのモードの関係は反射係数によって規定される。
- 4) 各モードが運ぶエネルギーも光速で移動する。ただし、逆向きの流れの合成なので、平均移動速度は光速とは一致しない（反射の無い整合負荷の場合を除いて）
- 5) 電流・電圧が分布定数回路として運ぶエネルギー（あるいは電力）と電界・磁界が電線周囲の空間を運ぶエネルギーは等しい（実際、どちらが運んでいるかを定めることはできないが、光速伝搬は電磁波の性質なので、電界と磁界が空間を運んでいると解釈するのが有力）

では、電圧や電流を作り出している電荷、その電荷を物理的に運んでいる電子の速度はどうかを知りたいところである。まずは、導体に流れる電子の動きを調べてみよう。本章の冒頭には、電子の移動速度はカタツムリの歩み、と言うことを述べた。こんな足の遅い電子が、なぜ、エネルギーや情報を光速と言うとんでもない速さで運ぶことができるのだろうか、というのが、本レポートで述べたかったことである。電磁気学の教科書では、電子の移動速度が遅いことが以下のような例題で示される（[2]の4.2節：例題6）。

断面積 S が 1 mm^2 の銅線を考える。銅は 1 m^3 あたりおよそ $n=8.4 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$ の原子よりなることが知られている。銅などの導電性の金属では、どの原子にも一つ自由に動き回れる電子（自由電子）があるとしてよい。ゆえに、自由電子の密度も n である。一つの電子は $e=1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ の電荷を持つ。電流 I は 1 秒間に運ぶ電荷量で定義されるので、その速度を v_{elec} とすると $I=nev_{elec}S$ となる。1 アンペアの電流が流れるとすると上記の数値により、銅線内を動く電子の平均速度は

$$v_{elec} = \frac{I}{neS} = 7.4 \times 10^{-5} \text{ m/s} (=0.074 \text{ mm/s})$$

となり、「歩みが鈍い」の根拠になる。

でも、これでは納得できない読者もいると思う。電流 1A の設定だからそうであるが、百万 A 流せば、74m/s、光にははるかに及ばないが、でも結構速い（銅線が焼き切れるのではと言う心配は横においておき）。電子の走る能力自体はもっとあるのではないかと。何で遅いか、電荷を運ぶ能力を持った電子が有り余るほどいて、目的とする少ない電荷量を運ぶには速く走る必要がまったく無い。荷物を満載した大型トラックが速く走れば、所定の時間内に必要以上に荷物が届いてしまい、そうならないようスピードを落として調整しているからと、電子側の言い分が聞こえてきそう。ゆえに、上記のような算定は一つの側面でしかない。

一方で、原子の構造など、量子力学的な視点（シュレーディンガーの波動方程式に従う世界）から、電子の動く距離や速度に制限があることが調べられている。例えば、非常にラフなイメー

ジではあるが、銅線中の自由電子はおおよそ 1.3×10^3 km/s の速度（フェルミ速度）でランダムに動き回っていると言う。かなりの暴れん坊である。それでも、光に比べてまったく遅いことには変わりはない。

次に電子が運ぶ電荷について考えてみよう。便宜的に、芯線中を単位長さあたり λ_0 [C/m] の正の電荷が、速度 v_e で z 軸正方向に動いているとする。この電荷が円筒同軸線路内の電界と磁界を作っているとする、次式となる。

$$E_r = \frac{\lambda_0}{2\pi\epsilon_0 r}, \quad H_\phi = \frac{\lambda_0 v_e}{2\pi r} \quad (9.21)$$

基本モードでは電界と磁界の比は自由空間の固有インピーダンス Z_0 であるので

$$\frac{E_r}{H_\phi} = \frac{1}{\epsilon_0 v_e} = Z_0 \quad \rightarrow \quad v_e = \frac{1}{\epsilon_0 Z_0} = c \quad \rightarrow \quad I = c\lambda_0 \quad (9.22a,b,c)$$

となり、電荷の移動速度は光速になる。このことから、等価的な意味で、電流を作る電荷も電流波形と同じで光速で動いていることが言える。しかし、ここで、等価的と書いた意味は、電圧と電流、あるいは電界と磁界の生成に電荷密度 λ_0 のみを仮定したため、同じ電磁界を作るには、これが唯一というわけではない。例えば、芯線上に速度 v_e で動く電荷と、動かない電荷が有って、それぞれの電荷密度を λ_1, λ_2 とすると、電界は $\lambda_1 + \lambda_2$ によって、磁界は λ_1 によって決まるので、 v_e は不確定になる（設定によって、遅くも速くもできる）。ゆえに、条件が定まらない状況においては、電荷の速度を議論するのは意味がないということになる。

電荷および電子の移動速度については、

- 6) 光速で動く電圧・電流信号（基本モード）を単位長さあたり λ_0 の電荷の働きと仮定すると、電荷の移動速度は光速である。しかし、そのような仮定を外すと任意の速度が得られ、一般的な意味で、電荷の速度を議論するのは意味がない。
- 7) 電荷を運ぶ電子の動きは、量子力学的な性質から決まり、その速度は光速に比べてはるかに遅い。しかし、導体内に存在する電子の数は極めて多く、目的とする電流を実現するために必要な動きに換算すると、カタツムリの歩み程度の速度で十分である

電線の周囲を光速で伝搬する電磁波の作用を受けて、電線中の個々の電子が反応し、電磁波の進行に伴って電荷が光速で動いているように見えるが（式(22c)）、電子そのものはそのスピードで動いているわけではない。それぞれの位置で周囲の電磁界の作用を受けてわずかに動いているだけである。

これをわかりやすい話とするために、手旗信号による情報伝達に例えることもされる。旗の上下運動によって、情報は高速に進むが、手旗を動かしている人は、その位置に留まっており、速く走る能力は求められていない（手を動かすスピードの速さは求められるが）。この説明では、玉突き衝突やとろてんの押し出しイメージをもつかもしれないが、そのイメージは正確でない。隣の電子に押されて動くのではなく、個々の電子が独立に電磁界の作用（ローレンツ力）によっ

て動いているのである。量子力学的効果によってランダムに動いている電子のわずかな方向の片寄が、電流として現れるのである。

参考文献

[1] 太田浩一, *電磁気学の基礎 II*, 東京大学出版会, 2012.

[2] 砂川重信, *電磁気学の考え方*, 岩波書店, 1993.

読者の皆さんへ

本レポートの内容は、私製本「[謎解き電磁気学](#)」の[第9章](#)にまとめています。