

電気の利用について知ろう

(光永 法明 著 2019/12/13 版)

1 交流電源と直流電源

電気で動作する機器には電源（電気の^{みなもと}源と書いて「でんげん」と読む）が必要です。電源には^{ちよくりゅう}直流電源と^{こうりゅう}交流電源の2種類があります。直流電源は電源の^{でんあつ}電圧が（ほぼ）一定の電源で乾電池が代表例です。レモンで電池を作った人もあるのではないのでしょうか。レモン電池を含む^{かがく}化学電池とよばれる化学反応を利用した電池を電源にすると直流電源になります。それは電圧が^{いんきょく}陰極（マイナス側の電極）と^{ようきょく}陽極（プラス側の電極）の材質で決まるからです。太陽電池は光のエネルギーを電気のエネルギーに直接変換します。電圧は太陽電池の材質で決まり、太陽電池は直流電源です。スマートフォンやパソコン、テレビ、ラジオ、時計など多くの電子機器の回路は直流電源で動作しています。

それに対して交流電源は電源の電圧が**周期的に変化する**電源です。実用的に使われている交流電源では電圧が**正弦波**の形で周期的に変化します(図 1-1)。壁にあるコンセントから使える電源は交流電源です。交流電源で動作するものには電灯、電気ストーブ、扇風機、換気扇などがあります。それ以外の直流電源で動作する電子機器は AC アダプタと呼ばれる交流電源を直流電源に変換する機器(コンセントに挿して使う USB 電源もその一つ)を使ったり、内部にもつことで交流電源でも使えるようにされています。

問題 1-1：実際に電源電圧の時間変化をオシロスコープで観察しなさい。オシロスコープの故障や感電などの事故につながるので一般的な（絶縁型でない）オシロスコープでコンセントの電圧を直接観察しないこと。たとえば図 1-A の写真にあるようなモジュールなどを使うとよい。

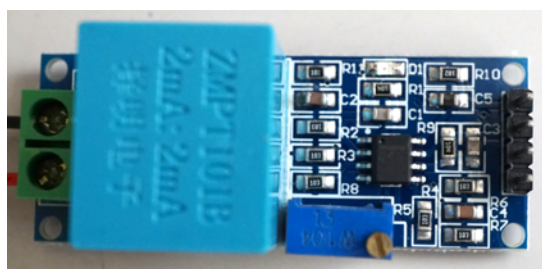
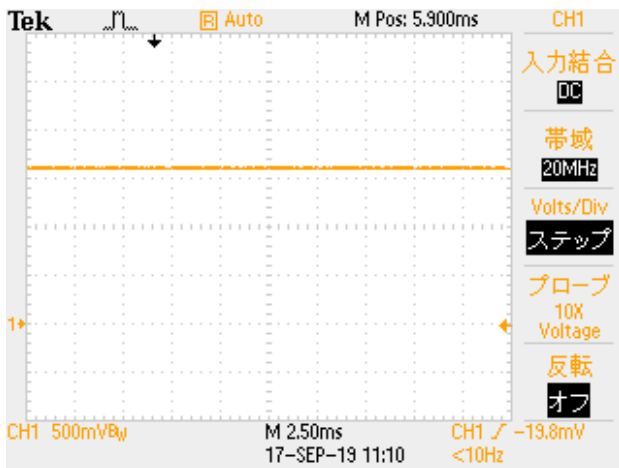
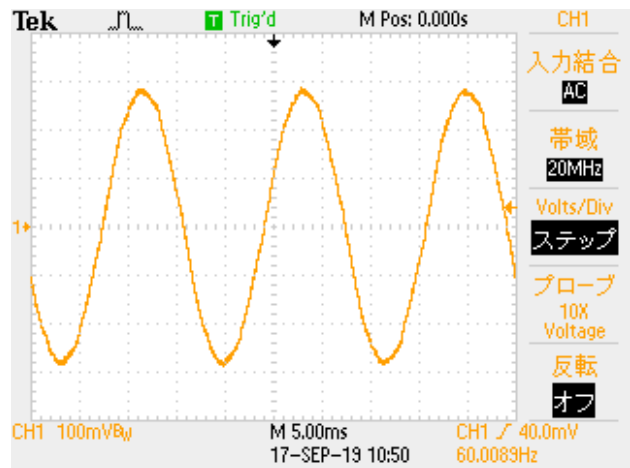


