

小島 英夫 (静岡大学) 訳

Japanese translation rights arranged with VAAP through Japan Soviet Copyright Center, Tokyo.

1. ローレンツ力とホール効果 A. チェルノウザン (1989, No.3, pp. 46-49)

「磁場」という言葉を学んだ時に、あなたは2種類の力と出合った筈である。その一つはローレンツ力であり、もう一つはアンペール力(電流が磁場から受ける力)である。ローレンツ力は磁場から運動している荷電粒子に働く。磁場の中に有るのが一個の運動している電荷でなく電流の流れている導体のときには、導体にアンペール力が働く。

アンペール力は容易にローレンツ力から導かれる。それには、導体中の電流が自由電荷、例えば電子の秩序のある運動(集団運動)にほかならない事を思い出せばよい。それぞれの電子にはローレンツ力が働き、それらの力の合力がちょうどアンペール力になる。

一見したところ、事柄は簡単に見える。しか

し、注意深く観察すると、問題があることが分かる。例えば、自由電子に働く力がどのように導体全体にく伝わるのか理解できないことが示される。電子が自由であると、それらは結晶格子と相互作用せず、したがって結晶にどんな作用も及ぼすことは出来ない。本当にそうだろうか?

実際に、電子が結晶格子と全く関係ないと仮定してみよう。すると、非常に短い時間の内に全ての電子は導体から飛出してしまふ筈である(電子の速さは充分大きい)。明らかにそんなことは起こらない。なぜかと言うと、そのとき巨大な正の電荷が現れるからである。実際、導体の表面の薄い層で電子に強い電場が働き、電子が外へ飛出すのを妨げる。電子は導体の中に閉じ込められているようなものである。

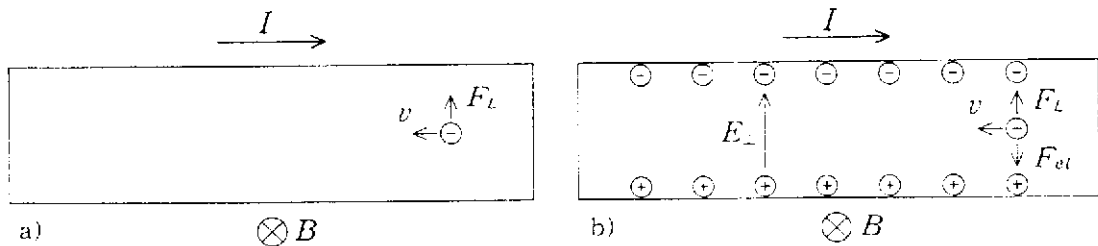


図1 a) $\otimes B$

b) $\otimes B$

電流の流れている導体を、電流の向きと垂直な磁場の中に入れたとしよう(図1(a))。電子にはローレンツ力が働き、電子は導体の上端に向かって移動する。その結果、上端には負の電荷が溜まる。導体は全体として中性であるから、導体の下端には過剰な正電荷が現れる。この過程は非常に短い時間で終わり、全電子のほんの一部が境界に

集積するにすぎない。何故だろうか?

事情はこうである。導体の端に集積した電荷は導体の内部に、磁場に垂直な電場(横電場)を生ずる(図1(b))。容易に分かるように、電子に対するこの電場の作用はローレンツ力と反対向きである。これらの二つの力が釣り合ったとき、導体の端への電子の運動は終わり、導体に沿っての定常的な電子の流れが続く。

この様にして、とにかく自由電子に働くローレンツ力が導体全体に働く力となる機構を理解す

¹導体中には縦電場も存在する。縦電場は電流を流し続ける役割をしている。

ることが出来た：その際の〈変換器〉は導体の両端に集積した電荷である。しかし、注意しよう！ときどき起きることだが、われわれは他の重要な物理現象を知らずも考察していたのである。すなわち：電流の流れている導体を磁場の中に入れると、導体の中には電場 E_L ができる。電場の向きは電流および磁場の向きに垂直である。この注目すべき効果は、アメリカの物理学者 E. ホール (Edwin Hall) が1879年に発見し、研究したもので、現在かれの名前をつけてホール効果と呼ばれている。

