

磁束と電荷を結ぶ新しいデバイスの探索

----電気回路のための第四の基本素子とは----

雨宮好仁 (北海道大学 情報科学研究科)

電気回路の基本素子として「抵抗, キャパシタ, インダクタ」の三つはよく知られている。それでは、これらに加えて「第四の基本素子」というものがあるだろうか？ この素子はメモリスタという仮称のもとに、最近いろいろと話題をまくようになった。もし存在するならば磁束と電荷を結ぶ新しいデバイスと予想されるが、現在のところまだ見つかっていない。

Keywords: magnetic flux, charge, circuit element, electron, spin, memristor

1. まえがき

「磁束と電荷を結ぶ電子デバイス」というものについて考えてみよう。このデバイスは、電荷を与えると磁束を発生し、磁束を与えると電荷を発生する素子である。

このデバイスは「抵抗, キャパシタ, インダクタと並ぶ4番目の電気回路素子」として、その存在の可能性が以前から議論されていた。このような素子は存在するかもしれないが、今のところは見つかっていない。あとで述べるように、この素子は他の3素子と比べてかなりイメージが異なっている。それゆえ、いろいろ考えていくと奥の深いものがあり、仕事の合間のコーヒータイムにちょっと思考してみるのも面白い。ここでは、この素子の背景を振り返るとともに、実現のための方法を考えてみよう。

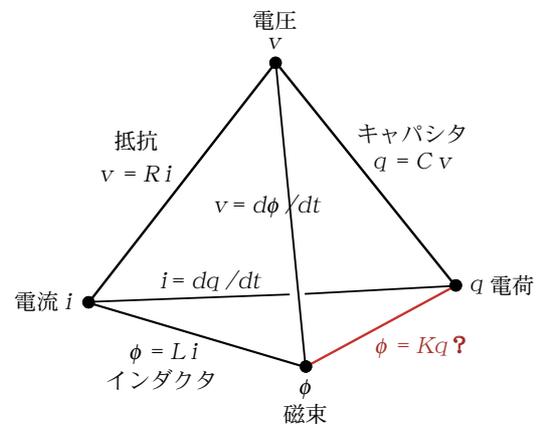


図1 電気回路の4変数とその相互関係を示す四面体 ($v-\phi$ の関係はレンツの法則と対応させて $v = -d\phi/dt$ と表すことも多いが、ここではマイナス符号を省略。)

2. 第四の電気回路素子とは

2.1 変数四面体と6番目の辺

電気回路における基本の物理変数は、電圧 v 、電流 i 、電荷 q 、および磁束 ϕ の四つである (図1)。これらを相互に結ぶ関係は四面体の各辺に対応する六つであり、うち五つはすでに知られている。それらを表1に示す。このうち3辺 qv , vi , および ϕi にはそれぞれ二端子の素子が対応している。たとえば辺 qv (電荷-電圧) の関係では、比例係数が容量 C 、それに対応する素子がキャパシタである。同じように、辺 vi には抵抗素子、辺 ϕi にはインダクタが対応する。他の2辺は素子対応とはいえないが、辺 $v\phi$ の関係は変圧器の二次側などに見られ、辺 iq の関係はすべての回路節点で成り立つので、いずれも回路上の現象には対応している。

ここで興味の対象は図1の6番目の辺 ϕq 、すなわち磁束 ϕ と電荷 q をつなぐ関係である。これを抵抗・キャパシタ・インダクタの存在から連想すると、次のようなことが推測される。すなわち