図 1-A トランス ZMPT101B (左の四角)が載ったモジュール。左の端子に観察したい交流電源を、右の端子に電源(直流で 3V~12V ぐらい)とオシロスコープのプロブをつなぐ。



(a) 単三形乾電池の両端電圧（負荷なし）を観察。矢印のところが 0V なので両端電圧は約 1.6V で一定。



(b) コンセントの電圧を観察。縦軸の 1 目盛りは 50V に相当するので最大/最小の電圧は 141V/-141V になる。

図 1-1 オシロスコープでみた電池の両端の電圧の時間変化（変化しない）と(b)交流電源の電圧の時間変化（正弦波の形をしている）。コンセントの交流電圧の観察には電圧トランス ZMPT101B(南京择明电子有限公司)が載ったモジュールを使用。

2 交流電源が使われる理由

2.1 発電所と電気を利用するところは離れている

直流電源で動作する機器が多いのに家庭用のコンセントが交流なのはなぜでしょうか。直流にすればよいと思ったりしませんか。それには送電そうでんが関係しています。電気を他の場所へ届けることを送電といいます。火力発電所は燃料を運ぶのに便利な場所に、水力発電所は水が豊富な場所に、原子力発電所は燃料を運ぶのに便利で冷却用の海水が使える場所に作られます。また発電所を作るには広い敷地が必要です。発電所から電気を使う場所までは遠く離れていることも少なくありません。大阪の場合、関西電力の南港発電所（火力 180 万 kW）は大阪市内にあります。黒部川第四発電所（水力, 33.5 万 kW）は大阪市役所まで直線で約 290km あります。コンセントから遠いところで電気を使おうとしたら延長コードを使うように電線があれば遠くにも送電できますが、長距離の送電では長い送電線（送電する電線）が必要です。送電により電気エネルギーの一部が失われますが、長いと失われるエネルギーも多くなります。

問題 2-1: 住んでいる場所と関西電力の大飯発電所との直線距離を求めてみよう。

2.2 電気エネルギーの量は電力で表す

単位時間あたりに発電、送電、利用する電気エネルギーの量は電力^{でんりょく}で表します。電力の単位は W(ワット)です。電力と電圧^{でんあつ}(単位は V(ボルト))、電流^{でんりゅう}(単位は A(アンペア))には

$$(\text{電力}[\text{W}])=(\text{電圧}[\text{V}])\times(\text{電流}[\text{A}])$$

という関係があります。電圧が 100V で電流が 1A のとき電力は 100W です。電圧が 1V で電流が 100A でも電力は 100W です。つまり同じ電力(電気エネルギー)を送るのに電圧が高いと電流が少なくてよいことになります。

問題 2-2: 6600W の電力を送電するのに 6600V だと何 A 流れるか。66000V だと何 A 流れるか。

問題 2-3: 15A まで流せる電線で電源電圧が 100V のときは電力を何 W まで伝えられるか。200V のときは何 W まで伝えられるか。

2.3 電線にも抵抗がある

導体とはよく電気を通すもののことを言います。電線も導体の一つですが電線には電気抵抗があります。電線の電気抵抗の値は

$$(\text{抵抗値}[\Omega])=(\text{電気抵抗率}[\Omega\text{m}])\times(\text{長さ}[\text{m}])\div(\text{断面積}[\text{m}^2])$$

で求められます。電気抵抗率は材質で決まり、家庭の延長コードに使う電線は銅で出来ていて電気抵抗率は $1.68 \times 10^{-8}[\Omega\text{m}]=0.0000000168[\Omega\text{m}]$ です。定格容量が 15A の延長コードの断面積は $2.0[\text{mm}^2]=0.000002[\text{m}^2]$ です。5m だと

$$0.0000000168[\Omega\text{m}]\times 5[\text{m}]\div 0.000002[\text{m}^2]=0.042[\Omega]$$

と気になりませんが、 $200[\text{km}]=200000[\text{m}]$ だと

$$0.0000000168[\Omega\text{m}]\times 200000[\text{m}]\div 0.000002[\text{m}^2]=1680[\Omega]$$

