

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 25 日現在

機関番号：10101  
 研究種目：挑戦的萌芽研究  
 研究期間：2010～2011  
 課題番号：22656078  
 研究課題名（和文）磁束と電荷を結ぶ新しい機能デバイスの開拓  
 研究課題名（英文）Novel functional device relating magnetic flux to electric charge  
 研究代表者  
 雨宮 好仁（AMEMIYA YOSHIHITO）  
 北海道大学・情報科学研究科・特任教授  
 研究者番号：80250489

研究成果の概要（和文）：

本研究では、磁束と電荷を結ぶ素子、すなわち、電荷を与えれば磁束を生じ磁束を与えれば電荷を生じる素子の構成方法を明らかにした。この素子を実現するために、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-磁性誘電体の使用を提案して素子を設計し、理論解析により動作を予測した。磁性誘電体では磁化と電気分極が直接に結びついており、その性質を利用して磁束と分極電荷を比例関係で結ぶことにより目的の素子を構成することができる。

研究成果の概要（英文）：

We proposed a method of making a device that relates magnetic flux to electric charge, or a device that produces a magnetic flux for a given input charge and produces a charge for a given input flux. This device can be made using magnetic-dielectric materials consisting of molecules that have a magnetic moment and an electric dipole. We designed the device and confirmed its magneto-charge operation with the aid of computer simulation. The device produces flux that is proportional to given surface charge and produces surface charge that is proportional to given flux.

交付決定額

（金額単位：円）

|         | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 2010 年度 | 2,000,000 | 0       | 2,000,000 |
| 2011 年度 | 1,200,000 | 360,000 | 1,560,000 |
| 年度      |           |         |           |
| 年度      |           |         |           |
| 年度      |           |         |           |
| 総計      | 3,200,000 | 360,000 | 3,560,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：磁束 電荷 電磁回路 デバイス スピン 磁性誘電体

1. 研究開始当初の背景

電気回路の基本素子として「抵抗, キャパシタ, インダクタ」の三つがあることは良く知

られている。これらに加えて「第四の基本素子」というものがあるか否かについて、最近いろいろと議論されるようになった。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。本研究では、この第四の基本素子の構成方法を提案した。

## 2. 研究の目的

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  $\phi$  の四つである。これらを相互に結ぶ関係は図1のような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  $\phi i$  にはそれぞれ図2のように二端子素子に対応している。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  $\phi i$  にはインダクタに対応する。他の2辺  $v\phi$  と  $iq$  の関係はそれぞれインダクタとキャパシタの動作で現れる。

ここで興味の対象は図1の6番目の辺  $\phi q$ 、すなわち磁束  $\phi$  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」

という推測である。これを言いかえて

「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  $\phi$ - $q$  素子は、図2(d) のように磁束と電荷を変数とする素子である。このことは Chua によって最初に提唱された (L. O. Chua; "Memristor---the missing circuit element," *IEEE Trans. Circuit Theory*, CT-18(5), 507-519 (1971))。

この  $\phi$ - $q$  素子をつくるためにこれまで幾つかの提案が出されている (一例: D. D. Strukov, G. S. Snider, D. R. Stewart, and R. S. Williams; "The missing memristor found," *Nature*, 453, 80-83 (2008))。しかしいずれも素子動作の根底に磁束の関与がないものなので、それらを本当の  $\phi$ - $q$  素子と呼ぶことはできない。