なぜホール効果が注目すべきなのかを理解するために、もう少し詳しくこの効果を調べてみよう。まず、導体の両端に生ずる電位差 $\Delta\varphi_H$ (ホール電位差と呼ばれる) を計算する。既に述べたように、電荷の集積過程はローレンツ力 $F_L = evB$ が静電気力 $F_{el} = eE_L$ に等しくなったときに終わる：

$$evB = eE_L.$$

ここで、 v は電子の集団運動の平均の速さ、 B は磁気誘導の大きさ、 E_L は横電場の大きさである。これからホール電位差が得られる：

$$\Delta\varphi_H = E_L d = vBd.$$

ここで、 d は導体の厚さである。電荷の集団運動の平均の速さは、電流の大きさ I 、導体中の自由電子の密度 n 、および導体の横断面積 S で表される：

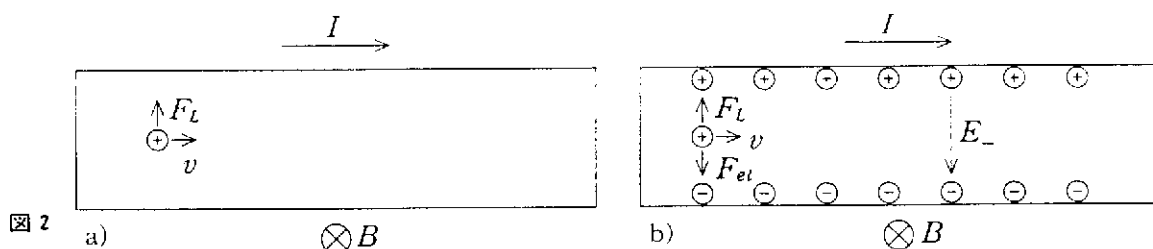
$$I = envS, \quad v = \frac{I}{enS}$$

したがって、最終的に次の式を得る：

$$\Delta\varphi_H = \frac{d}{enS} IB.$$

この式を見ると、ホール効果を用いる基本的な可能性を、容易に理解することが出来る。その幾つかを考察しよう。

1. ホール効果は磁気誘導を測定するのに用いることが出来る。その為には、小さな導体を用意し (ホール素子と呼ばれる)、その導体の $\Delta\varphi_H$ と IB を関係付ける比例係数を、既知の (基準) 磁場を使って決定する。それから、測定したい磁場の中にホール素子をいれ、電流とホール電位差を測定すれば、それらのデータから B が計算できる。
2. ホール電位差の測定結果は、ホール効果を使った基準磁場強度の決定に利用される。
3. ホール効果は伝導性物質の物理的性質の研究において重要な役割をする。これがホール効果の応用の中で最も重要である。実際、 $\Delta\varphi_H$ 、 I および B を測定することによって、種々の条件下での物質中の自由電荷担体の密度のような重要な特性量が計算できる。この密度は原子の密度と同程度である事が期待される。なぜならば、自由電子は結晶格子の原子から〈飛出す〉のだから、この予想は多くの金属に対しては正しい。しかし、半導体に対しては当てはまらない。この場合には、自由電荷の密度は桁違いに小さく、更にそれは温度に強く依存する。例えば、一個の自由電子が一万個あるいは百万個の原子にさえ対応する！しかし、もっとも予想外の結論は次のことである：実験結果によれば、多くの半導体の中の自由担体の符号は正でなければならない！



この結論はどのように説明したらよいのだろうか？ 明らかに、われわれの知っている全ての電氣的な流れの現象 (熱的、磁氣的など) は電荷担体の符号には依存しない、つまりすべてが電流の大きさだけに依存する。ホール効果だけが電荷の符号に依存する。図 2(a) を見てみよう。電荷が正であると、電流の向きが同じとき電荷担体の速

度の向きは前 (図 1) とは逆になる。電荷の符号が変わると速度の向きは変わるがローレンツ力は変わらず上向きである。すなわち、この場合には導体の上端に、負ではなく正の電荷が集積し、ホール電位差 $\Delta\varphi_H$ は符号を変える (図 2(b))。