になります。距離は変えられないので抵抗値を小さくするには電線を太くするか材質を変える必要がありますが、太くすると電線が重く高価になり、銅より抵抗値が小さいのは銀ですが高価です。

問題 2-4: 上記の太さで長さ 200km の銅の電線の重さを計算しなさい。被覆の重さはないものとしてよい。密度は自分で調べること。

問題 2-5: 上記の太さで長さ 200km の電線の材質が純銀だったときの抵抗値を求めなさい。電気抵抗率を自分で調べること。

2.4 電気抵抗があると電気エネルギーは熱に変わる

電気抵抗があるところに電流が流れると電気エネルギーは熱に変わります。これには1840年に発見したイギリスのJ.ジュールの名前がついていて**ジュールの法則**と呼ばれています。発熱の量は

$$(\text{発熱量}[W]) = (\text{抵抗にかかる電圧}[V]) \times (\text{電流}[A]) = (\text{電流}[A])^2 \div (\text{電気抵抗}[\Omega])$$

の関係があります。つまり発熱量は電流の2乗に比例して、電気抵抗に反比例するので、電気抵抗が同じなら電流が倍になると発熱量は4倍に、電流が半分になると発熱量は1/4になります。またこの仕組みで発生した熱のことを**ジュール熱**と呼びます。ジュール熱をうまく利用しているものにアイロン、電気毛布、電気オーブン、電気ストーブ、セラミックファンヒーター、電気コンロ、半田ごてなどがあります。

2.5 送電線からも熱が出る

ジュール熱が発生するのは送電線も例外ではありません。図2-1のように発電所から送り出した電力の一部がジュール熱になってしまいます。ジュール熱になると電気エネルギーとしては使用できなくなります。家庭のコンセントの電圧は100V（エアコン等のための200Vを除く）ですが、家の近くまでは6600Vで送電されています。そうすることによって、同じ電気エネルギーを送るのに必要な電流を1/66にしています。ジュール熱は電流の2乗に比例するので発熱は $(1/66)^2=1/4356$ になります。発電所の近くではさらに高い電圧にすることでもっと発熱量を減らしています。

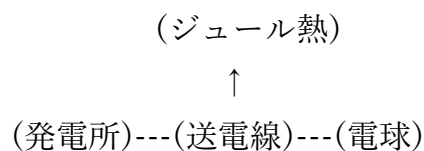


図 2-1 発電所から電球に届くまでに送電線で熱になってしまう

問題 2-6：同じ電力を 66000V で送電すると 100V で送電するとき比べて電流は何分の 1 になるか。またジュール熱の量は何分の 1 になるか。

問題 2-7：同じ電力を 500000V で送電すると 100V で送電するとき比べて電流は何分の 1 になるか。またジュール熱の量は何分の 1 になるか。

問題 2-8：最近では家庭にも 200V のコンセントが設置されることがある。100V に対して 200V では屋内の配線の太さはそのまま倍の消費電力まで使うことが出来るという。なぜか説明しなさい。

2.6 電圧をトランスで変えられる交流電源

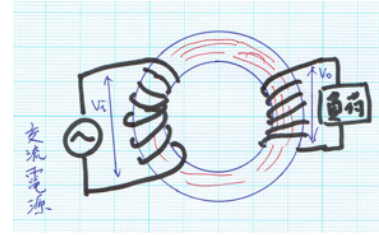
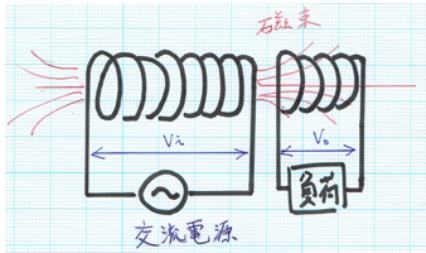
二つのコイルを作ってコイルが作る磁束を共有するようにします(図 2-2)。そうすると一方のコイルの電流が変化するともう一方のコイルの電流も変化します。これを利用したのがトランスです。トランスの入力の電圧を V_i 、出力の電圧を V_o として入力側のコイルの巻き数を n 、出力側のコイルの巻き数を m とすると