「磁束と電荷を結びつける $\phi = Kq$ (K は係数) という物理現象が存在し、それに対応する回路素子も存在する」

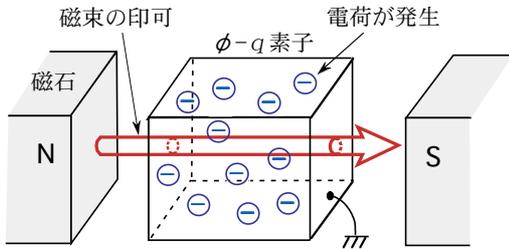
表1 基本変数を結ぶ関係と回路素子

変数の組	関係式	比例係数	回路素子
磁束 ϕ -電流 i	$\phi = L i$	インダクタンス L	インダクタ
電荷 q -電圧 v	$q = C v$	容量 C	キャパシタ
電圧 v -磁束 ϕ	$v = d\phi/dt$	$(j\omega)$	(変圧器の二次側)
電流 i -電荷 q	$i = dq/dt$	$(j\omega)$	(回路の節点)
電圧 v -電流 i	$v = R i$	抵抗 R	抵抗
磁束 ϕ -電荷 q	$\phi = K q ?$	名称未定 K	?

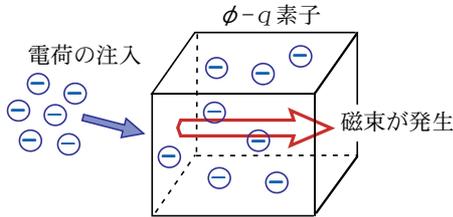
という推測である。これを言いかえて、図2のように

「磁束を与えると電荷を生じ、電荷を与えると磁束を生じるデバイス ($\phi-q$ 素子) がある」

としてもよい。このことは Chua によって最初に提唱された[1]。そのあと彼は次のように話を進めていった。



(a) 磁束を加えると電荷が発生する。



(b) 電荷を与えると磁束が発生する。

図2 磁束と電荷を結ぶデバイス (ϕ - q 素子) の動作

2.2 Chua の考え方と研究方向

以下は Chua の考え方である。いま $\phi = Kq$ という式を見ると、係数 K の単位は抵抗と同じく V/A である。したがって、対応する素子は「抵抗のようなもの」と考えられる。そこで、素子の中では $\phi = Kq$ の現象が生じているとして、素子の外には電圧 v と電流 i が $v = d\phi/dt$ と $i = dq/dt$ にしたがって現れると仮定する。そうして、 $\phi = Kq$ の物理現象に言及することなく、電圧と電流だけで素子特性を論じる。

Chua が話を電圧と電流に置きかえたことには一理ある。なぜなら、電気回路では電圧-電流を変数とする素子の方が使いやすい。たとえばインダクタが回路に使われるとき、ほとんどの場合は (ϕ - i 現象そのものではなく) ϕ を $v = d\phi/dt$ により v に置きかえた v - i 特性が利用されている。ただし、インダクタはその構造のため必ず $d\phi/dt$ の端子電圧を生じるが、 ϕ - q 素子には本来そのような必然性はない。 ϕ - q 素子でも磁束-電荷の現象にもなつて何らかの v と i が現れるかもしれないが、それらが $d\phi/dt$ と dq/dt に等しくなる理由はない。つまり Chua は、 ϕ - q 素子一般ではなく、 $v = d\phi/dt$ と $i = dq/dt$ のような電圧電流が生じる特殊な例を仮定したことになる。

さて、係数 K が定数ならば素子は普通の抵抗と同じ ($v = Ki$) になる。それでは面白くないので、 K が電荷 q により変化する場合を考える。そうすると抵抗が電荷で変化するので、この素子は

「流した電流の積分に応じて抵抗が変化する非線形の抵抗素子」

となる。電流は加えた電圧にもよるから、電圧履歴によって変化する抵抗の素子、と考へてもよい。たとえば $v = [R_0/(1 + q^2/q_0^2)]i$ のとき、素子は v - i 平面上で図3のようなヒステリシス軌跡を描く。これは一種のメモリデバイス