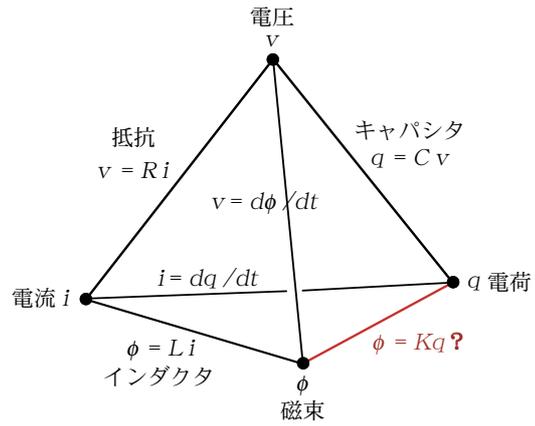


図1 電気回路の4変数とその相互関係を示す四面体

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 $\phi$ -電流 $i$ | $\phi = Li$    | インダクタンス $L$ | インダクタ     |
| 電荷 $q$ -電圧 $v$    | $q = Cv$       | 容量 $C$      | キャパシタ     |
| 電圧 $v$ -磁束 $\phi$ | $v = d\phi/dt$ | $(j\omega)$ | (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 $i$    | $v = Ri$       | 抵抗 $R$      | 抵抗        |
| 磁束 $\phi$ -電荷 $q$ | $\phi = Kq?$   | 名称未定 $K$    | ?         |

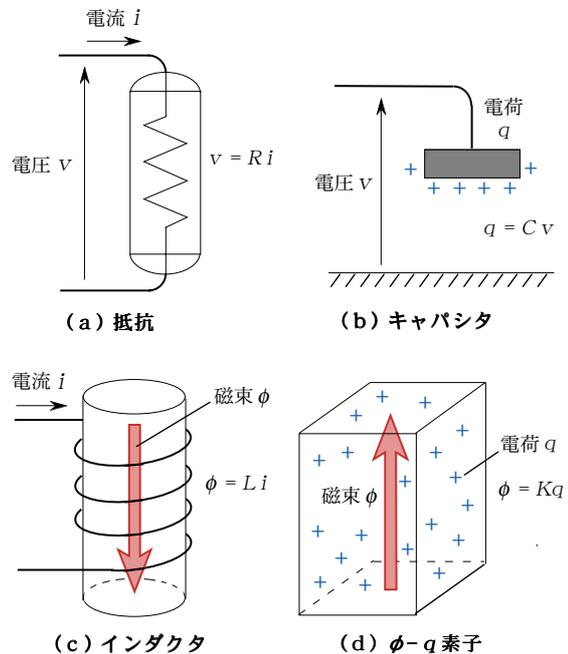


図2 電気回路の三つの基本素子と  $\phi$ - $q$  素子

## 3. 研究の方法

いま改めて図3の変数四面体を見ると、2

組の対向辺どうし( $qv$  と  $\phi i$  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  $\phi i$  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。

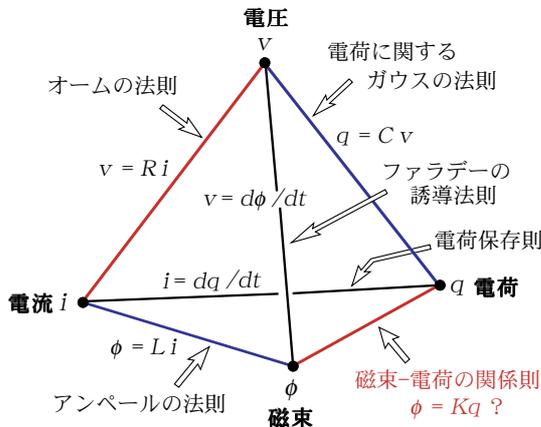


図3 電気回路の三つの基本素子と  $\phi$ - $q$  素子

以上から類推して、いま3組目の対向辺  $vi$  と  $\phi q$  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ものではない。キャリアが電界で加速され走行して物質と相互作用することが関与している。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  $\phi q$  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  $\phi$  と  $q$  を間接的に結ぶ必要がある」

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 ( $\phi$ - $q$  素子) を工夫するが、そのとき満たすべき条件がある。それは可逆性である。

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  $\phi$ - $q$  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。この可逆性を頭において  $\phi = Kq$  のための物理系を考えた。

#### 4. 研究成果

第一の方法として、電子のスピンを利用すれば  $\phi$ - $q$  素子を実現できる可能性がある。電子はそれ自体で微小な磁石の性質を持っており、それを電子スピンという。電子がたくさんあってもスピンの向きがバラバラならば磁束は生じないが、強磁性体の中のようにスピンの向きがそろえば磁束が発生する。いま図4のように半導体中に電子を注入し、そのスピンによって磁束を発生させる。スピントロニクス技術を使うと、スピンの向きをそろえて電子を注入する偏極スピン注入ができる。半導体が細長ければ端面の磁極による反磁場が無視できて、半導体中の磁束密度  $B$  は

$$B = \mu_0 m_s n$$

となる。ここで  $n$  は電子の濃度、 $\mu_0$  は真空透磁率、 $m_s$  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。磁束と電荷はそれぞれ  $B$  と  $n$  に比例するので、半導体の中では  $\phi = Kq$  の現象が発生している。