$$V_o = \frac{m}{n} V_i$$

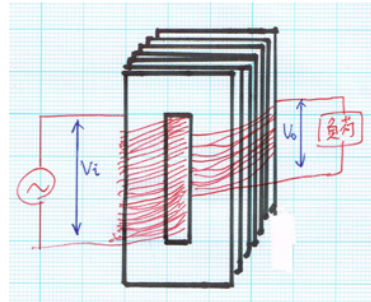
という関係があります。電圧を何倍あるいは何分の 1 に変えたいときにトランスなら巻き数の比を決めて電線をまくだけで電圧を変換する部品ができるのです。たとえば電圧を 1/66 にするなら $n=6600$ 回, $m=100$ 回とすればよいのです。ただトランスにも欠点があります。それは交流電源では使えるのですが直流電源では使えないのです。現在は直流電源の電圧を変えることが半導体技術の進歩によって小型の回路で出来るようになってはいますが、発電所が作られた時代にはできませんでした。そこで送電のための電圧変換がトランスで出来る交流電源が実用化され現在まで交流電源が使われています。

問題 2-8：簡単なトランスを作って電圧を巻き線比で変えられることを確かめよう。

図 2-A のようなトロイダルコアに電線が巻かれたコイル (100 均で車のシガーソケットから USB 電源を作る変圧器が売っているのでそれを分解すると手に入る) で実験できる。電線をコアの穴に 1 回通すと巻き数 1 回 (1 ターン) と数える。最初に穴に通っている線の数と通した線の数の比が巻き線比になる。もともと巻かれている巻き線に低周波発振器(コイルによって適当な周波数は変わるが、最初は 10kHz~50kHz ぐらいで試すとよい)を繋ぎ、その巻き線と追加した巻き線のそれぞれの両端の波形をオシロスコープで観察すればよい。巻き線を増やすと比が変わるので電圧が上がるのが観察できる(図 2-B)。



(a) 2つのコイルを並べると磁束を共有でき (b) 環状のコアにコイルを巻くと磁束もれが少ない

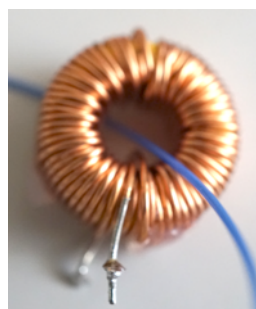


(c) 電源トランスにはコアを薄い鉄板を重ねて作ったものがよく使われる

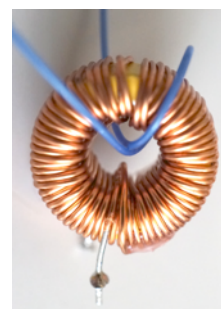
図 2-2 2つのコイルを磁束を共有するように置くと1つのコイル(左)が作った磁束変化が他方(右)のコイル内で発生する。この磁束変化を妨げるよう右コイルに電流が流れる。AのコイルとBのコイルの巻き数比で、電圧の比を変えられるので適切な巻き数比にして、交流電源をAのコイル(一次側という)につなぎ、Bのコイル(2次側という)に負荷をつないで、交流電源の電圧を負荷に合わせた電圧に変換できる。(a)のようにコイルを並べただけだと磁束のもれが大きいので、(b)のように環状のコアに磁束を閉じ込め、コアにコイルを巻くことが多い。電源トランスの場合には安価な鉄をコアに使うため、薄い鉄板を重ねて作ったコア(c)がよく使われる。