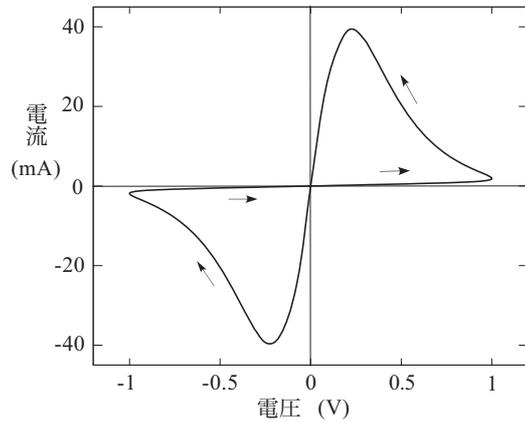


図3 メモリスタのヒステリシス特性 ($v = [R_0/(1 + q^2/q_0^2)]i$ としして正弦波の電圧 $\sin\omega t$ (V) で駆動したときの v - i 平面上の軌跡。パラメータは $R_0 = 1 \text{ k}\Omega$, $q_0\omega = 1.32 \text{ mA}$.)

といえる。Chua はこのような素子をメモリスタ(memristor) と命名し、非線形回路への応用を検討した[2]。

2.3 メモリスタとヒステリシス抵抗素子の相違

その後、このメモリスタを実現したという発表が HP 社の研究グループから出された[3-5]。正確に言うと、同グループが以前から開発を進めてきた cross-point switch というデバイスがメモリスタに相当する、という発表である。彼らのデバイスには幾つかの種類があり、一例は酸化チタン (TiO_2) の薄膜 (3-30 nm 厚) を白金電極で挟んだ二端子素子である (図4)。酸化チタン薄膜は酸素空孔 (ドナー) の多い低抵抗層と少ない高抵抗層の2層からなる。素子に電流を流すと、生じた電界により空孔がドリフトして低抵抗層から高抵抗層に入出入りする。そのため素子の抵抗が変化して記憶スイッチを生じる (見かけの上では図3と似た特性)。

しかし、このデバイスは既存の ReRAM (抵抗変化型の不揮発メモリ素子) や電気化学的積分素子と同じようなヒステリシス抵抗素子であり、メモリスタというには問題がある。磁束-電荷の物理現象が根底にないので、これをメモリスタと呼ぶことはできない。ここはやはり磁束と電荷を結ぶ物理系をキチンと探索し、それをもとに ϕ - q 素子をつくり出すべきである。次にその方針を考えてみよう。

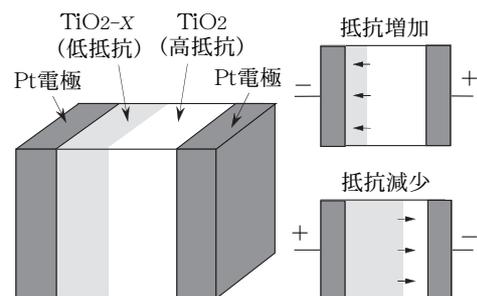


図4 酸化チタン薄膜によるヒステリシス抵抗素子

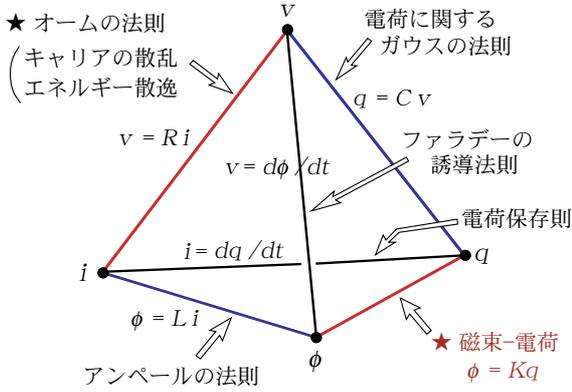


図5 変数四面体における対辺どうしの類似性

3. 磁束と電荷を結ぶ物理系をつくる

3.1 変数の関係の類似性

いま改めて図5の変数四面体を見ると、2組の対向辺どうし (qv と ϕi および $v\phi$ と iq) はそれぞれ以下のように似た性質をもつ。

(i) 辺 qv の関係 ($q = Cv$) は電荷に関するガウスの法則に由来し、辺 ϕi の関係 ($\phi = Li$) はアンペールの法則にもとづく。いずれも物理変数を電磁気の基本法則で直接に結んだものであり、かつ対応する回路素子 (キャパシタとインダクタ) がある。