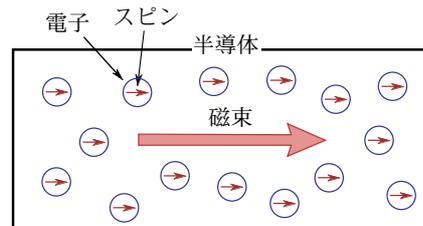


図4 そろった向きの電子スピンの注入された半導体

ただしこれだけではまだ十分ではない。 $\phi$ - $q$  素子と呼べるためには「電荷を与える」と磁束 ( $\phi = Kq$ ) が生じる」だけでなく、それとは逆に「磁束をかけると電荷 ( $q = \phi/K$ ) が発生する」という可逆性も必要である。そこで偏極スピン注入の動作を可逆にする方法を検討したが、それを研究期間

内に提案することはできなかった。

素子実現のための第二の方法として、磁性誘電体の使用を考えた。いま電荷の概念を拡張して「電荷は分極電荷でもよい」とする。そして図5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。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  $\sigma$  との関係は

$$B = (\mu_0 m_m / p_m) \sigma$$

となる。この関係は可逆的に成り立つので、磁性誘電体により  $\phi$ - $q$  素子が構成できる。

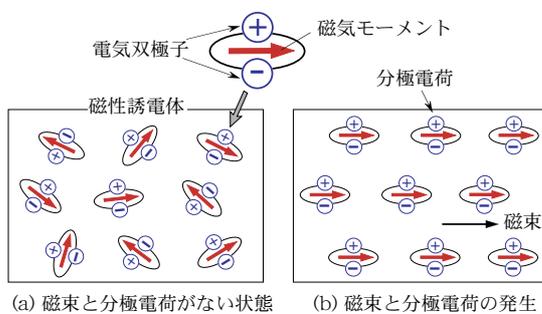


図5 磁性誘電体による磁束と分極電荷の結合

図5のように磁気モーメントと電気双極子モーメントが直交した分子を使うと、磁束が左右方向のとき分極電荷は上下面に発生する。それに対して磁気モーメントと電気双極子モーメントが平行の分子では、左右方向の磁束によって左右面に分極電荷が発生する。なお、具体的な磁性誘電体としては  $MnWO_4$ ,  $TbMnO_3$ ,  $Ba_2Mg_2Fe_{12}O_{22}$ , あるいはナノ粒子と樹脂の複合体などのマルチフェロイック材料を使用すればよい。したがって本研究で提案した  $\phi$ - $q$  素子は実際に構成できるものである。以上により、磁束と電荷を結ぶ新しいデバイス  $\phi$ - $q$  素子の実現方針を得た。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計9件)

1. Kikombo A.K, Asai T., and Amemiya Y., "Neuro-morphic circuit architectures employing temporal noises and device fluctuations to improve signal-to-noise ratio in a single-electron pulse-density modulator," *International Journal*

*of Unconventional Computing*, vol. 7, no. 1-2, pp. 53-64, (2011).

2. Utagawa A., Asai T., and Amemiya Y., "Stochastic resonance in simple analog circuits with a single operational amplifier having a double-well potential," *Nonlinear Theory and Its Applications*, vol. 2, no. 4, pp. 409-416, (2011).

3. Utagawa A., Asai T., and Amemiya Y., "High-fidelity pulse density modulation in neuromorphic electric circuits utilizing natural heterogeneity," *Nonlinear Theory and Its Applications*, vol. 2, no. 2, pp. 218-225, (2011).

4. Fujita D., Asai T., and Amemiya Y., "A neuromorphic MOS circuit imitating jamming avoidance response of Eigenmannia," *Nonlinear Theory and Its Applications*, vol. 2, no. 2, pp. 205-217, (2011).