(a) コイル

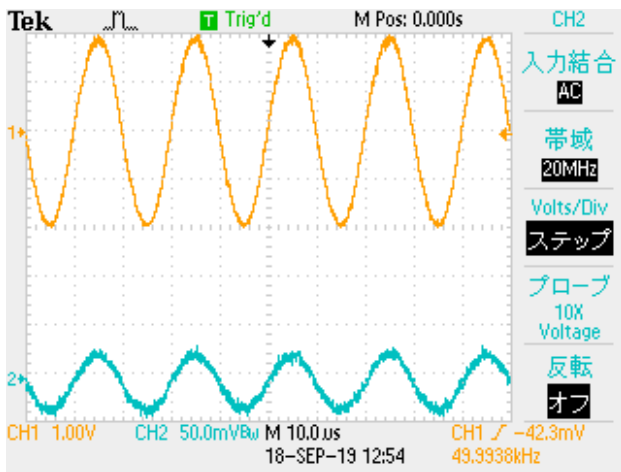


(b) 1回巻き

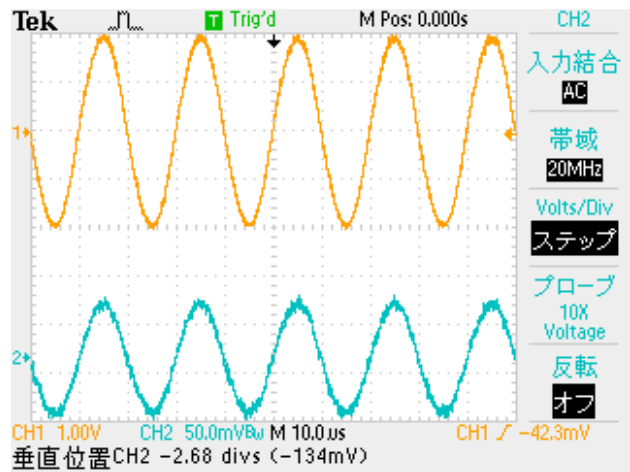


(c) 2回巻き

図 2-A (a) トロイダルコアに電線が巻かれたコイルに (b) 電線を1回通すと1回巻き、(c) 2回通すと2回巻きになる。



(a) 1T 巻き



(b) 2T 巻き

図 2-B 上記の写真のコイル(75 回巻き)のもとからある巻き線に 50kHz の正弦波をかけたときの(a)1 回線を通したときと(b)2 回線を通したときの追加巻き線両端の電圧の様子。75 回側の電圧が $4V_{p-p}$ (p-p は波形の最大の電圧と最小の電圧の差であることを表す)であるのに対して理論通りなら 1T 巻きでは $53mV_{p-p}$ で 2T 巻きでは $107mV_{p-p}$ になる。オシロスコープで観察される波形はほぼ理論通りに電圧が変化している。

2.7 まとめ

発電所と電気を利用する場所が離れているときには高い電圧で送電することで電気エネルギーが送電中に熱になる量を減らすことができます。そのための電圧変換にトランスを利用出来る交流電源が使われるようになりました。半導体などの進歩により現在は直流送電にもメリットがあると言われています。将来は直流送電が本格化するかもしれません。