(ii) 辺 $v\phi$ ($v = d\phi/dt$) はファラデーの誘導法則、辺 iq ($i = dq/dt$) は電荷の保存則に当たる。これらはいずれも時間微分を含む電磁気の基本法則である。

以上から類推して、いま3組目の対向辺 vi と ϕq にも互いに似たところがあると想像してみる。はじめに辺 vi をみると、これが示す抵抗現象 ($v = Ri$) は電磁気の基本法則だけで生じるのではなく、走行するキャリアと物質との相互作用が関与している。すなわち、キャリアとフォノンや原子との衝突とエネルギー散逸などにより v と i が間接的に結ばれた結果として抵抗が生じる。つまり、抵抗が現れるためには適切な仕組み—舞台装置を必要とする。そこで同様に

「辺 ϕq の現象 ($\phi = Kq$) を発生させるには、何らか適切な物質やナノ構造を介して ϕ と q を結ぶ必要がある」

と考えてもよいであろう。そこで $\phi = Kq$ を発生させる舞台装置 (ϕ - q 素子) を工夫してみよう。ただし、ここで満たすべき条件がある。それは「可逆性」である。

3.2 回路素子の可逆性

抵抗素子を例にとると、電圧をかければ電流が流れ、電流を流すと電圧が生じる。そしてどちらの現象も同じ関係式 $v = Ri$ で表される。これを二端子素子の可逆性という。同じように ϕ - q 素子では、電荷で磁束が生じ、磁束で電荷が発生し、それらが同じ関係式 $\phi = Kq$ にしたがう必要がある。電荷で磁束が生じて磁束では電荷ができない、というのでは単なる電荷センサであって ϕ - q 素子とはいえない

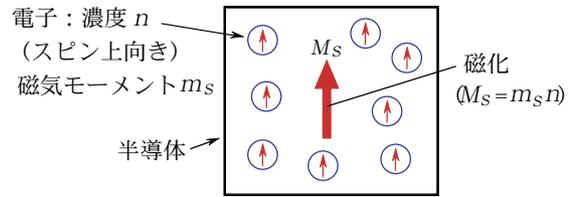


図6 偏極スピン電子が注入された半導体

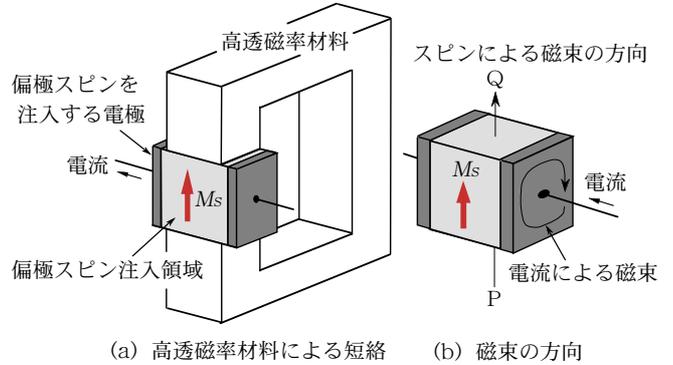


図7 高透磁率材料で短絡された偏極スピン構造

い。この可逆性を頭において $\phi = Kq$ のための物理系を考えてみる。なお「電荷の運動で電流をつくりその電流で磁束を…」という手法はもちろん反則である。