5. Ueno K., Asai T., and Amemiya Y., "Low-power temperature-to-frequency converter consisting of sub-threshold CMOS circuits for integrated smart temperature sensors," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 165, no. 1, pp. 132-137 (2011).

6. Ueno K., Hirose T., Asai T., and Amemiya Y., "A 1-uW, 600-ppm/ $^{\circ}C$  current reference circuit consisting of sub-threshold CMOS circuits," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II*, vol. 57, no. 9, pp. 681-685 (2010).

7. Asai S., Ueno K., Asai T., and Amemiya Y., "High-resistance resistor consisting of a subthreshold CMOS differential pair," *IEICE Transactions on Electronics*, vol. E93-C, no. 6, pp. 741-746, (2010).

8. Tsugita Y., Ueno K., Hirose T., Asai T., and Amemiya Y., "An on-chip PVT compensation technique with current monitoring circuit for low-voltage CMOS digital LSIs," *IEICE Transactions on Electronics*, vol. E93-C, no. 6, pp. 835-841, (2010).

9. Hirai T., Asai T., and Amemiya Y., "CMOS phase-shift oscillator based on the conduction of heat," *Journal of Circuits, Systems, and Computers*, vol. 19, no. 4, pp. 763-772, (2010).

〔学会発表〕(計9件)

1. Tovar G., Asai T., and Amemiya Y., "Array-enhanced stochastic resonance in a network of noisy neuromorphic circuits," *Proceedings of the 17th International Conference on Neural Information Processing*, pp. 188-196, Sydney, Australia (Nov. 22-25, 2010).

2. Akou N., Asai T., Yanagida T., Kawai T., and Amemiya Y., "A ReRAM-based analog synaptic device having spike-timing-dependent plasticity,"

- Nanoelectronics Days 2010*, p. 19, Aachen, Germany (Oct. 4-7, 2010).
3. Shimada H., Ueno K., Asai T., and Amemiya Y., "On-chip power supply for subthreshold-operated CMOS LSIs," *Proceedings of the 9th International Conference on System Science and Simulation in Engineering*, pp. 198-200, Iwate, Japan (Oct. 4-6, 2010).
  4. Ueno K., Shimada H., Asai T., and Amemiya Y., "Low-voltage power supply regulator for subthreshold-operated CMOS digital LSIs," *2010 International Conference on Solid State Devices and Materials*, Tokyo, Japan (Sep. 22-24, 2010).
  5. Utagawa A., Asai T., and Amemiya Y., "Stochastic resonance in a simple electric circuit having a double-well potential ---Circuit experiments with a single operational amplifier---," *Proceedings of 2010 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications*, pp. 55-59, Krakow, Poland (Sep. 5-8, 2010).
  6. Iida T., Asai T., Amemiya Y., and Sano E., "An offset compensation method using subthreshold CMOS operational amplifiers for fully differential amplifiers," *Integrated Circuits and Devices in Vietnam 2010*, Ho Chi Minh, Vietnam (Aug. 16, 2010).
  7. Utagawa A., Asai T., and Amemiya Y., "Stochastic resonance in neuromorphic semiconductor devices having a double-well potential," *Proceedings of the 14th International Conference on Cognitive and Neural Systems*, p. 86, Boston, USA (May 19-22, 2010).
  8. Tovar G., Asai T., and Amemiya Y., "Coupling-enhanced stochastic resonance in noisy neuromorphic devices," *Proceedings of the 14th International Conference on Cognitive and Neural Systems*, p. 87, Boston, USA (May 19-22, 2010).
  9. Akou N., Asai T., and Amemiya Y., "Towards memristor-CMOS-hybrid semiconductor devices for neural networks," *Proceedings of the 14th International Conference on Cognitive and Neural Systems*, p. 85, Boston, USA (May 19-22, 2010).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

雨宮 好仁 (AMEMIYA YOSHIHITO)  
北海道大学・大学院情報科学研究科・特任教授  
研究者番号：80250489

### (2) 研究分担者

高橋 庸夫 (TAKAHASHI YASUO)

北海道大学・大学院情報科学研究科・教授  
研究者番号：90374610

浅井 哲也 (ASAI TETSUYA)  
北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授  
研究者番号：00312380