3 交流電源の電圧、電流、電力

3.1 交流電源の電圧、電流、電力

波形が正弦波の交流電源の電圧 $v(t)$ は

$$v(t) = V_1 \sin 2\pi ft$$

で表されます。 V_1 は定数、 f は周波数、 t は時刻です。

負荷が電気抵抗の場合、負荷の抵抗値を R とすると流れる電流 $i(t)$ はオームの法則により

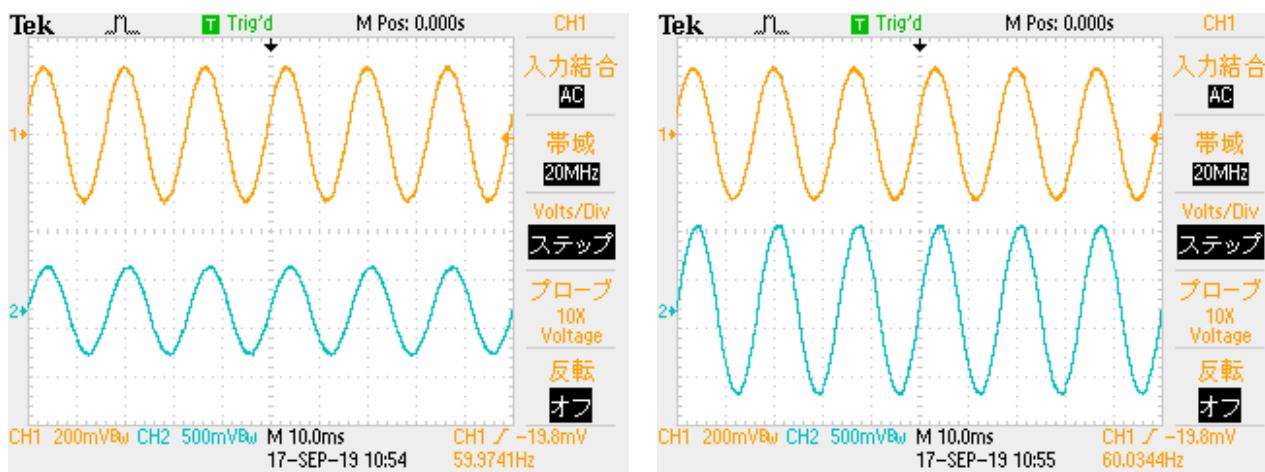
$$i(t) = \frac{V_1}{R} \sin 2\pi ft$$

で求められます。白熱電球や電気ヒーター（半田ごて内蔵のものなどを含む）は抵抗として計算できます。ヒーターの場合の電源電圧と流れる電流の時間変化を図 3-1 に示します。電流を見るにはカレントトランス図 3-2 を使っています。理論通りの波形になっています。

抵抗で消費される電力 $P(t)$ は

$$P(t) = v(t)i(t) = \frac{V_1^2}{R} \sin^2 2\pi ft = \frac{V_1^2}{2R} (1 - \cos 4\pi ft)$$

と計算できます。このように交流電源の場合は抵抗に流れる電流は時間と共に変化し電力も変化することが分かります。



(a) 300W 時の電源電圧の時間変化（上）と流れる電流の時間変化（下） (b) 600W 時の電源電圧の時間変化（上）と流れる電流の時間変化（下）。300W 時の倍の電流が流れている。

図 3-1 電源電圧と電気コンロ(300W/600W 切り替え型)に流れる電流の時間変化。電圧は電圧測定モジュール、電流はカレントトランスを使用して観察。カレントトランスは ZMCT118F (Nanjing Zeming Electronic Co., Ltd 製, 30A/30mA(負荷抵抗 50Ω時))で 1 次側に 2 ターン巻き、負荷抵抗 51Ω。



(a) ZMCT118F



(b) 2 ターン巻いたところ

図 3-2 (a) カレントトランス ZMCT118F の外観, (b) 中央の穴に電線を 1 回通すと 2 次側の巻き数が 1 ターンになる。写真は 2 ターン巻き。

3.2 実効値（実効電圧、実効電流）

時間と共に電力が変化するのは扱いは難しいので負荷に直流をかけたときの電力と平均電力が同じになる電圧を実効電圧とよび、それから求められる電流を実効電流と呼びます。

$$(\text{平均電力}) = (\text{実効電圧}) \times (\text{実効電流})$$

の関係があります。実効電圧、実効電流を実効値と呼びます。実効値を使うことで100Vの交流電源と100Vの直流電源で負荷が抵抗のときには同じ電力が消費されることとなります。実効電圧とさきほどの V_1 (最大電圧、尖頭電圧)は次の関係があります(計算で求められます)。

$$(\text{実効電圧}) \times \sqrt{2} = V_1$$

コンセントの電圧は実効電圧で表しています。コンセントの電圧は100Vですから実は最大で141Vの電圧になっています。

3.3 抵抗以外の負荷

蛍光灯やモータ、LED電球あるいはACアダプタのような負荷がつながっているときには電流が抵抗の時と違って3.2でオームの法則から求めた式のようになりません。また電圧が低いときに電流が多く流れるといったことが起こります。図3-3は蛍光灯を使った電気スタンド(17W)に流れる電流の波形です。そこで、皮相電力(VA)を使うことがあります。これは

$$(\text{皮相電力[VA]}) = (\text{電圧の実効値[V]}) \times (\text{電流の実効値 [A]})$$

で求めます。この値は白熱電球などの場合は電力と一致し、蛍光灯、LED電球、モーター、パソコンなどでは一致しません。皮相電力には本当に負荷で使われる有効電力とそうではない無効電力が含まれます。電力使用量を測る電力量計では有効電力だけを測るようになっています。電気料金としては無効電力が大きくても変わりはないのですが、無効電力の電流も電線に流れるので送電線に流れる電流が無駄に増えてしまいます。そのため無効電力を減らしたパソコン用の電源(高力率電源)なども売られるようになっています。