この様な現象は、異常ホール効果と呼ばれ、実験的に発見された。電流が正の電子によってつく

られているように見えた！ 実際には後に明らかになったように、半導体における異常ホール効果は伝導が正孔による場合であった。

最後にもう一つの事を述べておこう。異常ホー

2. 電磁波はどのように発振されるか

電波——すなわち一定の振動数の電磁氣的振動——を発振する為にはその前に、その振動を作る必要がある。それには減衰しない振動を出す発振機を使えばよい。しかし、発振機から離れたところに、電磁氣的振動を存在させるにはどうしたらよいか、それがこの記事の主題である。

問題を具体的に考察しよう：減衰しない振動を出す発振機の出力側に何を接続したら、電磁波がそこから出てくるのだろうか？ この問題は易しくはない。しかし逆に、どのような素子を接続すると発振アンテナとして明らかに役に立たないかは、容易に推測できる。例えば、抵抗である。抵抗を発振機の出力側に接続すると、発振機から得られる全てのエネルギーは熱になってしまう。コンデンサーもアンテナとしては使えない——コンデンサーが発振機から得る平均エネルギーは厳密に零である（電圧と電流の間の位相差が周期の1/4に等しいから）。つまり、コンデンサーは何も送り出さない——電磁波を発振する際には、その源からエネルギーが全ての方向に伝わる筈である。誘導コイルについても全く同じことが言える。

そういうわけで、発振機からエネルギーが失われるためには、電流と電圧の間の位相のズレを変えなければならない——位相差は周期の1/4であってはならない。それには、例えば、コンデンサーと抵抗を直列に接続することが考えられる。しかし、それでは我々の目的には役に立たない：この場合、回路は負荷（コンデンサーと抵抗）を含んでおり、発振機からエネルギーを受け取るが、それは全て完全に熱になってしまう。その事を読者自ら確かめていただきたい——このような単純な回路ではなにも難しいことはない。任意のLCR回路（例えば図1の）にたいしても、このことが明らかに成り立つ：回路が電源から受け取る全てのエネルギーは熱になる。この場合には、瞬間出力の時間依存性は次の形になる：

$$p = u(t)i(t) = U_0 I_0 \cos \omega t \cdot \cos(\omega t + \varphi).$$

ル効果が説明されてから何年か後で、2次元電子層と呼ばれる試料に於いて、全く予期されなかった、ホール効果の注目すべき特性が発見された。その説明には量子論が必要であった。

A. ラファイロフ (1991, No. 11, pp. 33-35)

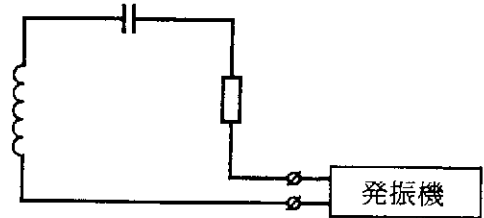


図1

ここで、 φ は電流と電圧の間の位相差である。三角法を使った簡単な変換により、一周期に（あるいは長い時間間隔における）電源からの平均出力は、次のようになる：

$$P_{av} = \frac{1}{2} U_0 I_0 \cos \varphi = UI \cos \varphi.$$

これはまた、ちょうど熱に転換されるエネルギーに等しい。

ここで、次の事に注意しておこう。瞬間出力の最大値は、位相のズレが 90° に近いとき平均出力 P_{av} よりも著しく大きい。すなわち、電源は平均的に失うエネルギーよりも著しく大きな瞬間出力を発生することが出来る状態になければならない。このような状況は、現実に電気工学においてしばしば現れる——蛍光灯、モーターを接続したときなどに、蛍光灯の場合には、そこを流れる電流は直列に接続された誘導コイルに入り 90° に近い位相差を生ずる（図2）。熱の形で余分な損失に導く電気回路にたいする過度の負荷は極めて好ましくない。断面積の大きな導体を用いなければならない。適当な容量の（つまり共鳴するように調整する必要がある！）並列なコンデンサーをつかって、状況を修正できる。そのとき、コイルとコンデンサーは周期毎にエネルギーを交互に交換する——〈余分の〉エネルギーはそれらの間で移動し、回路——負荷にエネルギーを供給する電源——は熱に変換されるエネルギーだけを与える。

そういう訳で、この種の回路（LCR-回路）はアンテナとしての役には立たない。問題は、回路の電圧と電流の間の位相差を 90° からズラし、しかも熱の発生をしない、すなわち抵抗を使わないに