3.3 偏極スピン注入による $\phi = Kq$ の発生

スピントロニクスを利用すると $\phi = Kq$ の系ができるかもしれない。いま図6のようにスピン偏極した電子が注入された半導体を考える。電気的中性を破って濃度 n の電子が注入されているとしよう。そのとき半導体中の磁化 M_s は

$$M_s = m_s n \quad (\text{式1})$$

となる。係数 m_s は電子のスピン磁気モーメント ($= 9.28 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$) である。ここで半導体端面の磁極による反磁場が小さく無視できるならば、半導体中の磁束密度 B は

$$B = \mu_0 M_s = \mu_0 m_s n \quad (\mu_0 \text{ は真空透磁率}) \quad (\text{式2})$$

となる。磁束 ϕ は B に比例し電荷 q は n に比例するので、この構造は $\phi = Kq$ の現象を発生する場となっている。

この構造をもう少し具体的にして図7(a)に示す。スピン偏極性の電極から半導体中に電子を注入する。反磁場をなくすために、半導体の両端を高透磁率材料で磁的に短絡する。なお、スピン注入のため半導体に流す電流は単に電子を与える手段であって、素子動作の本質とは関係ない。ただしこの電流により余分な磁場ができるので、それを避けるために、素子の中心線 PQ 上で PQ 方向の磁束密度を式2の B と考える (図7(b))。この方向には注入電流による磁場は生じない。

ところで、このままでは ϕ - q 素子として完全ではなく可逆性に欠ける。つまり「磁束を加えると電荷が発生して所定の濃度に落ちつく」というメカニズムがない。しかしすぐには良い工夫を思いつかないので、ややインチキではあるが、電子回路を使って等価的に可逆としてみた。

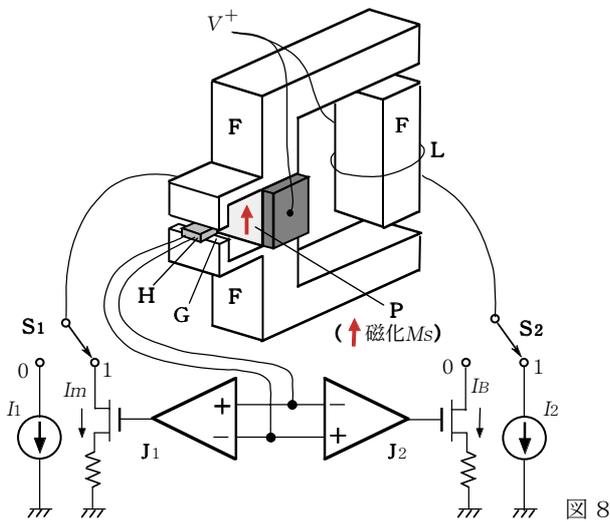


図 8

図 8 可逆性を発生させるための回路構成 (P: 偏極スピン注入領域で赤矢印は磁化, F: 高透磁率材料, G: 高透磁率材料の間隙, H: ホール素子, L: コイル, S₁ と S₂: 切換スイッチ, V⁺: 正電源, J₁ と J₂: 演算増幅器とトランジスタからなるフィードバック電流源).

3.4 電子回路で可逆系をつくる

図 7 の構造に電子回路をつけて可逆にしたものを図 8 に示す。この系は、式 2 がいつでも成立するように偏極スピン注入領域 P の状態をフィードバック制御する。つまり、高透磁率材料 F の間隙 G に生じる漏れ磁束をホール素子 H で検出し、それが 0 となるように電流源 J₁ と J₂ で P に電子と磁束を与える。漏れ磁束が 0 であれば、P 中の磁束と F 中の磁束は大きさや方向が等しい。

いま「電荷で磁束を発生させるとき」は、スイッチ S₁ と S₂ を 0 につなぎ、P に電流 I₁ を流して電子を注入する。すると電子濃度に対応する磁束が P の中に生じる。逆に「磁束で電荷を発生させるとき」は、スイッチを 1 につなぎ、コイル L に電流 I₂ を流して P に磁束を通す。するとそれに対応する濃度の電子が P に注入される。このようにして偏極スピン注入領域 P 中には可逆的な ϕ - q の場ができる。