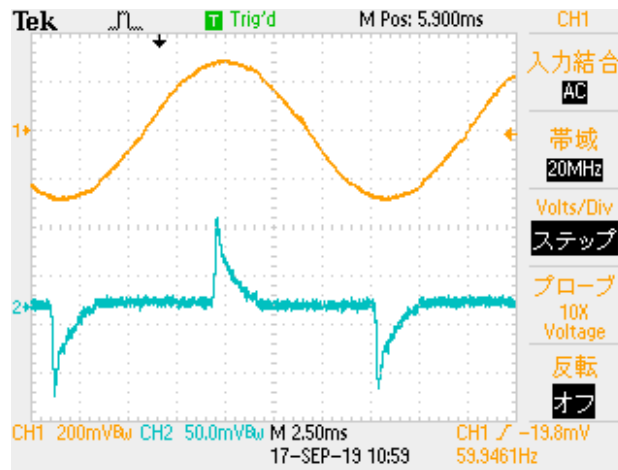


図 3-3 電球型蛍光灯(12W)を使った電気スタンドに流れる電流の波形。電圧の高いところだけで電流が流れている。電圧は電圧測定モジュール、電流はカレントトランスを使用して観察。

4 交流電源の電圧と周波数が決まっている理由

日本の家庭にとどく交流電源の電圧（実効電圧）は主に 100V です。エアコンや IH クッキングヒーターなど消費電力の大きい機器を使うための 200V も最近では利用されています。また電圧の変化する周波数は東日本が 50Hz、西日本が 60Hz になっています。これは最初に東京と大阪に輸入された発電機の周波数が違ったためです。電圧や周波数は国によって違いますが、多くの国で一度決めたものを変えることはありません。その理由を考えてみましょう。

4.1 電源の電圧が変わるとどうなるのか

乾電池を直列に繋ぎ電源の電圧を高くすると豆電球が明るく光り、モータが速く回る経験がある人もいることでしょう。電源の電圧が高くなると白熱電球は明るくなり、ヒータはより強く熱を出します。高すぎると電球が切れたり、ヒータの過熱で火災につながることもあります。一方で低くなると電球は暗く、ヒータは発熱が少なくなります。パソコンやテレビなどは多少電圧が違って動くこともありますが、不安定になったり壊れてしまうことがあります。ですから多くの電気製品が普及した現在では故障や事故の原因となる電源の電圧変更は難しいのです。

問題 4-2：スライダックを通して白熱電球やヒーターを繋ぎ電圧を変えて明るさや発熱がどのように変化するか確かめてみよう。電圧を 100V より高くしないこと。故障の原因となるので蛍光灯や PC などとはつながないこと。

4.2 電源の周波数が変わるとどうなるのか

白熱電球やヒーターのようにジュール熱を使う機器の場合には電源の周波数が変わっても問題はありません。電力は周期的に 0 になっていますが温度の変化はそれよりもゆっくりしたものになるよう作られているからです。

一方で時計（電子レンジや洗濯機などに使われる機械式のタイマーを含む）やモータによっては電源の周波数に合わせて作られているものがあります(図 4-1)。電力会社から供給される電源の周波数が安定していることを利用しています。今は少なくなりましたが、波の数を数えて動くデジタル時計があります。蛍光灯にも電源の周波数に合わせて設計をしているものが使われています。また交流モーターの中に電源の電圧変化に合わせて回転するモータがあり、それを使って回転速度を決めている機械があります。身近なものでは換気扇や扇風機（交流モータタイプ）があります(表 4-1)。換気扇や扇風機の場合は、周波数で消費電力と風の強さが変わる程度ですが工場などでは周波数が変わると機械が設計通りに動かないことがあります。そのため、一度決めた周波数を変えることも電圧を変えるのと同様に難しく、現在でも東日本と西日本で周波数が違ったままなのです。



図 4-1 使用する電源周波数が決まっている電子レンジの例。購入時に使用周波数を選ぶ。
(<https://www.irisplaza.co.jp/index.php?KB=SHOSAI&SID=H509210F> より)

表 4-1 電源周波数で消費電力と回転数が変わる扇風機の例（ユアサプライムズ株式会社 扇風機 YT-3211R の説明書より）

定格電圧 (V)	定格周波数 (Hz)	消費電力 (W)	回転数 (r/min)	風速 (m/min)	風量 (m ³ /min)	首振り角度 (度)	電源コード長 (m)	質量 (kg)
100	50	35	1,040	180	30	約75°	1.6	3.1
	60	37	1,080	180	30			