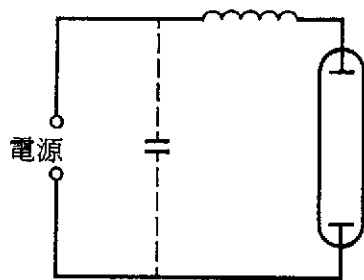


図 2

はどうしたらよいか、ということである。負荷の回路素子の寸法が波長に較べて小さいならば、どうにもしようがないことは明らかである。負荷素子の寸法が大きいときには、波の伝搬の遅れのために、余分の位相差が得られる。

負荷としてコンデンサーを使うことにし、その抵抗は(考えている振動数の交流にたいして)与えられた電源に対して最適化されているとしよう。ここでコンデンサーの横断面を変えて遅延を大きくし始める。しかし、コンデンサーの極板の寸法を単純に大きくする訳にはいかない——その容量が大きくなってしまうから、容量を変えないためには極板間の距離をも大きくすればよい。厳密に言うと、寸法の大きなコンデンサーは——もはやコンデンサーではない。このときの位相のズレは、違う種類の回路のものに相当し、抵抗が無く、熱が発生しないのに電源からの出力は失われる。したがって、電源からのエネルギーはどこかへ行かなければならず、つまり——空間へ放射される。

最大の放射効率を得るためには、アンテナの寸法と構造を最適化する必要がある。例えば、長く細い2本の棒で出来たアンテナがあったとすると——それらの棒の最適な長さは波長の1/4で、2本の棒は一直線上にあり、そして非減衰振動の電源の出力は図3に示すように接続されなければならない。このようなアンテナはテレビの受信用にしばしば用いられている。実際には、受信用と送信用のアンテナは違うものではない(非常に強力な送信機にたいしては、送信のためにアンテナに供給される高電圧と大電流のための、特別な送信用アンテナをつくる必要がある)。

もしアンテナの寸法が正しく選ばれていれば、電波の送信の電源には〈過剰な〉負荷は生じず、電源から得られたエネルギーは空間へ放射される。しかし、この期待は定常的な放送局にたいし

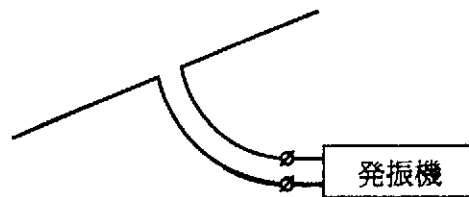


図 3

て、極度に低い周波数を除いて(波長があまり長くないとき)だけ容易に満たされる。移動放送局の場合には、最適化がいつでも可能な訳ではない——アンテナは電源に対する最適条件が必要とするより短くならざるを得ない。このような場合には、アンテナに誘導コイル(延長コイルと呼ばれる)を直列に接続し、電源の〈一部を補完する〉——短いアンテナ導体の容量抵抗をコイルの誘導抵抗で補償する——ことができる。

アンテナはまた何本かの導体で作ることができる。それらの導体の長さや配置を選択し、電源から必要な位相を持つ電流を供給することによって、必要な方向に選択的に放射するようにできる(〈指向性〉アンテナ)。これは、干渉効果を技術的目的に利用した例である。

都合のよいことに、全ての導体を電源に接続する必要はない——我々の目的には一次アンテナの電磁場の中に置かれた導体に生ずる電流を検出できれば充分である。これらの事実は受信アンテナにも当てはまり、受信アンテナは、基本導体である〈共鳴子〉(この言葉の起源は明らかであろう)と幾つかの付随的な導体とからなり、それらは厳密に決められた寸法や配置を持つ必要はない(それらは〈指向器〉や〈反射器〉とよばれ、その数や精度はアンテナの指向性に依じて調整される)。

複雑なアンテナの構造は、一つの厳密に決められた振動数に合わせてだけでなく、ある領域の振動数に対しても調整され得ることは明らかである。それは、例えばテレビの受信の為に必要なことである——なぜならば、各チャンネルにそれぞれのアンテナを用意するのは煩わしいから。しかし、各チャンネルの周波数が著しく違っていたり、アンテナが送信所から非常に遠かったりすると、なんらかの特別に設計されたアンテナを使う必要が出てくる。

(訳 こじま ひでお)