4. 可逆的な ϕ - q 系の実現に向けて

本当の ϕ - q 素子では、もちろん素子そのものに可逆性が必要となる。ここで思考の範囲をひろげるために「電荷は分極電荷でもよい」としてみよう。そして図 9 のように磁気モーメントと電気双極子をあわせ持った分子からなる物質を考える。このような磁性誘電体では磁化と電気分極が直接に結びついているから、それだけで磁束-電荷の現象を発生できるように思える。分子の磁気モーメントを m_m 、電気双極子モーメントを p_m とおけば、反磁場がないとき横方向の磁束密度 B と上下端面に生じる分極電荷 σ との関係は

$$B = (\mu_0 m_m / p_m) \sigma \quad (\text{式 3})$$

となる。この関係は可逆的に成り立つ。こう考えると、思いのほか簡単に ϕ - q 素子ができたことになるが...

しかし改めて考え直すと、これを ϕ - q 素子というのは、やはり無理がある。そもそも分極電荷は本当の電荷ではない。

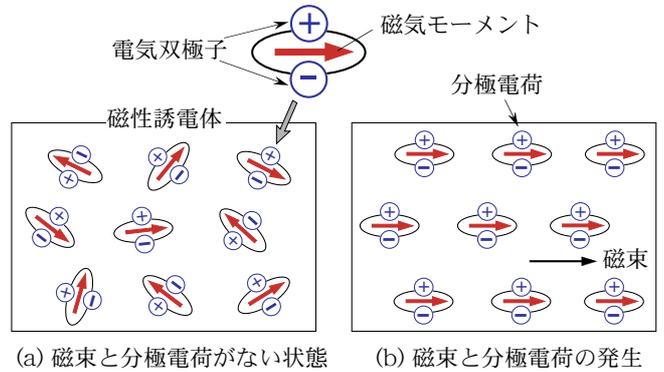


図 9 磁性誘電体による磁束と分極電荷の結合

しかも、この系の特徴は「端面に正負の分極電荷ができて電位差を生じる」ことにある。すなわち磁束をかけると電圧を生じ、電圧をかけると磁束を発生し、電圧と磁束を比例関係 $v = A\phi$ (A は係数) で結んでいる。つまり、この素子は図 1 の変数四面体の辺 $v\phi$ に対応している。

そうすると、この辺に付いていたファラデーの法則 $v = d\phi/dt$ と矛盾するようになる。しかし、変数四面体のもともとの主旨は「電気回路の変数を結ぶ素子を考えよう」ということなので、ここにファラデーの法則を持ってくる必要はとくにない。他の辺との整合で見れば、辺 $v\phi$ や辺 iq にも比例関係を当てる方がむしろ自然といえる。そうすれば、全体の話す「電気回路の 4 変数を比例でつなぐ素子を見つけよ」というスッキリした形に書きなおせる。

さて、そのように整理して再び ϕ - q 素子にもどるわけだが、実のところこの課題はかかなり奥が深く、コーヒータイムで解決できるほど簡単ではないように思われる。いろいろな物理現象を頭においてよく考える必要が出てきたので、ここでは結論のないまま筆を置くことにしたい。

文献

- [1] L. O. Chua; "Memristor—the missing circuit element," *IEEE Trans. Circuit Theory*, CT-18(5), 507-519 (1971).
- [2] L. O. Chua and S. M. Kang; "Memristive devices and systems," *Proc. IEEE*, 64(2), 209-223 (1976).
- [3] J. M. Tour and T. He; "The fourth element," *Nature*, 453, 42-43 (2008).
- [4] D. D. Strukov, G. S. Snider, D. R. Stewart, and R. S. Williams; "The missing memristor found," *Nature*, 453, 80-83 (2008).
- [5] R. S. Williams; "How we found the missing memristor," *IEEE Spectrum*, 25-31, Dec. 2008.

雨宮好仁 (あめみや よしひと)

昭 45 東工大・理工・電子卒、昭 50 同大学院博士課程了。同年日本電信電話公社電気通信研究所、昭和 62 NTT LSI 研究所、平成 5 年より北大教授。現在にいたる。工博。CMOS デバイスや量子デバイスを用いた機能的な電子回路と LSI の開拓に従事。