4.3 交流電源の周波数を変えることは難しい

トランスのような簡単な構造の部品で交流電源の周波数を簡単に換えられたら家庭毎あるいは機器毎に周波数を選んで引っ越しなどで便利になるかもしれません。しかし残念ながらそのような部品はありません。周波数を変えるにはインバータとよばれる回路を使います。最近ではインバータ回路の利用が一般的になり、インバータで周波数を変えてエアコンや冷蔵庫、洗濯機、電車などの交流モータを回す仕組みが使われるようになってきています。しかし、低価格にするため電源周波数を決めて設計された機器を別の周波数の電源で利用出来るようにインバータを利用するのは主に費用の面で実用が難しいのです。

4.4 交流電源の電圧と周波数を一定にするために電力会社は調整している

自転車で乗って坂道を登るのはつらく（負荷が大きく）、降りるときには楽（負荷が少ない）ですよね。楽なときにはスピードが出てライトを点灯しているときは明るくなります。同様に交流電源を作っている発電機は必要とされる電気エネルギーの量が多いときには負荷が大きく発電機の燃料（火力発電の場合）を増やさないと、電圧が低く周波数も低くなってしまいます。一方で必要とされる電気エネルギーの量が少ないときには燃料を減らさないと電圧が高く、周波数が高くなってしまいます。電圧や周波数が変わってしまうと事故につながるので電力会社では常に必要とされる電気エネルギーの量（需要）に合わせて発電するように調整をしています。

4.5 自然エネルギーの利用が増えると

太陽光発電や風力発電など自然エネルギーの利用が増えると発電量が天候によって大きく、ときには急に変化してしまいます。そのため電力会社では必要とされる電力だけでなく、自然エネルギーの発電量に合わせて火力発電や水力発電の量を調整するようにしています。しかし、調整できる範囲を大きく拡大することが難しいため、太陽光発電が増えた現在では電力会社が苦勞しているというニュースも報道されるようになりました。

5 モーターの仕組みを知ろう

モーターはフレミングの左手の法則を利用しています。磁界のあるところに電線を置き電流を流すと電線は力を受けます（図 5-1）。これを利用したのがモーターです。

5.1 ブラシ付き直流モーターの仕組み

図のように永久磁石を置き、コイルにブラシを通して電流を流すとコイルは回転を始めます。ある程度回転するとコイルはブラシから離れますが勢いがついているので回転を続けます。回転を続けるとコイルは再びブラシと接触し電流が流れます。これを繰り返すことで回転します。実用的にはコイルの巻き数を増やし、コイルの中に鉄芯を入れたりします。また3つ以上のコイルをブラシで切り替えるようにしています。コイルとブラシが接触しているので次第にブラシが摩耗するので、ブラシの摩耗により寿命が決まりますが、構造が簡単で扱いやすいことから多く使われています。

永久磁石の代わりに電磁石とし外側の電磁石を交流電源で駆動するブラシ付き交流モーター（直流でも回るのでユニバーサルモーターと呼ばれる）もあり、掃除機、電気ドリルなどの電気工具、ジューサー、ハンドミキサーなどに使われています。

5.2 アラゴの円板（交流モーターの原理）

誘導交流モーターなどでは交流で作った磁界の中にコイルを置き、コイルに磁界で出来た電流が流れることで回転します。磁界の中においたコイルにはブラシ付きモーターのような外からの電源はつながっていません。ほんとうにこれで回るのでしょうか。少し原理は違いますが面白いものにアラゴの円板があります。強力な磁石で作った磁束を動かすとアルミ板がついて動くというものです。磁束を動かすとアルミ板に渦電流が発生し、それによってフレミングの左手の法則によってアルミ板が動くのです。

問題 5-1: <https://hegtel.com/arago.html> をみてアラゴの円板の実験を試みください。

5.3 磁界を交流で回す

アラゴの円板の実験では手で磁石を動かしていますが、磁石ではなく電磁石にして磁束を動かすことは出来ないのでしょうか。動かすことが出来れば交流モーターになります。

5.4 まとめ